



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»

№ 2 (62)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2025

Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – 110 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 и издатель:

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

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 по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 5 от 05.06.2025).



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. 2 (62)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NII «Respirator». – 2025. – No. 2 (62). – 110 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.

Founded and published by:

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

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: February 12, 2024).

The publication is included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database (Contract No. 157-03/2016 dated March 23, 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 August 09, 2022.

Approved for printing according to the reference of the Academic council of FSI NII «Respirator» EMERCOM of Russia (Protocol No. 5 dated 05.06.2025).

СОДЕРЖАНИЕ**I. Пожарная безопасность**

Головченко Е. А., Гусар Г. А.
Турбулентная фильтрация газа
в пористых средах

**Мамаев В. В., Пефтибай Г. И.,
Галухин Н. А., Татаров И. А.**
Обоснование конструктивных параметров
ствола устройства пожаротушения
тонкораспыленной водой

Канин В. А., Пивень Ю. А.
Автоматизированный контроль
содержания в шахтной атмосфере
взрывоопасных непредельных
углеводородов

Лебедева В. В.
Оценка устойчивости огнезащитного
покрытия к воздействию внешних
факторов

II. Безопасность труда

**Филатьева Э. Н., Павленко А. Т.,
Филатьев М. В., Красногрудов А. В.,
Малкин В. Ю.**
Актуальные проблемы исследования
процессов углеобразования
и проявления опасных свойств
шахтопластов

**Баринов А. В., Баринов М. Ф.,
Кучербаев А. А., Иванов Е. В.**
Исследование многофункциональной
защиты спасателя с использованием
полимерных материалов

TABLE OF CONTENTS**I. Fire safety**

Golovchenko Ye. A., Gusar G. A.
7 Turbulent gas filtration
in porous media

**Mamayev V. V., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A., Tatarov I. A.**
13 Substantiation of design parameters
of barrel of water mist fire
extinguishing device

Kanyn V. A., Pyven Yu. A.
20 Automated monitoring of explosive
unsaturated hydrocarbons
in the mine atmosphere

Lebedeva V. V.
28 Assessment of fire protection
coating resistance to external
factors

II. Occupational safety

**Filatieva E. N., Pavlenko A. T.,
Filatiev M. V., Krasnogradov A. V.,
Malkin V. Yu.**
35 Actual issues of studying coal formation
processes and the manifestation
of hazardous properties
of coal seams

**Barinov A. V., Barinov M. V.,
Kucherbaev A. A., Ivanov E. V.**
45 Research of multifunctional
rescuer protection using
polymer materials

Долженков А. Ф., Мороз Т. О.
Оценка эффективности защитной
одежды спасателей при воздействии
высокотемпературных факторов

**Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С.,
Францев В. И.**
Совершенствование защитного
футляра шахтного самоспасателя

Федоров Д. А.
Влияние лобовых аэродинамических
сопротивлений на безопасность
горных предприятий

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

**Мамаев В. В., Иваненко А. Ф.,
Мухин П. Е.**
Оценка профессионального риска
горноспасателя при разработке
мероприятий плана ликвидации аварий

Добрякова Е. И.
Обоснование целесообразности
применения навигационных систем
при вынужденной эвакуации

Руденко В. А.
Методика расчёта численности
и оптимальной расстановки членов
вспомогательных горноспасательных
команд для угольных шахт

**Веселов А. В., Давыдов Р. М.,
Кузьмин А. В.**
К вопросу оценки эффективности
технических средств поиска
пострадавших

Dolzhenkov A. F., Moroz T. O.
55 Evaluation of rescuers protective
clothing effectiveness when exposed
to high-temperature factors

**Zborschchik L. A., Pletenetskiy R. S.,
Frantsev V. I.**
61 Improving mine self-rescuer
protective case

Fedorov D. A.
68 The impact of shock aerodynamic
resistance on the safety of mine

III. Safety in emergency situations

**Mamayev V. V., Ivanenko A. F.,
Mukhin P. E.**
76 Assessment of mine rescuers
occupational hazards when developing
emergency response plan measures

Dobryakova E. I.
84 Feasibility of navigation systems
application during emergency
evacuation

Rudenko V. A.
94 Methodology for calculating
the number and optimal placement
of members of the auxiliary mine
rescue teams for coal mines

**Veselov A.V., Davydov R.M.,
Kuzmin A.V.**
101 On the question of assessing
the effectiveness of technical means
for searching victims

I. Пожарная безопасность

УДК [622.45:533.6]:622.41

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-36, +7 (949) 340-97-96

Геннадий Анатольевич Гусар, канд. техн. наук, доцент; e-mail: gusargan@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +7 (949) 350-86-75

ТУРБУЛЕНТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ГАЗА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Цель. Исследование фильтрационного движения потока газов для обоснования уравнения турбулентной фильтрации газа в пористой среде.

Методика. Аналитические исследования фильтрационных потоков газа в выработанном пространстве выемочных участков угольных шахт.

Результаты. Проведенные исследования показывают, что общая гидродинамическая основа обычных турбулентных течений и турбулентной фильтрации отражена отчетливо – это определяет широкие возможности применения методов исследования турбулентности в пористых средах.

Научная новизна. Полученное уравнение наиболее достоверно описывает процесс турбулентной фильтрации газа в пористых средах.

Практическая значимость. Уравнение турбулентной фильтрации газа в пористой среде позволит более полно исследовать турбулентную диффузию в пористых средах. Решение вопросов турбулентной диффузии связано с вопросами важнейших задач рудничной аэрогазодинамики и теплопередачи в выработанных пространствах выемочных участков угольных шахт и повышением пожаробезопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: аэрогазодинамика; фильтрационное движение; пористая среда; турбулентная фильтрация; выработанное пространство.

Для цитирования: Головченко Е. А., Гусар Г. А. Турбулентная фильтрация газа в пористых средах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 7–12. – EDN TNSZLO

Постановка проблемы. Фильтрационное движение шахтной воздушной среды оказывает существенное влияние на вентиляцию шахт. При разработке угольных месторождений выработанные пространства выемочных участков всегда имеют аэродинамический контакт с окружающими выработками и нередко с земной поверхностью, в связи с чем часть воздуха движется через выработанное пространство параллельно основному потоку [1].

Движение шахтного воздуха в выработанных пространствах, как правило, вызывает снижение количества воздуха, подаваемого в очистные забои, определяет характер распределения метана в выработках и является причиной самовозгорания угольных скоплений в выработанном пространстве [1–3].

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.

Авторами [1, 3] рассмотрены вопросы одномерного движения газов через пористые среды с упрощенным подходом описания процессов движения и с некоторой осредненной скоростью.

В работах [2–4] выработанное пространство выемочного участка рассмотрено как кусковато-пористая среда и на этой основе были выполнены расчеты поля фильтрационных утечек при одномерном движении газов.

Авторы исследований [3, 4–6] рассматривали основные физические показатели шахтного воздуха в проветриваемых горных выработках с учетом тепловых параметров окружающих горных пород.

Цель исследования. Исследование фильтрационного движения потока газов для обоснования уравнения турбулентной фильтрации газа в пористой среде.

Материалы и результаты исследований. Движение воздуха и газообразных примесей в выработанных пространствах относится к классу пространственных фильтрационных потоков. Уравнения пространственной фильтрации были выведены Н. Е. Жуковским [1, 4] на базе уравнений Эйлера динамики идеальной жидкости:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho F}{m} - \text{grad}P \right), \quad (1)$$

где V – мгновенная скорость течения в точке потока, м/с,

∇ – оператор набла, представляющий собой векторный дифференциальный оператор, компоненты которого являются частными производными по координатам,

ρ – плотность, кг/м³,

F – массовая сила, Н,

m – масса воздуха и газообразных примесей в единице объема пор, кг,

$\text{grad}P$ – градиент давления, Н/м³.

Заменим в уравнении (1) массовую силу F силами сопротивления, компоненты которых определяются из закона Дарси, установленного экспериментально [1, 3, 7], и получим

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{gV}{K_\phi} - \frac{1}{\rho} \text{grad}P, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²,

K_ϕ – коэффициент фильтрации, м/с, учитывающий силы вязкостного сопротивления пористой среды.

Таким искусственным приемом вязкостные силы выражаются через вектор скорости фильтрации, исключая затруднительный анализ уравнений фильтрации в напряжениях.

Уравнение фильтрации (2) описывает только случай фильтрационного движения при отсутствии сил турбулентного трения и классифицируется как уравнение ламинарной фильтрации.

Как видно из вышеизложенного, вывод уравнений фильтрационного движения базируется на основных уравнениях динамики идеальной и вязкой жидкости, в которые вместо действительной скорости подставляется скорость фильтрации.

Аналогичным образом можно подойти и к описанию турбулентной фильтрации, под которой следует понимать фильтрационное движение газа при наличии существенного влияния инерционных сил, возникающих при обтекании частиц или скелета пористой среды, а также турбулентных сил в обычном понимании по отношению к струйкам газа в каналах пористого материала [5–7].

Фильтрационное движение отличается от обычных видов течения тем, что поперечные перемещения частиц определяются самим строением пористой среды и имеют место при любых значениях скорости движения. Учитывая, что в пористых средах распределение пустот является беспорядочным, хаотичным, можно считать, что фильтрационные течения, во всех случаях характеризующиеся нерегулярными перемещениями частиц, всегда являются турбулентными.

Однако в определенном диапазоне скоростей имеет место плавное, слоистое течение газа в отдельных каналах пористой среды. Очевидно, что верхняя граница скорости этой области значительно ниже по сравнению с предельными скоростями ламинарных течений в трубах и каналах. Характерной особенностью турбулентной фильтрации является не только наличие хаотичных продольных и поперечных перемещений, но и существенное влияние связанных с таким перемещением сил инерционного происхождения.

При выводе уравнения турбулентного движения газа рассмотрим мгновенную скорость течения V в точке потока как сумму некоторой осредненной скорости потока $\bar{V}$, м/с, и скорости пульсации V^l , м/с

$$V = \bar{V} + V^l \quad (3)$$

Рассмотрим правило осреднения из уравнений Навье-Стокса для мгновенной скорости [1, 5–7]:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)V = \frac{\rho F}{m} - \text{grad}P + \mu \nabla^2 V, \quad (4)$$

где μ – коэффициент вязкости, Па·с.

С учетом выражения (3) и уравнения (4) получим уравнение турбулентного течения:

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \rho(\bar{V} \cdot \nabla)\bar{V} = \frac{\rho F}{m} - \text{grad}P + \mu \nabla^2 \bar{V} - \rho \overline{V^l V^l}, \quad (5)$$

где $\rho \overline{V^l V^l}$ – тензор турбулентных напряжений в потоке.

Вследствие появления дополнительных членов уравнение (5) оказывается незамкнутым. Для их замыкания введем предположение о взаимосвязи между осредненной скоростью потока $\bar{V}$ и скоростью пульсации V^l , т.е. зададим вид зависимости $V^l = f(\bar{V})$.

Используем для вывода уравнений турбулентной фильтрации метод Рейнольдса [6], полагая, что в качестве осредненной скорости можно принять скорость фильтрации. В качестве исходных были использованы уравнения гидродинамики в напряжениях

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)V = \text{div}P, \quad (6)$$

где $\text{div}P$ – линейный дифференциальный оператор давления, Н/м³.

Учитывая выражение (3) и применяя правила осреднения Рейнольдса, приведем уравнение (6) к виду

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \rho (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} + \rho \overline{V^1 V^1} = -gradP + \Delta \bar{\tau}, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{\tau}$ – тензор осредненных напряжений, Н/м³, определяется по гипотезе Дарси

$$\Delta \bar{\tau} = -\frac{\mu}{k} \bar{V}, \quad (8)$$

где k – коэффициент проницаемости силы вязкостного сопротивления пористой среды, м².

Тензор турбулентных напряжений $\rho \overline{V^1 V^1}$ приводится к виду:

$$\rho \overline{V^1 V^1} = \frac{\rho \bar{V}^2}{l}, \quad (9)$$

где l – путь смещения, м, который определяется экспериментально, имеющий размерность длины, представляет собой некоторый геометрический масштаб, аналогичный пути смещения и масштабам турбулентности, получивший название масштаба макрошероховатости.

Путь смещения является в общем среднестатистической характеристикой турбулентности, и нетрудно видеть, что величина l аналогична интегральному масштабу турбулентности в статистической теории турбулентных течений.

Параметр l определяется структурой пористой среды и по своей физической сущности является статистическим. Этот параметр относится к макроскопическим характеристикам пористой среды и его использование в теории течения жидкостей и газов связано с экспериментальным исследованием фильтрации.

С учетом выражений (7) и (9) уравнение (5) принимает вид:

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \rho (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} + \frac{\rho \bar{V}^2}{l} = -gradP - \frac{\mu}{k} \bar{V} \quad (10)$$

Данное уравнение наиболее достоверно описывает процесс турбулентной фильтрации газа в пористых средах. Общая гидродинамическая основа обычных турбулентных течений и турбулентной фильтрации отражена обоснованно, что определяет широкие возможности применения методов исследования турбулентности в пористых средах.

Выводы. Возможность использования полученного уравнения турбулентной фильтрации газа в пористой среде позволит более полно исследовать турбулентную диффузию в пористых средах. Решение вопросов турбулентной диффузии связано с вопросами важнейших задач рудничной аэрогазодинамики и теплопередачи в выработанных пространствах выемочных участков угольных шахт и повышением пожаробезопасности ведения горных работ.

Список литературы / References

1. Смирняков, В. В. Оценка методов расчета утечек воздуха в выработанных пространствах / В. В. Смирняков, Е. П. Ютяев // Горный информационно-аналитический бюллетень: Научно-технический журнал. – 2014. – №3. – С. 62–68.

Smirnyakov, V. V., Yutyayev, E. P. *Ocenka metodov rascheta utechek vozduha v virabotannih prostranstvah* [Evaluation of methods for calculating air leaks in exhaust spaces]. *Mining*

information and analytical bulletin: Scientific and Technical Journal. 2014; no. 3, pp. 62-68. (In Russian)

2. Попов, С. Н. К вопросу об адекватности математической модели аэродинамики выработанного пространства / С. Н. Попов, Ю. Н. Бобнев // Труды Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова. –2000. – №1. – С. 23–25.

Popov, S. N., Bobnev, Yu. N. *K voprosu ob adekvatnosti matematicheskoy modeli aerodinamiki virabotannogo prostranstva* [On the question of the adequacy of the mathematical model of the aerodynamics of the developed space]. Proceedings of Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov. 2000; no.1, pp. 23-25. (In Russian)

3. Колегов, Г. А. Метод учета аэродинамических параметров выработанных пространств в моделях шахтных вентиляционных систем / Г. А. Колегов, А. Ю. Крайнов // Уголь. –2021. – № 7 (1144). – С. 33–38.

Kolegov, G. A., Kraynov, A. Yu. *Metod ucheta aerodinamicheskikh parametrov virabotannih prostranstv v modelyakh shahtnih ventilyacionnih sistem* [A method of accounting for the aerodynamic parameters of exhausted spaces in models of shaft ventilation systems]. Coal. 2021; no.7 (1144), pp. 33-38. (In Russian)

4. Пашковский, П. С. Проветривание шахт при подземных пожарах / П. С. Пашковский, В. И. Лебедев. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 448 с.

Pashkovskiy, P. S., Lebedev, V. I. *Provetrivanie shaht pri podzemnih pozharah* [Ventilation of mines in case of underground fires]. Donetsk, Pr. Ent. «Arpi», 2012; 448 p. (In Russian)

5. Агеев, В. Г. Профилактика эндогенной пожароопасности: монография / В. Г. Агеев, П. С. Пашковский, С. П. Греков. – Донецк, 2020. – 592 с.

Ageev, V. G., Pashkovskiy, P. S., Grekov, S. P. *Profilaktika endogennoy pogaroopasnosti: monographiya* [Prevention of endogenous fire hazard: the monograph]. Donetsk, 2020; 592 p. (In Russian)

6. Палеев, Д. Ю. О численном методе решения стационарной задачи проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты / Д. Ю. Палеев, М. Ю. Балаганский, А. Н. Кнышенко / Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово, 2010. №1. – С. 31–34.

Paleev, D. Yu., Balaganskiy, M. Yu., Knyshenko, A. N. *O chislennom metode resheniya stacionarnoy zadachi provetrivaniya gornih virabotok i virabotannogo prostranstva shahti* [On a numerical method for solving the stationary problem of ventilation of mine workings and the depleted space of the mine]. Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry. 2010; no. 1, pp. 31-34. (In Russian)

7. Каледина, Н.О. Аэрологическая безопасность угольных шахт / Н.О. Каледина, Д. А. Мещеряков / Горный информационно-аналитический бюллетень: Научно-технический журнал. Труды научного симпозиума «Неделя горняка – 2011». – Москва, 2011. – № S1. – С. 227–237.

Kaledina, N.O., Mescheryakov, D.A. *Aerologicheskaya bezopasnost ugolnih shaht* [Aerological safety of coal mines]. Mining information and analytical bulletin: Scientific and Technical Journal. Proceedings of the scientific symposium «Miner's Week – 2011». 2011; no. S1, pp. 227-237. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым,
д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 24.04.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, *Cand. of Tech. Sci., Deputy Head; e-mail: ennio_80@mail.ru*
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 332-78-83; +7 (949) 340-97-96

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

TURBULENT GAS FILTRATION IN POROUS MEDIA

Objective. Determination of the dependence of activation energy of coal dust on the critical temperature of spontaneous combustion to assess its fire-explosive hazard.

Methods. Analytical studies of gas filtration flows in the excavated space of coal mine workings.

Results. The conducted studies show that the general hydrodynamic basis of ordinary turbulent flows and turbulent filtration is clearly reflected, which determines the wide possibilities of application of methods for the study of turbulence in porous media.

Scientific novelty. The obtained equation most correctly describes the process of turbulent gas filtration in porous media.

Practical value. The equation of turbulent gas filtration in porous medium will allow to study more fully turbulent diffusion in porous media. The solution of turbulent diffusion issues is connected with the most important problems of mine aerogasodynamics and heat transfer in the excavation areas of coal mines and increasing the fire safety of mining operations.

Keywords: *aerogasodynamics; filtration motion; porous medium; turbulent filtration; goaf.*

For citation: Golovchenko Ye. A., Gusar G. A. Turbulent gas filtration in porous media. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 7–12. EDN TNSZLO

УДК 614.844.2:532.525.3

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Георгий Иванович Пефтибай, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: g.peftibay@80.mchs.gov.ru

Николай Александрович Галухин, ст. науч. сотр.; e-mail: n.galuhin@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-36

Игорь Александрович Татаров, преподаватель; e-mail: i.tatarov@igps.80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение

высшего образования «Донецкий институт ГПС МЧС России»

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34А. Тел.: +7 (949) 305-76-66

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТВОЛА УСТРОЙСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Цель. Определение оптимальных конструктивных параметров ствола установки для повышения кинетической энергии, полного импульса струи и эффективности тушения пожара.

Методы. Аналитические исследования, включающие методы теории центробежной форсунки, расчетные методы определения конструктивных параметров.

Результаты. Установлены аналитические зависимости для определения оптимальных геометрических параметров, при которых кинетическая энергия и полный импульс струи на срезе газокапельного сопла максимальны.

Научная новизна. Аналитические зависимости для определения радиуса расположения газовых сопел и угла их наклона относительно продольной оси газокапельного сопла при истечении струи с противодавлением получены впервые.

Практическая значимость. Установленные аналитические зависимости позволяют определить конструктивные параметры ствола пожаротушающей установки, обеспечивающие максимальную кинетическую энергию и полный импульс на срезе газокапельного сопла, что позволяет повысить эффективность тушения пожара.

Ключевые слова: конструктивные параметры; радиус расположения сопел; угол наклона сопел; ствол; пожаротушающая установка.

Для цитирования: Мамаев В. В., Пефтибай Г. И., Галухин Н. А., Татаров И. А. Обоснование конструктивных параметров ствола устройства пожаротушения тонкораспыленной водой // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 13–19. – EDN ACXNIA

Постановка проблемы. Тонкораспыленная вода повышает эффективность пожаротушения за счет повышенного теплосъема, что сокращает время тушения и объем затраченной воды, снижения вторичного ущерба от пролива воды [1–4]. Перечисленные преимущества реализуются при условии превышения импульса капельной струи над восходящим тепловым потоком пожара. В противном случае капли отклоняются от вектора ее скорости, направленного в сторону очага пожара, снижается проникающая способность капель на поверхность горящего материала. Поэтому повышение кинетической энергии и полного импульса капельной струи за счет совершенствования конструктивного решения и выбора научно обоснованных конструктивных параметров ствола является актуальной задачей, решение которой позволяет повысить эффективность тушения пожара тонкораспыленной водой.

Цель работы. Определение оптимальных конструктивных параметров ствола установки для повышения кинетической энергии, полного импульса струи и эффективности тушения пожара.

Анализ последних исследований. Известны устройства для тушения пожаров тонкораспыленной водой ¹, в которых первичное каплеобразование происходит за счет взаимодействия высокоскоростной газовой струи с перпендикулярно направленными струйками воды. Недостаток этих технических решений состоит в затрате значительной доли кинетической энергии газовых струй на диспергацию воды и изменение направления движения капель на 90°. Это снижает скорость газокapelного потока, кинетическую энергию и полный импульс на срезе сопла установки, а также эффективность пожаротушения.

В устройстве для распыления жидкости газом ² соосно сверхзвуковому газовому соплу установлена вихревая камера, в которую подается вода, а газовая струя распыляет пленочную жидкость, истекая через кольцевой зазор. Рассмотренное устройство для распыления жидкости газом неэффективно использовать в малорасходных средствах пожаротушения ввиду того, что при реальных габаритах газовый кольцевой зазор должен был равен нескольким десятым долям миллиметра, что сложно изготовить и защитить от засорения. Поэтому дальнейшее совершенствование средств пожаротушения тонкораспыленной водой и научное обоснование оптимальных конструктивных параметров ствола установки позволит повысить эффективность пожаротушения.

Цель исследования. Увеличение кинетической энергии и полного импульса струи на срезе газокapelного сопла для повышения эффективности тушения пожара.

Результаты исследований. Для повышения эффективности тушения пожара предложено техническое решение ствола [5] с центробежно-газодинамическим принципом получения тонкораспыленной воды (рис. 1).

Вода через канал подвода воды и входное отверстие поступает во внутреннюю полость вихревой камеры центробежной форсунки, где приобретает вращательное и поступательное движение и далее выбрасывается в виде тонкой пленки полого конуса с углом факела β в конфузор газокapelного сопла. Одновременно сжатый газ через канал подвода газа поступает на входы газовых сопел, расположенных на распылителем диске. Выходные струи газовых сопел разрушают неустойчивую пленочную жидкость факела распыления центробежной форсунки и направляют диспергированную (капельную) жидкость на вход (в конфузорную часть) газокapelного сопла, где она ускоряется и выбрасывается в атмосферу с высокой кинетической энергией.

Для получения высокоэнергетического газокapelного потока необходимо обосновать следующие параметры: радиус R расположения на распылителем

¹ Патент RU 2107554, МПК В05В 7/00, А01Г 25/00, А62С 31/02. Способ создания газокapelной струи, установка для его осуществления и сопло для создания газокapelной струи : № 96113451/25 : заявл. 08.07.1996 : опубл. 27.03.1998 / Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. ; заявитель НИИ низких температур при Московском государственном авиационном институте (техническом университете).

Патент RU 24639, МПК А62С 13/00, В05В 7/04. Устройство для пожаротушения : № 2002111191/20 : заявл. 30.04.2002 : опубл. 20.08.2002 / Карпышев А. В. ; заявитель ООО «Темперо».

Патент RU 2316369, МПК А62С 31/02, В05В 7/04. Устройство пожаротушения : № 2006122074/12 : заявл. 22.06.2006 : опубл. 10.02.2008 / Душкин А. Л., Карпышев А. В.

² Полезная модель RU 125494, МПК В05В 7/10, А62С 31/02. Устройства для распыления жидкости газом : № 2012110428/05 : заявл. 19.03.2012 : опубл. 10.03.2013 / Андрюшкин А.Ю.

диске газовых сопел, угол α наклона газовых сопел относительно их продольной оси. Особенность данного процесса распыления состоит в том, что в конфузоре создается противодавление, действующее на факел пленочной жидкости, а в классической литературе по теории центробежной форсунки рассматривают только истечения в атмосферу с нулевым избыточным давлением.

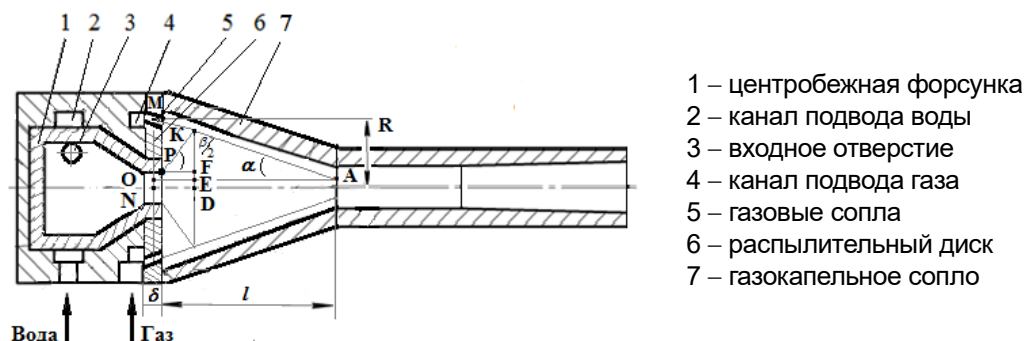


Рис. 1. Конструктивное решение ствола установки пожаротушения с центробежно-газодинамическим принципом получения тонкораспыленной воды

В связи с вышеизложенным возникает вопрос выбора оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих минимальную потерю кинетической энергии газовых струй, затраченную на разрушение факела распыления центробежной форсунки при истечении пленочной жидкости в среду с противодавлением. Для решения этой задачи воспользуемся исследованием [6] – зависимостью относительной толщины пленки жидкости в спутном потоке газа от относительного расстояния до среза сопла центробежной форсунки при различном противодавлении газовой среды (рис. 2).

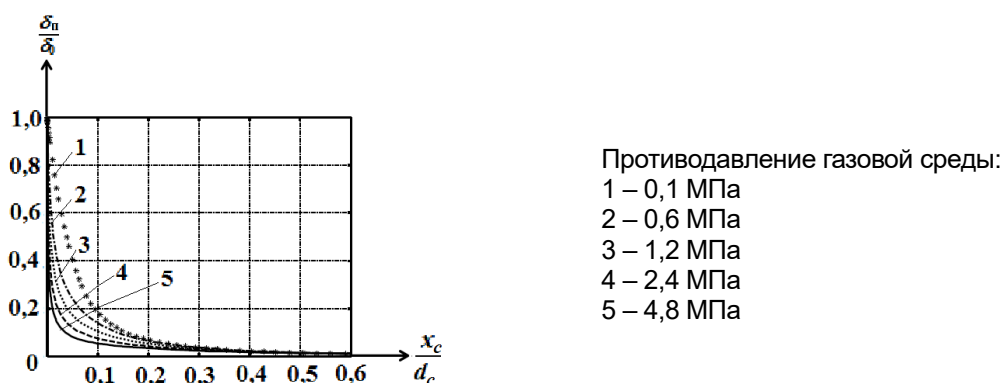


Рис. 2. Зависимость относительной толщины пленки жидкости в спутном потоке газа от относительного расстояния до среза сопла центробежной форсунки при различном противодавлении газовой среды

Анализ данной зависимости показывает, что:

– при $\frac{x_c}{d_c} \geq 0,3$ относительная толщина пленки $\frac{\delta_p}{\delta_0} \approx \text{const}$ и является минимальной;

– при $\frac{x_c}{d_c} \geq 0,3$ толщина пленки не зависит от противодавления (0,1–4,8 МПа),

где x_c – расстояние до среза сопла центробежной форсунки, м;

d_c – диаметр сопла центробежной форсунки, м;

δ_n – толщина пленки факела распыления, м;

δ_o – толщина пленки факела распыления при противодавлении 0,1 МПа (атмосферном давлении), м.

Таким образом, можно сделать вывод, что при

$$x_c \geq 0,3d_c \quad (1)$$

затраты кинетической энергии газовой струи в стволе (рис. 1) будут минимальными ввиду минимальной толщины разрушаемой пленки и, кроме того, эти затраты энергии не зависят от противодавления за срезом сопла центробежной форсунки.

В связи с этим принимаем, что координата пересечения (точка К) газовой струи МА со струей пленочной жидкости РК отстоит от плоскости сопла центробежной форсунки (отрезок PF) на величину более $0,3 d_c$, то есть

$$PF \geq 0,3d_c. \quad (2)$$

Обозначим $\angle KPF = 0,5 \beta$, $\angle MAO = \alpha$,

где β – угол факела распыления центробежной форсунки, °.

Рассмотрим ΔMOA и ΔKEA , они подобные (угол α общий, треугольники прямоугольные), то есть

$$\Delta MOA \sim \Delta KEA.$$

На основании свойств подобия треугольников выполняется равенство

$$\frac{KE}{MO} = \frac{EA}{OA}. \quad (3)$$

Отрезок равен $KE = KF + FE$.

Из ΔPFK $KF = tg(0,5 \beta) 0,3d_c$; $FE = 0,5d_c - 0,25d_k = 0,5(d_c - 0,5d_k)$,

где d_k – критический диаметр газокapельного сопла, м.

Тогда отрезки MO , EA , OA находим из выражений

$$KE = 0,3 tg(0,5 \beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_k); \quad (4)$$

$$MO = MN - ON = R - 0,25d_k;$$

$$EA = l - PF = l - 0,3d_c; \quad (5)$$

$$OA = l + 0,5\delta,$$

где l – длина конфузора газодинамического сопла, м;

δ – толщина распылительного диска, м.

Используя полученные данные, уравнение (3) запишем в виде

$$\frac{0,3tg(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_k)}{R - 0,25d_k} = \frac{l - 0,3d_c}{l + 0,5\delta}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) находим искомый параметр R

$$R = \frac{[0,3tg(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_k)](l + 0,5\delta)}{l - 0,3d_c} + 0,5(d_c - 0,5d_k). \quad (7)$$

Очевидно, что значение R в выражении (7) – минимальный радиус, при котором затраты энергии газовой струи на разрушенной пленочной жидкости минимальны.

Максимальный радиус $R_{\max}$, м, ограничивается радиусом R_o , м, входа в газокапельное сопло и углом наклона α газового сопла

$$R_{\max} = R_o - 0,5 \delta \operatorname{tg} \alpha \quad (8)$$

$\operatorname{tg} \alpha$ находим из ΔKEA

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{KE}{EA}.$$

Подставляя ранее найденные значения (4) и (5), получаем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta) d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})}{l - 0,3d_c}. \quad (9)$$

Подставляя полученное значение в уравнение (8), имеем

$$R_{\max} = R_o - \frac{0,5\delta[0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})]}{l - 0,3d_c}.$$

Тогда оптимальное значение радиуса распыления газового сопла на распылительном диске находится в диапазоне

$$\begin{aligned} & \frac{[0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})]}{l - 0,3d_c} (l + 0,5\delta) + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa}) \leq R \leq \\ & \leq R_o - \frac{0,5\delta[0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})]}{l - 0,3d_c}. \end{aligned} \quad (10)$$

Зависимость угла α наклона газовых сопел от выбранного радиуса R найдем следующим образом. Из ΔMOA получаем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{MO}{OA},$$

поскольку

$$MO = R - ON,$$

$$ON = 0,5d_c - 0,25d_{\kappa} = 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa}), \quad OA = l + 0,5\delta$$

то

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{R - 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})}{l + 0,5\delta}. \quad (11)$$

Диапазон изменения α определим путем подстановки значений левой и правой границы R из неравенства (10) в формулу (11). Тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{arctg} \frac{0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})}{l - 0,3d_c} \leq \alpha \leq \operatorname{arctg} \frac{R - 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})}{l + 0,5\delta} - \\ - \frac{0,5\delta[0,3 \operatorname{tg}(0,5\beta)d_c + 0,5(d_c - 0,5d_{\kappa})]}{(l - 0,3d_c)(l + 0,5\delta)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Выводы. Впервые установлены аналитические зависимости для определения оптимальных конструктивных параметров ствола пожаротушащего устройства с центробежно-газодинамическим принципом распыления воды: радиус расположения газовых сопел и угол их наклона относительно продольной оси газокapelного сопла.

Применение полученных зависимостей для определения конструктивных параметров ствола позволит повысить кинетическую энергию и полный импульс струи на срезе газокapelного сопла, и, как следствие, эффективность тушения пожара.

Список литературы / References

1. Андриюшкин, А. Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением / А. Ю. Андриюшкин; Балтийский государственный технический университет. – СПб., 2012. – 400 с.

Andryushkin, A. Yu. *Formirovaniye dispersnykh sistem sverkhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniyem* [Formation of dispersed systems by supersonic gas-dynamic spraying]. St. Petersburg, Baltic State Technical University, 2012. 400 p. (In Russian)

2. Пахомов, Г. Б. Новейшая технология пожаротушения тонкораспыленной водой. Характеристики устройств и перспективы развития / Г. Б. Пахомов // Мир и безопасность. – 2008. – № 3. – С. 24–29.

Pakhomov G. B. *Noveyshaya tekhnologiya pozharotusheniya tonkoraspylennoy vodoy. Kharakteristiki ustroystv i perspektivy razvitiya* [The latest technology of fire extinguishing with thinly sprayed water. Device characteristics and development prospects]. Peace and security. 2008; no. 3, pp. 24-29. (In Russian)

3. Дауэнгауэр, С. А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С. А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 78–81.

Dowengauer S. A. *Pozharotusheniye tonkoraspylennoy vodoy: mekhanizmy, osobennosti, perspektivy* [Fire extinguishing with thinly sprayed water: mechanisms, features, prospects]. Fire and explosion safety. 2004; no. 6, pp. 78-81. (In Russian)

4. Импульсное пожаротушение – состояние вопроса / А. В. Казаков, Р. А. Емельянов, Д. В. Бухтояров, Д. В. Полтавец // Пожарная безопасность. – 2022. – № 3 (108). – С. 70–75.

Kazakov A. V., Emelyanov R. A., Buhtoyarov D. V., Poltavec D. V. *Impulsnoye pozharotusheniye – sostoyaniye voprosa* [State of the issue of pulse fire extinguishing]. Fire Safety. 2022; no. 3 (108), pp. 70-75. (In Russian)

5. Пефтибай, Г. И. Устройство пожаротушения с центробежно-газодинамическим принципом получения тонкораспыленной воды / Г. И. Пефтибай, Н. А. Галухин, И. А. Татаров // Проблемы техносферной безопасности. Ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов I Научно-практической конференции с международным участием, 28–29 мая 2025 года. – Донецк : ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России», 2025. – С. 78–80.

Peftibay G. I., Galukhin N. A., Tatarov I. A. *Ustroystvo pozharotusheniya s tsentrobezhno-gazodinamicheskim printsipom polucheniya tonkoraspylennoy vody* [Fire extinguishing device with a centrifugal gas-dynamic principle for producing finely atomized water]. Problems of Technosphere Safety. Elimination of Consequences of Emergencies : abstracts of the reports of the 1st scientific and practical conference for the 80th anniversary of the FSI NII “Respirator” EMERCOM of Russia. Donetsk, 2025. pp. 78-80. (In Russian)

6. Свириденков, А. А. Характеристики факела распыливания за центробежными форсунками при повышенном давлении в камере сгорания / А. А. Свириденков,

В. В. Третьяков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – Т. 15. – № 4. – С. 143–149.

Sviridenkov A. A., Tretyakov V. V. *Kharakteristiki fakela raspylivaniya za tsentrobezhnymi forsunkami pri povyshennom davlenii v kamere sgoraniya* [Characteristics of a fuel spray downstream the pressure atomizers under high pressure in the combustion chamber]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2016; no. 15 (4), pp. 143-149. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 23.04.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. of Tech. Sci., Main Researcher; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Georgy Ivanovich Peftibay, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, Senior Research Officer; 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) 332-78-36

Igor Aleksandrovich Tatarov, Teacher; e-mail: i.tatarov@igps.80.mchs.gov.ru

Federal State Government Educational Establishment of Higher

Vocational Training «Donetsk Institute of SFS of EMERCOM of Russia»

283050, Donetsk, Rosa Luxemburg St., 34 A. Phone: +7 (949) 305-76-66

SUBSTANTIATION OF DESIGN PARAMETERS OF BARREL OF WATER MIST FIRE EXTINGUISHING DEVICE

Objective. Determination of optimal design parameters of the device barrel to increase kinetic energy, total jet impulse and fire extinguishing efficiency.

Methods. Analytical studies, including methods of centrifugal nozzle theory, calculation methods for determining design parameters.

Results. Analytical dependencies have been established to determine the optimal geometric parameters under which kinetic energy and jet total impulse at gas-droplet nozzle exit have been maximized.

Scientific novelty. For the first time analytical dependencies for determining the gas nozzles radius and angle of their inclination relative to longitudinal axis of gas-droplet nozzle at jet outflow with backpressure have been obtained.

Practical significance. The determined analytical dependencies make it possible to determine design parameters of fire extinguishing system barrel, providing maximum kinetic energy and full impulse at gas-droplet nozzle section, allowing increasing the fire extinguishing process efficiency.

Key words: *design parameters; nozzle location radius; nozzle angle of inclination; barrel; fire extinguishing system.*

For citation: Mamayev V. V., Peftibay G. I., Galukhin N. A., Tatarov I. A. Substantiation of design parameters of barrel of water mist fire extinguishing device. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 13–19. EDN ACXNIA

УДК [622.412:622.411]:001.891.572

Владимир Алексеевич Канин, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: vlkanin2@yandex.ru
Юрий Анатольевич Пивень, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: piven22@internet.ru
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела»
283001, Донецк, ул. Челюскинцев, 291. Тел.: +7 (949) 368-06-21

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ В ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЕ ВЗРЫВООПАСНЫХ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Цель. Установление необходимости и возможности автоматизированного контроля содержания в шахтной атмосфере взрывоопасных непредельных углеводородов.

Методы. Анализ литературных источников и результатов шахтных исследований свойств и распределения в горном массиве непредельных углеводородов и выбор датчиков контроля содержания в шахтной атмосфере ацетилена.

Результаты. Получены решения круга вопросов, относящихся к установлению путей распространения в горные выработки непредельных углеводородов, их воспламенения, инициирующего взрыв метановоздушной смеси, выбору и апробации в шахтных условиях эффективной коммуникационно-информационной системы и датчиков для осуществления автоматизированного контроля содержания в шахтной атмосфере непредельных углеводородов.

Научная новизна. Обоснование прогнозных критериев, необходимых при контроле содержания в шахтной атмосфере ацетилена.

Практическая значимость. Выбор и апробация эффективных датчиков контроля в шахтной атмосфере ацетилена и разработка требований к местам их установки в горных выработках.

Ключевые слова: *непредельные углеводороды в шахтной атмосфере; взрывоопасность ацетилена; газоанализаторы; чувствительные инфракрасные элементы; шахтная атмосфера; автоматизированный контроль.*

Для цитирования: *Канин В. А., Пивень Ю. А. Автоматизированный контроль содержания в шахтной атмосфере взрывоопасных непредельных углеводородов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 20–27. – EDN FYTITM*

Постановка проблемы. Многолетними исследованиями, выполненными на шахтах Донбасса, в том числе и Республиканским академическим научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), установлено, что основным источником аномальных выделений горючих газов в горные выработки и местами инициирования газодинамических явлений и взрывов метановоздушной смеси являются тектонические нарушения. Заблаговременное прогнозирование этих нарушений и возможных последствий при их вскрытии является сложной задачей, которая к настоящему времени не имеет комплексного решения. Поэтому наряду с развитием геофизических методов прогноза тектоники необходимо развивать и геохимическое направление исследований по определению компонентного и изотопного состава рудничных газов для установления их генезиса и путей миграции в горные выработки.

Анализ последних исследований. Выявленные специалистами РАНИМИ закономерности распределения изотопного состава рудничного газа в тектонических нарушениях [1, 2] подтвердили идею глубинного генезиса части углеводородов, выделяющихся в угольных шахтах. При этом было установлено,

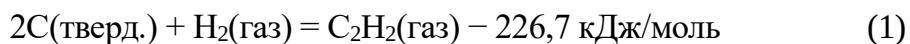
что в аномальных по газовыделению зонах, приуроченных к тектоническим нарушениям, которые связаны с разломами кристаллического фундамента, происходит утяжеление изотопного состава углерода метана ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) и углекислого газа $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, уменьшается разница ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$), возрастает концентрация гелия (He) и водорода (H_2), понижается количественное соотношение H_2/He , возрастает суммарная концентрация тяжелых углеводородов. Все это указывает на генетическую разобщенность исследованных газов и присутствие в них газов глубинного (возможно мантийного) происхождения [1, 3].

Поскольку определение изотопного состава углерода метана и углекислого газа требует длительного времени и сложного оборудования, в качестве диагностического признака входа выработки в аномальную зону можно использовать результаты совместного определения концентрации в рудничной атмосфере тяжелых углеводородов и гелия. Разработанная «Петровским заводом угольного машиностроения» система безопасности УТАС (унифицированная телекоммуникационная автоматизированная система), в отличие от других систем управления безопасностью на угольных шахтах, имеет в своем составе датчики тяжелых углеводородов, но к сожалению, гелий в настоящее время можно определять только хроматографическим методом, а концентрация тяжелых углеводородов в рудничной атмосфере в отрыве от других газов не может однозначно свидетельствовать о генезисе наблюдаемой аномалии.

В последние годы, в связи с участвовавшими случаями аварий в угольных шахтах, связанных со вспышками и взрывами рудничного газа, стал проявляться интерес к изучению содержания в горном массиве непредельных углеводородов (ацетилена, этилена и пропилена), главными свойствами которых являются высокая молекулярная энергоемкость и метастабильность [4]. Изучение распространения в горном массиве непредельных углеводородов особенно интересно с позиций познания принципов миграции газов в горные выработки. Только в условиях высоких температур возможен синтез молекул непредельных углеводородов – они образуются при пиролизе метана при температуре $1500\text{ }^\circ\text{C}$ или из карбида кальция, получение которого осуществляется энергетической мощностью в $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Совершенно очевидно, что такие условия существуют значительно ниже глубины разработки угольных пластов, следовательно, непредельные углеводороды можно характеризовать как адвентивные газы, занявшие свое современное положение в газовой составляющей угольно-породного массива путем миграции из глубинных горизонтов к приповерхностным по тектоническим трещинам. Появление этих газов в угольно-породном массиве или атмосфере горной выработки наряду с тяжелыми углеводородами свидетельствует о ведении горных работ в зоне тектонического нарушения, связанного с глубинными разломными структурами, которые длительное время могут подпитывать выработку горючими газами.

Цель исследования. Установление необходимости и возможности автоматизированного контроля содержания в шахтной атмосфере взрывоопасных непредельных углеводородов.

Материалы и результаты исследований. Тройная углеродная связь ($-\text{C}\equiv\text{C}-$) ацетилена непрочна и легко разрушается под действием разных веществ и факторов, что является причиной его чрезвычайной химической активности. Высокая эндотермичность реакции образования ацетилена из углерода и водорода ($\Delta H_{298}^0 = 226,7\text{ кДж/моль}$)



делает ацетилен одним из самых богатых энергией углеводородов и самым взрывоопасным из всех известных газов [2, 4, 5]. Соответственно, велика вероятность инициирования цепного разложения ацетилена на элементы по реакции, обратной (1), с выделением тепла, которое и лежит в основе взрыва, детонации и самовоспламенения ацетилена.

В природных газах ацетилен встречается редко и в малых количествах. В угольных шахтах ацетилен может образовываться еще и в процессе термического разложения каменных углей при пожарах.

При рассмотрении свойств и природы образования ацетилена применительно к безопасности работ в угольных шахтах нельзя не отметить результаты фундаментальных исследований, выполненных в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (г. Новосибирск), где методами физико-математического моделирования поведения газовых реакционно-способных смесей под ударно-волновой нагрузкой был исследован гомогенный газофазный пиролиз метана в этилен и ацетилен в ударной трубе [5]. Результаты моделирования показали, что под действием ударной волны, которая отражается от торца трубы, процесс пиролиза метана является эндотермическим. Из-за эндотермичности реакции температура за отраженной ударной волной быстро падает, вследствие этого химические превращения в процессе пиролиза останавливаются на суммарной массовой концентрации этилена и ацетилена порядка 15 %. Для более глубокой конверсии метана в этилен и ацетилен требуется дополнительный подогрев газа.

Анализируя эти результаты, можно сделать несколько практических выводов. Во-первых, хотя для условий угольных шахт данный вопрос еще не изучался, не исключено, что в процессе производства взрывных работ в подготовительных выработках в результате пиролиза метана, содержащегося в рудничной атмосфере, под действием ударной волны может происходить образование ацетилена и этилена. Во-вторых, если для промышленного производства ацетилена выход продукта в объеме 15 % представляется незначительным, то образование такого количества ацетилена на ограниченном участке горной выработки может приводить к аварийным ситуациям. В-третьих, ударная волна в горных выработках, которая формируется и при взрывах метано-воздушной смеси, может усугублять последствия взрыва за счет участия в нем новообразующегося ацетилена.

Таким образом, помимо контроля содержания ацетилена в рудничной атмосфере с целью выявления аномальных зон, приуроченных к тектоническим нарушениям, необходимо контролировать ацетилен также и при производстве взрывных работ.

В рассматриваемом направлении изучению неопредельных углеводородов в Донбассе посвящены работы Радзивилла А. Я. и Сукачева А. Н. Первоочередным объектом изучения насыщенности горного массива ацетиленом ими была выбрана наиболее активная в тектоническом отношении зона Ветковского и Григорьевского надвигов, в которой расположены поля шахт Донецко-Макеевского района Донбасса. В этой зоне Еленовская магмотермальная аномалия и Амвросиевский купол могли служить энергетическим источником деструкции низших и синтеза неопредельных углеводородов. Еленовская магмотермальная аномалия размещается в узле пересечения бортовых разломов складчатого Донбасса и Украинского щита,

а Амвросиевский купол и гипотетичная интрузия – под ним на глубине 5 км в зоне Еланчик-Ровеньковского глубинного разлома. Говоря о наличии в газовой составляющей угольных пластов и вмещающих пород трансформированных биогенных ненасыщенных углеводородов, авторы не исключают возможность насыщения угольного массива неопредельными углеводородами, которые мигрируют по глубинным разломам из верхней мантии в более высокие горизонты осадочных пород. Однако отсутствие анализа изотопного состава элементов, составляющих неопредельные углеводороды, не позволило им разделить эти углеводороды на биогенные и абиогенные типы.

Произведенные рекогносцировочные исследования углей Донецко-Макеевского района дали авторам основание утверждать, что ацетиленопоявления приурочены, в основном, к нарушениям, опережающим Григорьевский и Первомайский надвиги. Неопредельные углеводороды в сорбированных углем газах были выявлены на шахтопластах от k_5 до p_1 , однако процентное содержание ацетилена было почти повсеместно выше в юго-восточных зонах, где оно достигало 2–3 % (в отдельных случаях 5 %) от общего количества низших углеводородов. На северо-западных крыльях доля неопредельных углеводородов обычно не превышала 1,0 %.

Системное площадное опробование основных рабочих пластов l_1 и m_3 на шахте им. А. Ф. Засядько подтвердило тенденцию максимального ацетиленопоявления в юго-восточных апофизах крупных надвиговых структур. Газоаналитическими исследованиями проб газов, десорбированных из угля, отобранного в пределах 16-й западной лавы пласта m_3 , установлена ацетиленонасыщенность углей в зоне апофизы № 4 в юго-западной части Ветковского надвига. Протяженность этой зоны от линии надвига составляла около 700 м при ширине 120 м. Наряду с ацетиленом во всех пробах были обнаружены также этилен (до 0,1 %) и пропилен (0,1–0,3 %). Вторая ацетиленонасыщенная зона была установлена в пределах 11-й и 12-й западных лав пласта l_1 . Протяженность этой зоны составляла 400 м при ширине 150–200 м.

На участках угольных пластов l_1 , m_3 и k_5 , примыкающих к северо-западной периферии Григорьевского надвига, в исследованных пробах десорбированного газа отмечалось присутствие этилена и пропилена, а ацетилен во всех пробах отсутствовал. На основании этого авторы сделали вывод, что северо-западные крылья Ветковского, Григорьевского и Первомайского надвигов насыщались комплексом низших углеводородов и неопредельными углеводородами, исключая ацетилен, а на юго-восточных крыльях массив насыщался и ацетиленом.

В ходе исследований [2, 5] установлено также, что этилен и пропилен сопутствуют ацетиленопоявлениям. При этом контуры распространения этилена и пропилена часто на 50–70 м превосходят контуры распространения ацетилена. Причины такого взаимоотношения параметров распространения неопредельных углеводородов в настоящее время не установлены.

До настоящего времени определение содержания ацетилена в рудничной атмосфере производилось в НИИ «Респиратор» исключительно с целью выявления в угольных шахтах стадий развития подземных пожаров. По их данным концентрация ацетилена в рудничной атмосфере при развитом подземном пожаре не превышает $1,9 \cdot 10^{-4}$ % и этилена $1,1 \cdot 10^{-2}$ %. При этом следует отметить, что пробы для этих анализов отбирались в основном в изолированных подземных пожарах без контроля времени обнажения массива и, следовательно, характеризуют

стационарное состояние рудничной атмосферы. При отсутствии подземного пожара такие данные соответствуют фоновым значениям содержания ацетилена в атмосфере выработки. Динамические процессы, при которых в атмосферу выработки происходят залповые выбросы различных газов, в том числе и ацетилена, можно обнаружить только в случае непрерывного контроля содержания этих газов.

Аномальные выделения газа в выработки имеют место при производстве взрывных работ, вскрытии угольных пластов, вскрытии тектонических нарушений, разрушении угля и вмещающих пород под действием горного давления, внедрении разведочных или дегазационных скважин в газонасыщенный массив и в других подобных случаях.

Как показали результаты исследований компонентного состава газов, выделяющихся в шпур и скважины, пробуренные по угольным пластам и вмещающим породам, концентрация гелия, водорода и тяжелых углеводородов в зонах тектонических нарушений может возрастать относительно их фоновых значений на два порядка. Если такое положение принять и для ацетилена, то можно ожидать содержание ацетилена в рудничной атмосфере при входе в аномальную зону в пределах $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1} \%$, а в зонах тектонических нарушений, связанных с разломами кристаллического фундамента, – и до 1,0 % [4, 5].

Все вышеизложенное послужило аргументацией для включения в систему УТАС датчика ацетилена. Для контроля содержания горючих газов в угольных шахтах в настоящее время широко используются датчики, основанные на теплоте термокаталитического сгорания (каталитического окисления горючего газа). Принцип работы такого датчика заключается в том, что на измерительном резисторе сенсора при сгорании газа происходит нагрев материала резистора (платины) и как следствие – изменение его удельной электропроводности (обратной величины электросопротивления). Изменение электросопротивления, которое пропорционально изменению концентрации газа, преобразуется в унифицированный сигнал в виде постоянного тока, изменяющегося в диапазоне от 4 до 20 мА. Термокаталитические датчики чувствительны к большинству горючих углеводородных газов, поэтому при необходимости измерять концентрацию конкретного углеводородного газа их следует калибровать на измеряемый газ. Эти датчики имеют также значительную перекрестную чувствительность, что затрудняет определение концентрации конкретного газа при небольшом его содержании в общем объеме газовой смеси. Для определения непредельных углеводородов (ацетилен, этилен) термокаталитические датчики имеют высокую перекрестную чувствительность к водороду и оксиду углерода [6]. Поскольку в зонах тектонических нарушений содержание водорода в атмосфере горной выработки может быть соизмеримым и даже превышать содержание ацетилена, то ошибка в определении последнего может быть весьма существенной. Кроме того, рудничная атмосфера, в которой должен работать датчик ацетилена, содержит горючий метан, концентрация которого на два порядка превышает ожидаемую концентрацию ацетилена. Следует также отметить, что измерения, основанные на принципе теплоты термокаталитического сгорания, являются неоднозначными еще и при высоких концентрациях газов, когда на сенсор поступает недостаточное количество кислорода, необходимого для процесса

окисления. А это может иметь место при аномальном выделении горючих газов в рудничную атмосферу.

Перечисленные недостатки, свойственные термокаталитическим датчикам, в значительно меньшей степени относятся к датчикам на оптико-абсорбционном принципе работы [7].

Действие инфракрасных датчиков основано на использовании инфракрасного излучения, не воспринимаемого глазом человека (длина волны от 0,77 мкм до 1 мм). Интенсивность инфракрасного излучения изменяется в зависимости от концентрации анализируемого газа. Твердотельный приемник воспринимает это излучение и преобразует в электрический сигнал, который затем обрабатывается микропроцессором и заносится в базу данных в соответствующих единицах концентрации примеси газа. Инфракрасные датчики способны определять ничтожные концентрации контролируемого газа и не имеют значительной перекрестной чувствительности.

Как следует из анализа измерений содержания ацетилена в угольных пластах и рудничном воздухе, и установленных закономерностей изменения компонентного состава газов в аномальных зонах, концентрация ацетилена в атмосфере горной выработки при вскрытии тектонических нарушений и производстве взрывных работ может изменяться от $1 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^{-1}$ % до 1,0 %. В связи с этим инфракрасные датчики должны обеспечивать диапазон измерений объемной доли ацетилена 0–1,0 %. В интервале диапазона измерений от 0 до $1 \cdot 10^{-1}$ % датчики должны обладать более высокой чувствительностью.

На основании вышеизложенного, а также учитывая, что УТАС представляет собой открытую систему, которую в случае необходимости можно доукомплектовывать новыми устройствами, «Петровский завод угольного машиностроения» внедрил в эту систему безопасности газоанализаторы (датчики) ТХ6363 с чувствительными инфракрасными элементами E2V IR14BD, калиброванными для определения ацетилена в диапазоне от 0 до 1,0 %.

Принимая во внимание, что ацетилен весьма склонен к реакциям присоединения и в свободном виде долго существовать не может, датчики ТХ6363 стационарной аппаратуры контроля содержания ацетилена с целью выявления аномальных по газовыделению зон должны устанавливаться:

- в призабойном пространстве тупиковой выработки, движущейся в направлении тектонического нарушения, – под кровлей на высоте, равной $\frac{2}{3}$ высоты выработки, на расстоянии от забоя не менее 3 м и не более 5 м, на стороне, противоположной вентиляционному трубопроводу;
- в местах бурения дегазационных скважин из подготовительных выработок – на высоте, равной $\frac{2}{3}$ высоты выработки, на расстоянии 2–3 м от устья скважины по ходу движения вентиляционной струи, на стороне расположения скважины;
- в подготовительных выработках в местах вскрытых разрывных тектонических нарушений – на высоте, равной $\frac{2}{3}$ высоты выработки, на расстоянии 2–3 м от плоскости сместителя по ходу движения вентиляционной струи, на стороне наибольшего раскрытия трещин в породном массиве.

При установке датчиков ацетилена необходимо исключать их размещение вблизи водораспылительных завес и систем орошения во избежание попадания воды на чувствительный элемент датчика.

Выводы. Использование в системе УТАС или в других системах безопасности датчиков ацетилена позволяет не только контролировать его содержание в атмосфере горных выработок, но и прогнозировать подход к зонам тектонических нарушений, являющихся коллекторами миграции горючих газов глубинного происхождения. Такая информация позволяет своевременно выполнять в опасных зонах необходимые профилактические мероприятия для повышения безопасности горных работ.

Список литературы / References

1. Волкова, Т. П. Влияние структурно-тектонического фактора на газоносность угольных пластов Донбасса / Т.П. Волкова, К.В. Репина, А.А. Петрова // Труды РАНМИ. – 2023. – №22 (37). – С. 164–173.

Volkova, T. P., Repina, K. V., Petrova, A. A. *Vliyanie strukturno-tektonicheskogo faktora na gazonosnost ugolnih plastov Donbassa* [The influence of the structural and tectonic factor on the gas content of the Donbass coal seams]. *The works of the RANIMI*. 2023, no. 22 (37), pp. 164-173. (In Russian)

2. Лобков, Н. И. Особенности формирования опасных геомеханических явлений в слоях пород и в угольных пластах / Н. И. Лобков, А. Г. Радченко // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2024. – №1 (86). – С. 91–106.

Lobkov, N. I., Radchenko, A. G. *Osobennosti formirovaniya opasnih geomechanicheskikh yavleniy v sloyah porod I v ugolnih plastah* [Features of the formation of dangerous geomechanical phenomena in rock layers and coal seams]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024, no.1 (86), pp. 91-106. (In Russian)

3. Особенности горно-геологических условий залегания угольных пластов основных бассейнов России / А. Б. Жабин, Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник, А. Цих // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2022. – № 1. – С. 250–260.

Zhabin, A. B., Linnik, Yu. N., Linnik, V. Yu., Tsihi, A. *Osobennosti gorno-geologicheskikh usloviy zaleganiya ugolnih plastov osnovnih basseynov Rossii* [Features of the mining and geological conditions of the coal seams of the main basins of Russia]. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*, 2022, no. 1, pp. 250-260. (In Russian)

4. Определение температурных границ стадий самовозгорания угля / С.Б. Алиев [и др.] // Уголь. – 2022. – № 9 (1158). – С. 61–66.

Aliev, S. B., Hodzhaev, R. R., Kenzhin, B. M., Smirnov, Yu. N., Grechishkin, P. V., Asainov, S. T. *Opreделение temperaturnih granic stadiy samovozgoraniya uglya* [Determination of the temperature limits of the stages of spontaneous combustion of coal]. *Coal*. 2022, no. 9 (1158), pp. 61-66 (In Russian)

5. Обзор методов идентификации процессов самовозгорания углей / С. А. Суксова, Ю. В. Тимофеева, А. А. Долкан, Е. В. Попов // Вестник Евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 1–9.

Suksova, S. A., Timofeeva, Yu. V., Dolkan, A. A., Popov, E. V. *Obzor metodov identifikatsii processov samovozgoraniya ugley* [An overview of methods for identifying spontaneous combustion of coals]. *Bulletin of Eurasian Science*, 2022, vol.13, no. 1, pp. 1-9. (In Russian)

6. Авдеев, Л. А. Исследование эксплуатационных характеристик автоматизированной системы контроля рудничной атмосферы / Л. А. Авдеев, Р. Р. Имаева // Автоматика. Информатика. Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова. – 2020. – №1. – С. 36–39.

Avdeev, L. A., Imaeva, R. R. *Issledovanie ekspluatatsionnih harakteristik avtomatizirovannoy sistemi kontrolya rudnichnoy atmosfery* [Investigation of the operational characteristics of an automated mine atmosphere monitoring system]. *Automation. Computer science. Karaganda Technical University named after Abylka Saginov*. 2020, no.1, pp. 36-39. (In Russian)

7. Совершенствование технических средств автоматического газового контроля в выработках подземных сооружений / В. В. Смирняков, А. Ф. Романов, М. М. Попов, Д. С. Пекарчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2017. – № S5-1. – С. 214–221.

Smirnyakov, V. V., Romanov, A. F., Popov, M. M., Pekarchuk, D. S. *Sovershenstvovanie tehnikeskikh sredstv avtomaticheskogo gazovogo kontrolya v virabotkakh podzemnih sooruzheniy* [Improvement of the technical means of automatic gas control in the workings of underground structures]. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2017, no. S5-1, pp. 214-221. (In Russian)

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

Дата поступления рукописи 29.05.2025

Дата опубликования 19.06.2025

Vladimir Alekseyevich Kanin, Dr. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: vlkanin2@yandex.ru;

Yury Anatolyevich Piven, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: piven22@internet.ru

Federal State Budget Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying»

83001, Donetsk, Chelyuskintsev st., 291. Phone: +7 (949) 368-06-21

AUTOMATED MONITORING OF EXPLOSIVE UNSATURATED HYDROCARBONS IN THE MINE ATMOSPHERE

The objective. To establish the necessity and possibility of automated control of the content of explosive unsaturated hydrocarbons in the mine atmosphere.

Methods. To establish the necessity and possibility of automated control of the content of explosive unsaturated hydrocarbons in the mine atmosphere.

Results. Solutions have been obtained to a range of issues related to the establishment of migration routes into the mine workings of unsaturated hydrocarbons, their ignition, which initiates an explosion of a methane-air mixture, and the selection and testing of an effective communication and information system and sensors in mine conditions for automated monitoring of the content of unsaturated hydrocarbons in the mine atmosphere.

Scientific novelty. Substantiation of the forecast criteria necessary for monitoring the acetylene content in the mine atmosphere.

Practical significance. It was established that the zones of anomalous gas saturation of the mountain massif are formed in the zones of influence of the faults of the crystalline basement, along which there is a continuous migration of hydrocarbons of thermogenic and endogenous genesis.

Key words: *unsaturated hydrocarbons in the mine atmosphere; acetylene explosion hazard; gas analyzers; sensitive infrared elements; mine atmosphere; automated control.*

For citation: Kanyn V. A., Pyven Yu. A. Automated monitoring of explosive unsaturated hydrocarbons in the mine atmosphere. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 20-27. EDN FYTITM

УДК [614.841.332:620.197.6]:001.891.53

Виктория Валентиновна Лебедева, нач. отд.; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-55

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Цель. Оценка огнезащитных свойств покрытия деревянных и металлических конструкций путем установления зависимостей степени влияния внешних факторов на изменение параметров коксового остатка.

Методы. Анализ, обобщение и статистическая обработка экспериментальных данных; стандартные и лабораторные методы испытаний, графический метод представления результатов.

Результаты. Разработана рецептура огнезащитного покрытия, определены параметры кокса, образующегося в результате нагрева и вспучивания покрытия. Установлены аналитические зависимости изменения кратности вспучивания, потери массы, плотности и пористости вспененного кокса от температуры нагрева огнезащитного покрытия без и после воздействия воды, влажности, а также переменного воздействия температуры и влажности при коэффициенте корреляции 0,80...0,93.

Научная новизна. Впервые установлены зависимости влияния воды, переменного воздействия температуры и влажности на изменение параметров кокса, образующегося в процессе нагревания огнезащитного покрытия в диапазоне температур 127...670 °С, позволившие оценить степень влияния внешних факторов на изменение огнезащитных свойств покрытия.

Практическая значимость. В комплекс обязательных характеристик огнезащитных покрытий, стойких к воздействию внешних факторов, должны входить параметры вспучивания и сохранности слоя, что позволит в полной мере оценить сохранение (изменение) огнезащитных свойств покрытия с учетом динамики их изменения и период эффективности огнезащиты конструкции.

Ключевые слова: коксовый остаток; критерий оценки сохранения эффективности огнезащитного покрытия; огнестойкость строительных конструкций; огнезащитное покрытие вспучивающегося типа; параметры вспененного кокса; сохранение огнезащитных свойств.

Для цитирования: Лебедева В. В. Оценка устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию внешних факторов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 28–34. EDN XHFNJY

Постановка проблемы. Результаты анализа частоты пожаров на территории Российской Федерации за 2023–2024 гг. позволяют сделать вывод о большом числе пожаров в зданиях и сооружениях, и связанных с этим высокими показателями гибели и травмирования людей (рис. 1). В связи с этим мероприятия по профилактике возникновения и развития пожаров остаются значимыми. Особую актуальность приобретают вопросы повышения пределов огнестойкости деревянных и металлических конструкций с применением высокоэффективных тонкослойных покрытий вспучивающегося типа.

Принцип огнезащитного действия таких покрытий заключается в защите конструкции за счет термолитического образования на поверхности карбонизированного вспученного слоя низкой теплопроводности. В условиях пожара высокие пределы огнестойкости конструкций обеспечивают безопасность личному составу спасательных формирований и дополнительное время для эвакуации людей, а также проведения мероприятий по тушению пожара.

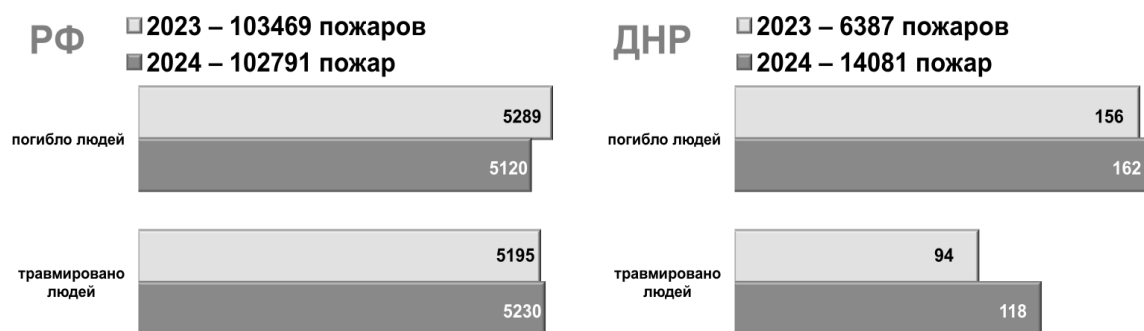


Рис. 1. Количество погибших и травмированных при пожарах в зданиях и сооружениях

В настоящее время существует проблема, связанная с низкой степенью достоверности прогноза качества огнезащиты конструкций, не только в условиях пожара, но и в процессе их длительной эксплуатации. Для научного обоснования целесообразности использования покрытия в зависимости от условий его эксплуатации необходима оценка параметров устойчивости огнезащитных покрытий к воздействию внешних факторов.

Цель исследования. Оценка огнезащитных свойств покрытия деревянных и металлических конструкций путем установления зависимостей степени влияния внешних факторов на изменение параметров коксового остатка.

Анализ последних исследований и публикаций. Сохранение огнезащитных свойств в процессе эксплуатации покрытий в основном оценивают методами термического анализа и огнезащитной эффективности. Результаты исследований [1–4] свидетельствуют о необратимых физико-химических процессах в поверхностном слое образцов огнезащитных покрытий под воздействием внешних факторов и, как следствие, снижении со временем их огнезащитных свойств. Авторами работы [5] проведены испытания по оценке огнезащитной эффективности, на основании результатов которых установлено, что с увеличением количества циклов искусственного старения огнезащитные свойства образцов покрытий на стальных пластинах снижаются.

Методы термического анализа и огнезащитной эффективности позволяют провести оценку устойчивости огнезащитных покрытий к воздействию внешних факторов по ряду количественных критериев. К таким оценочным критериям относят: потерю массы при нагреве, зольный остаток, температуру при потере массы (по термогравиметрическим кривым); температуру максимума скорости потери массы и максимальную скорость потери массы (по дифференциальным термогравиметрическим кривым); время достижения металлом испытанного образца предельного состояния – температуры, равной 500 °С, изменение температуры в печи и на необогреваемой поверхности испытанного образца [5]. При этом не учитывают изменение параметров, влияющих на сохранение огнезащитных свойств покрытий – коэффициент вспучивания, плотность и пористость вспененного кокса.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования по оценке огнезащитной эффективности выбрано покрытие вспучивающегося типа на основе хлорсодержащего связующего [6]. Параметрами устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию внешних факторов служили изменение кратности вспучивания, массы, плотности и пористости вспененного кокса в процессе нагревания образцов [7].

Изменение кратности вспучивания δ и массы $\overline{m}$ образцов покрытия при нагревании рассчитаны по формулам (1) и (2)

$$\delta = \frac{h - h_0}{h_0}, \quad (1)$$

где h – высота образца после нагрева, м;

h_0 – исходная толщина образца, м.

$$\overline{m} = \frac{m}{m_0}, \quad (2)$$

где m – масса образца после нагрева, кг;

m_0 – первоначальная масса образца, кг.

Для расчета плотности ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, вспененного кокса использована формула (3), пористости φ – формула (4):

$$\rho = \frac{\rho_0 \overline{m}}{1 + \delta}, \quad (3)$$

где ρ_0 – начальная плотность покрытия, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

$$\varphi = 1 - \frac{\overline{m}}{1 + \delta}, \quad (4)$$

При определении φ по формуле (4) полагали, что этот показатель обусловлен только $\overline{m}$ и δ материала огнезащитного покрытия.

Экспериментальные исследования были выполнены в четыре этапа (рис. 2).

Результаты исследований. Направление исследований в настоящей работе касается только огнезащитных покрытий для противопожарной защиты деревянных и металлических конструкций, находящихся в статическом состоянии. Поэтому влияние механических колебаний, вибраций и нагрузок на огнезащитную эффективность покрытия не рассматривали.

Результаты экспериментальных исследований по оценке устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию внешних факторов графически представлены на рис. 3–6. Зависимости изменения параметров коксового остатка от температуры нагрева опытных образцов огнезащитного покрытия интерполированы линейными уравнениями с коэффициентом корреляции, значения которого находятся в диапазоне 0,80...0,93.

Процесс вспучивания покрытия без воздействия и после воздействия внешних факторов включает две стадии (рис. 3). Первой стадии соответствует диапазон температуры 400...550 К, второй – 550...650 К. Далее графики стабилизируются и показатели вспучивания приобретают устойчивый характер, практически не меняясь в интервале 32...40 единиц. Высота первого стабильного участка составляет примерно 8...14 единиц, что является определенным преимуществом состава огнезащитного покрытия, так как при низких температурах сильнее блокируется процесс теплопереноса. Начало интенсивного вспучивания опытных образцов наблюдается при температуре 550 К, что подтверждает эффективность огнезащиты.

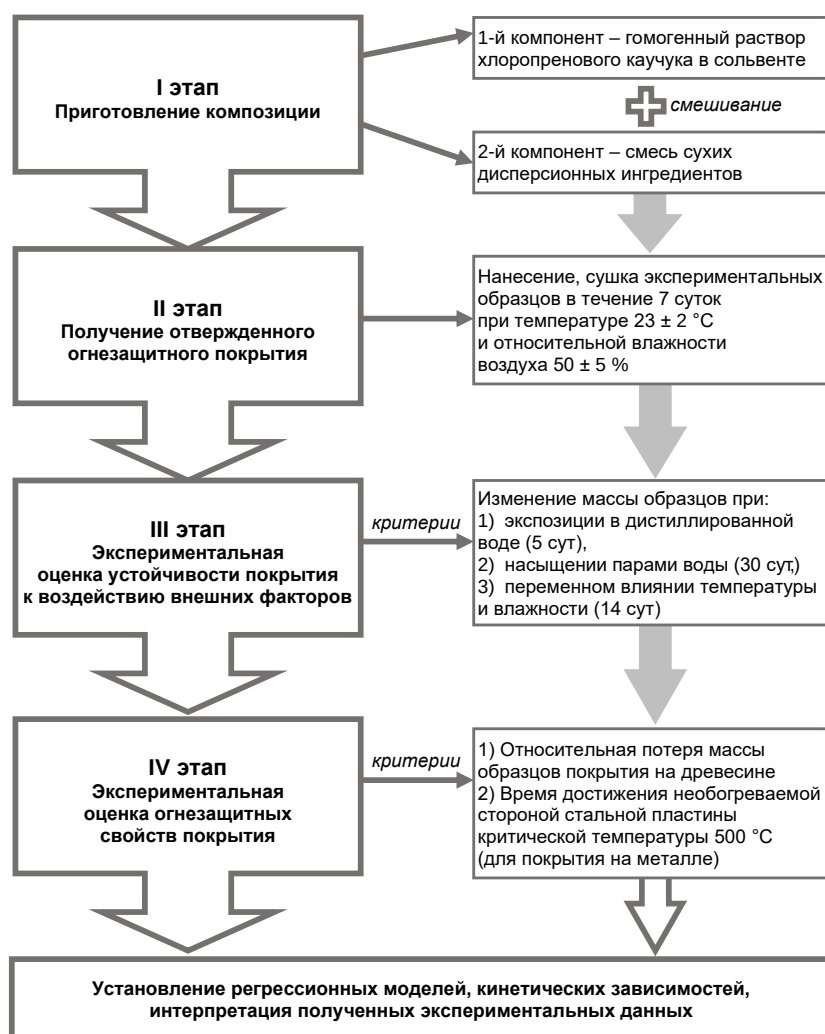
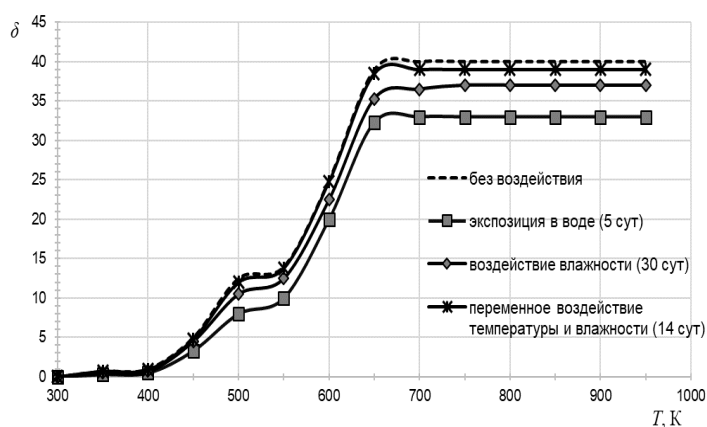


Рис. 2. Блок-схема алгоритма экспериментальных исследований

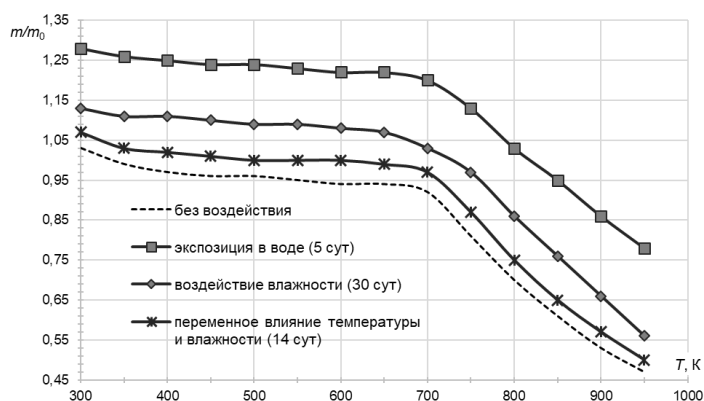


Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции
$\delta = 24,755 + 0,0781T$	0,93
$\delta = 21,625 + 0,00657T$	
$\delta = 23,44 + 0,0727T$	
$\delta = 24,126 + 0,0763T$	

Рис. 3. Результаты исследований изменения кратности вспучивания от температуры нагрева огнезащитного покрытия

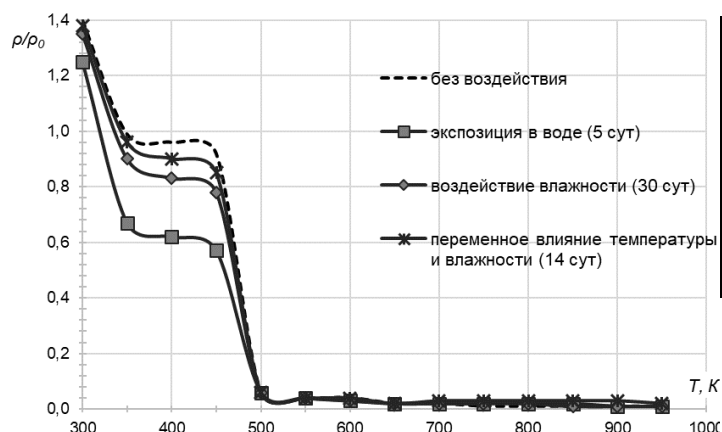
Графики изменения массы от температуры нагрева образцов огнезащитного покрытия без и после воздействия внешних факторов, практически, совпадают (рис. 4). Значительное изменение массы опытных образцов происходит в диапазоне температуры 700...950 K, при этом конечные значения изменения массы кокса составляют 0,47...0,78 единиц.

С ростом температуры нагрева образцов огнезащитного покрытия плотность образующегося кокса уменьшается (рис. 5). В диапазоне температуры 750...950 К процесс структурирования кокса прекращается, что свидетельствует о генерировании стабильного и стойкого изолирующего вспученного слоя покрытия, определяющего в значительной степени уровень его огнезащитной эффективности.



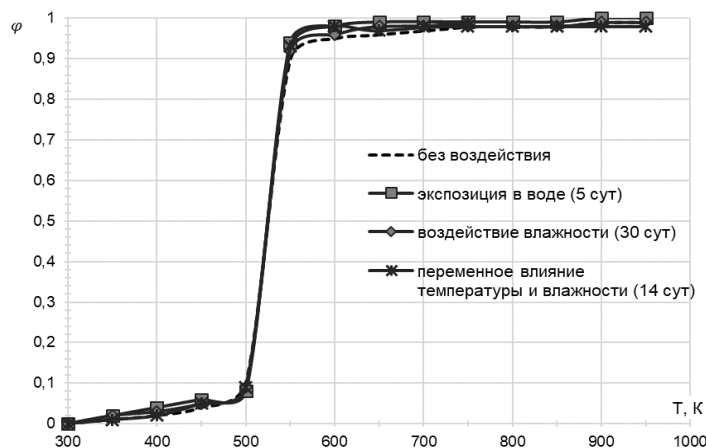
Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции
$m/m_0 = 1,3323 - 0,0008T$	0,91
$m/m_0 = 1,5666 - 0,0007T$	0,88
$m/m_0 = 1,4668 - 0,0008T$	0,88
$m/m_0 = 1,3925 - 0,0008T$	0,88

Рис. 4. Результаты исследований изменения массы от температуры нагрева огнезащитного покрытия



Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции
$\rho/\rho_0 = 1,5331 - 0,0019T$	0,81
$\rho/\rho_0 = 1,1438 - 0,0014T$	0,80
$\rho/\rho_0 = 1,3967 - 0,0018T$	0,81
$\rho/\rho_0 = 1,4608 - 0,0018T$	0,80

Рис. 5. Результаты исследований изменения плотности от температуры нагрева огнезащитного покрытия



Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции
$\varphi = 0,5553 + 0,0019T$	0,85
$\varphi = 0,5551 + 0,0019T$	0,86
$\varphi = 0,5545 + 0,0019T$	0,85
$\varphi = 1,5550 + 0,0019T$	0,86

Рис. 6. Результаты исследований изменения пористости от температуры нагрева огнезащитного покрытия

Графики зависимости изменения пористости кокса от температуры нагрева образцов покрытия без воздействия и после воздействия внешних факторов совпадают (рис. 6). С увеличением температуры нагрева образцов в диапазоне 500...700 К и кратности вспучивания покрытия в интервале 12...40 единиц пористость кокса увеличилась в 10,8 раза. В интервале температуры 750...950 К изменения пористости кокса не наблюдается. Этот факт подтверждает результаты предыдущих экспериментов относительно формирования устойчивого вспученного слоя покрытия, что является важным условием обеспечения его высоких огнезащитных свойств.

Вывод. Установлены зависимости, характеризующие степень воздействия внешних факторов на параметры коксового остатка разработанного огнезащитного покрытия – коэффициент вспучивания, изменение массы, плотности и пористости. Показана принципиальная возможность определения параметров вспененного кокса в качестве комплексного критерия оценки сохранения эффективности огнезащитных покрытий вспучивающегося типа в период эксплуатации конструкции.

Список литературы / References

1. Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии / М. Ю. Умрихина [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 5. – С. 60–70. DOI : 10.22227/PVB. 2020.29.05.60-70.

Umrikhina, M. Yu., Shorokhova, T. O., Pyankova, L. A., Kudryavtsev, A. A., Utkin, S. V. [Using scanning electron microscopy, x-ray diffraction and IR spectroscopy to study the ageing of intumescent fire re-proof coatings]. Fire and Explosion Safety, 2020, no. 29 (5), pp. 60-70. (In Russian)

2. Wang, Ji, Zhao, Min. Study on the effects of aging by accelerated weathering on the intumescent fire retardant coating for steel elements. Engineering Failure Analysis. 118(4), 2020. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104920> (accessed 02.12.2024). (In English)

3. Sabee Mohd Meer Saddiq bin Mohd, Itam Zarina, Beddu Salmia, Zahari Nazirul Mubin. Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers. Polymers 2022,14, 2911. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14142911> (accessed 02.12.2024). (In English)

4. Головина, Е. В. Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны / Е. В. Головина, А. В. Калач // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 6. – С. 5–12. DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12

Golovina, E. V., Kalach, A. V. [Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in climatic conditions of the Arctic zone]. Fire and Explosion Safety. 2023; no. 32 (6), pp. 5-12. (In Russian)

5. Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении / М. А. Комарова [и др.] // Техносферная безопасность. – 2024. – № 4 (45). – С. 3–22.

Komarova, M. A., Mel'nikov, N. O., Shalabin, M. V., Skorobogatov, V. A., Golovina, Ye. V. [Fire-resistant effectiveness of coatings of metal building structures with accelerated climatic aging]. Technosphere safety. 2024; no. 4 (45), pp. 3-22. (In Russian)

6. Долженков, А. Ф. Критерии оценки огнезащитных свойств композиции на основе хлорсодержащего связующего / А. Ф. Долженков, В. В. Лебедева // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3 (67). – С. 60–66. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-60-66.

Dolzhenkov, A. F., Lebedeva, V. V. [Criteria for evaluating the fire-proof properties of composition based on chlorine-containing binding agent]. Problems of risk management in the technosphere. 2023; no. 3 (67), pp. 60-66. (In Russian)

7. Лебедева, В. В. Количественные параметры вспучивания огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука / В. В. Лебедева // Научный вестник НИИ Респиратор. – 2023. – № 1 (60). – С. 90–97.

Lebedeva, V. V. *Kolichestvennyye parametry vspuchivaniya ognezashchitnogo pokrytiya na osnove khloroprenovogo kauchuka* [Quantitative Parameters of Intumescence of Chloroprene Rubber-Based Flame-Retardant Coating]. Scientific bulletin of the NII “Respirator”. 2023; no. 1 (60), pp. 90-97. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым

Дата поступления рукописи 12.02.2025

Дата опубликования 19.06.2025

*Victoria Valentinovna Lebedeva, Head of Department; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru;
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 332-78-44*

ASSESSMENT OF FIRE PROTECTION COATING RESISTANCE TO EXTERNAL FACTORS

Objective. Evaluate the fire protection properties of coatings of wooden and metal structures by establishing dependencies of the external factors influence degree on changes in the coke residue parameters.

Methods. Analysis, generalization and statistical processing of experimental data; standard and laboratory testing methods, graphical method of presenting results.

Results. Fire-protective coating formulation has been developed, and coke parameters formed as a result of coating heating and swelling have been determined. Analytical dependencies have been established for changes in swelling ratio, mass loss, density and porosity of foamed coke on heating temperature of fire-protective coating without and after exposure to water, humidity, as well as variable exposure to temperature and humidity with correlation coefficient of 0.80...0.93.

Scientific novelty. For the first time, dependences of influence of water, variable effects of temperature and humidity on change in coke parameters formed during the fire-protective coating heating in the temperature range of 127...670 °C have been established, which made it possible to assess the degree of external factors influence on the coating fire-protective properties change.

Practical significance. Set of mandatory characteristics of fire-protective coatings resistant to external factors must include parameters of swelling and preservation of the layer, which will allow a full assessment of the preservation (change) of the coating fire-protective properties, taking into account the dynamics of their change and the period of effectiveness of fire protection of the structure.

Keywords: coke residue; criterion for assessing the preservation of fire protection coating efficiency; building structures fire resistance; swollen fire protection coating; foamed coke parameters; preservation of fire protection properties.

For citation: Lebedeva V. V. Assessment of fire protection coating resistance to external factors. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 28-34. EDN XHFNJY

II. Безопасность труда

УДК [622.33:553.93/.94]:622.81/83

Эльвира Николаевна Филатьева, канд. техн. наук, доцент кафедры;

e-mail: Elafilatyeva@gmail.com

Александр Тимофеевич Павленко, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры;

e-mail: pavlenko1901@yandex.ru

Михаил Владимирович Филатьев, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры;

e-mail: Mfilatev@gmail.com

Александр Васильевич Красногрудов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры;

e-mail: krasnogrudov@mail.ru

Владимир Юрьевич Малкин, д-р экон. наук, доцент, 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, 20-а. Тел.: +7 (959) 111-29-45

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УГЛЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СВОЙСТВ ШАХТОПЛАСТОВ

Цель. Исследование процессов углеобразования для научного обоснования прогнозирования возникновения и проявления опасных свойств конкретных шахтопластов при ведении горных работ.

Методы. Исследование базируется на современных представлениях о процессах углеобразования. Для подтверждения или установления несоответствия процессов, происходивших на разных стадиях углеобразования привлечены экспериментальные данные справочно-нормативных документов. Статистическая обработка экспериментальных данных позволяет установить изменение элементного состава органической или горючей массы на разных стадиях метаморфических преобразований шахтопластов.

Результаты проведенных исследований позволили разработать научно обоснованные предложения по уточнению общей схемы углеобразования.

Научная новизна состоит в возможности формирования опасных свойств угольных шахтопластов не только на стадии метаморфических преобразований, а их возникновение генетически связано в значительной степени с предыдущими процессами накопления исходного материала, который подвергался последовательному преобразованию на торфяной, бурогоугольной, каменноугольной или антрацитовых стадиях углеобразования.

Практическая значимость. Результаты проведенных аналитических исследований могут быть использованы для решения ряда актуальных научных задач по совершенствованию нормативной базы безопасного ведения горных работ и предупреждению аварийных ситуаций.

Ключевые слова: угольные шахтопласты; опасные свойства; процессы; углеобразование; стадии; нормативная база; безопасность; усовершенствование; проблемы.

Для цитирования: Филатьева Э. Н., Павленко А. Т., Филатьев М. В., Красногрудов А. В., Малкин В. Ю. Актуальные проблемы исследования процессов углеобразования и проявления опасных свойств шахтопластов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 35–44. EDN WFEGEW

Постановка проблемы. Опасные свойства угольных шахтопластов при ведении горных работ (выделение легковоспламеняющихся и склонных к взрывчатости газов, внезапные выбросы угля и газа, возникновение очагов эндогенных пожаров, повышенное образование пыли и её взрывчатость, и некоторые другие особенности) в современных нормативных документах рассматривают в зависимости от степени

метаморфических преобразований углей. В качестве одного из основных показателей степени метаморфизма и, в большинстве случаев единственного, принят выход летучих веществ (массовый или объёмный) при термическом разложении углей без доступа воздуха [1, 2]. Согласно официально принятому определению¹ под метаморфизмом подразумевают последовательное превращение бурого угля в каменный уголь и антрацит в результате изменения химического состава, структуры и физических свойств в недрах Земли преимущественно под влиянием повышенного давления и температуры.

Использование одного классификационного показателя в нормативных документах по безопасному ведению горных работ² для одновременной характеристики состава, структуры, химических и физико-механических особенностей углей с целью прогноза опасных свойств шахтопластов не соответствует общепринятому определению метаморфизма по нескольким причинам:

- один показатель, даже самый универсальный, не может однозначно и всесторонне характеризовать всё многообразие проявления опасных свойств шахтопластов, существенно отличающихся между собой по природе разных причин своего возникновения;

- выход летучих веществ при термической деструкции непосредственно не характеризует элементный состав и физико-механические свойства углей.

Кроме указанных недостатков имеются несоответствия по температурному режиму между метаморфическими преобразованиями шахтопластов в природных условиях и температурой определения выхода летучих веществ в лабораторных условиях. Согласно общепринятым методикам и в соответствии с ГОСТ^{3,4}, массовый (V^{daf}) или объёмный (V_v^{daf}) выход летучих веществ определяют при температуре 850 или 900 °С, что значительно выше температуры образования каменных углей (345–500 °С) и антрацитов (350–600 °С) [3]. В рассматриваемом случае для установления степени метаморфических преобразований шахтопластов используют показатели процессов термической деструкции углей, которые в природных условиях не происходили. По этой причине не может быть гарантирована высокая достоверность прогноза опасных свойств шахтопластов с использованием показателей V^{daf} или V_v^{daf} , так как качественный и количественный состав газов, получаемых при термическом разложении углей, существенно зависит от температуры [4].

Кроме смеси газов, опасные свойства шахтопластов также могут определяться, в значительной мере, элементным составом углей и их физико-механическим состоянием. Так, например, вероятность возникновения очагов эндогенных пожаров связана с содержанием серы [5] и влаги [6], а микро- и макропористые структуры определяют газоносность и влажность углей [7].

¹ ГОСТ 17070-2014. Межгосударственный стандарт. Угли. Термины и определения Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2015. – 17 с.

² Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8.12.2020 № 506 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт»

³ ГОСТ 7303-90 (ст. СЭВ 6768-89). Антрацит. Метод определения объёмного выхода летучих веществ. Издание официальное. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 7 с.

⁴ ГОСТ 6382-2001 (ИСО 0562-98, ИСО 5071-1-97) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. Издание официальное. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 2001. – 12 с.

Научная новизна исследования заключается в том, что оно открывает возможность понимания формирования опасных свойств угольных пластов не только на этапе метаморфических изменений. Установлено, что их возникновение в значительной степени генетически связано с предыдущими процессами накопления исходного материала, который подвергался последовательному преобразованию на торфяной, буроугольной, каменноугольной или антрацитовых стадиях углеобразования.

Цель. Исследование процессов углеобразования для научного обоснования прогнозирования возникновения и проявления опасных свойств конкретных шахтопластов при ведении горных работ.

Методика исследования базируется на современных представлениях о процессах углеобразования, схема которых разработана академиком И. И. Аммосовым (рис.) [8]. Для подтверждения или установления несоответствия процессов, происходивших на разных стадиях углеобразования согласно указанной схемы, привлечены экспериментальные данные справочно-нормативных документов [9, 10]. В геолого-углехимической карте Донецкого бассейна [9] приведены сведения о составе органической массы углей, выходе летучих веществ при термическом их разложении и составе выделившихся газов. На основе результатов технического и элементного анализа углей Донецкого и Львовско-Волинского бассейнов, обобщены данные о качестве углей для большинства шахтопластов этих месторождений [10]. Статистическая обработка экспериментальных данных позволяет установить изменение элементного состава органической или горючей массы на разных стадиях метаморфических преобразований шахтопластов [9, 10].

Изменение соотношения между основными компонентами органической (горючей) массы на разных стадиях метаморфизма свидетельствует о возможном участии каждого компонента в образовании и выделении флюидов в виде соответствующих газов или влаги. Газообразные и жидкие продукты метаморфизма углистых веществ, в силу особенностей их физического состояния в основной части удаляются, и лишь твёрдые остаточные продукты полностью сохраняются в месте первоначального залегания. Точная количественная характеристика возможна только для остаточных продуктов, а баланс всей суммы веществ и характеристика удалившихся газообразных и жидких продуктов могут быть получены лишь косвенными путями [11]. Такие особенности изменения компонентов органической (горючей) массы, образование флюидов и возможное их удаление учитывали при рассмотрении общей схемы углеобразования (рис.).

Исследования непосредственно затрагивают геологические процессы углеобразования, которые происходят на протяжении нескольких сотен лет, по этой причине следует принимать во внимание всю имеющуюся литературу, включая нормативные документы за последние десятилетия. Это подтверждает, что данная информация не имеет срока давности и не может устареть.

Основной материал и полученные результаты. От времени разработки общей схемы углеобразования прошло несколько десятилетий. За этот период появилась дополнительная научно обоснованная информация, которая позволила внести некоторые существенные корректировки о протекании процессов, происходивших в прошедшие геологические периоды. Дополнительное рассмотрение таких изменений, внесённых в общую схему углеобразования, оказало значительное

влияние на общие представления о формировании опасных свойств шахтопластов на всех стадиях.

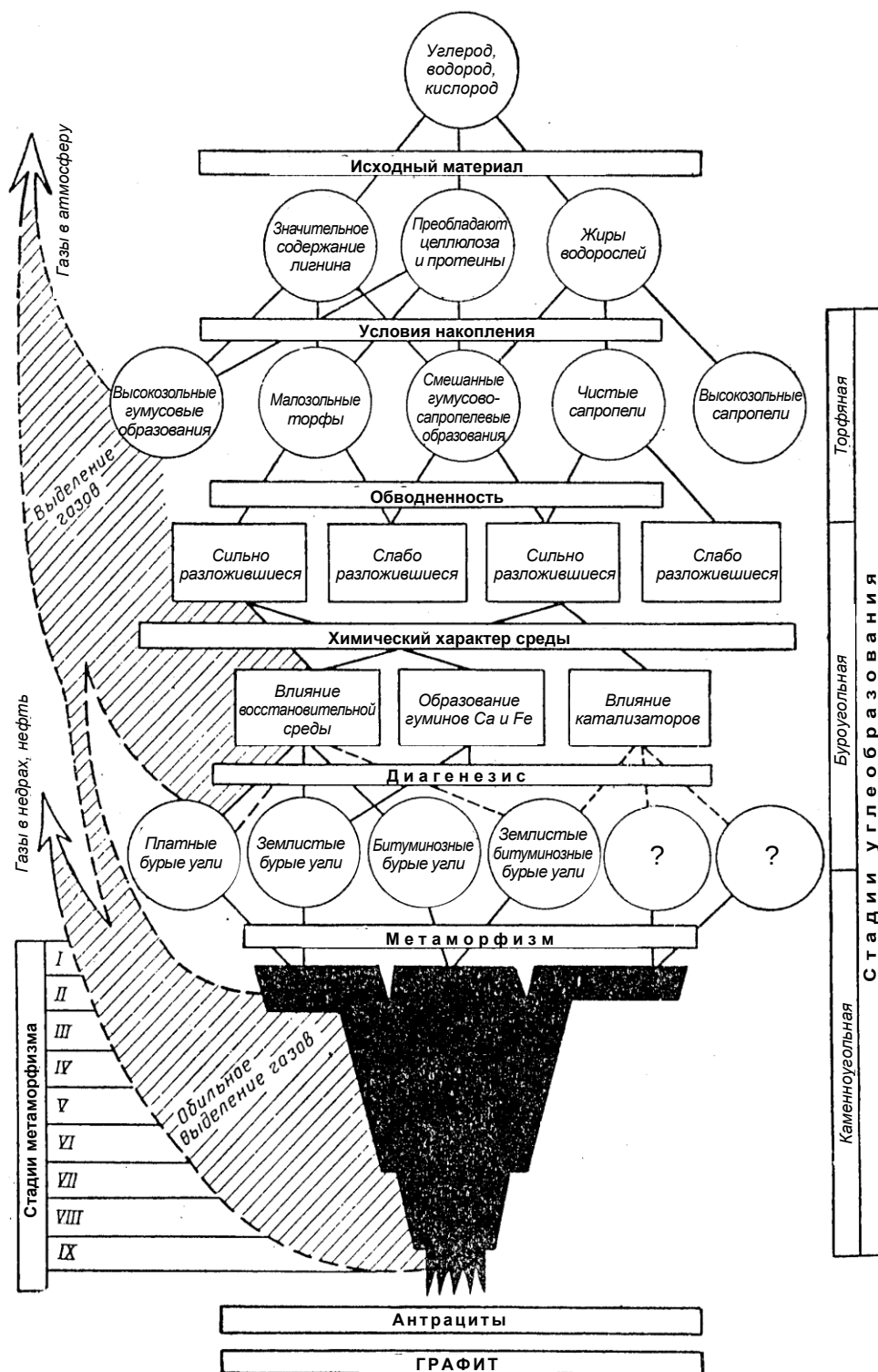


Рис. Схема процесса углеобразования по И. И. Аммосову [8]

Основная суть необходимых корректировок вызвана, в первую очередь, несоответствием количества исходных основных компонентов органической (горючей) массы. В рассматриваемой схеме (см. рис.) состав исходного материала представлен только тремя элементами — углеродом, водородом и кислородом.

Согласно экспериментальным данным [4, 10] в состав основных компонентов органической (горючей) массы также входят органическая сера и азот. Общая сумма пяти основных компонентов органической (горючей) массы (углерод, кислород, водород, азот и органическая сера), как правило, составляет около 99 %.

По этой причине в справочно-нормативных изданиях по качеству углей [10, 11] доля пяти основных компонентов горючей части топлива условно, учитывая незначительную возможную погрешность (около 1,0 %), принята равной 100 %. Приведенные данные указывают на то, что соотношения между пятью основными компонентами органической (горючей) массы изначально генетически обусловлены составом исходного материала. Соотношения между содержанием основных компонентов органической (горючей) массы для любого рассматриваемого шахтопласта являются строго индивидуальными с присущими только ему отличительными особенностями по элементному составу.

Содержание одного из пяти основных компонентов однозначно определяет сумму остальных четырёх, и в конечном итоге, оказывает влияние на соотношения между ними. Вследствие такой генетической взаимозависимости между содержанием основных компонентов органической (горючей) массы, каждый из них, в определённой мере, может влиять на возникновение опасных свойств шахтопласта по фактору соотношения между компонентами элементного состава. Процессы углеобразования последовательно проходили торфяную, буроугольную, каменноугольную и антрацитовые стадии (рис.).

Торфяная стадия характеризуется условиями накопления исходного органического вещества, обводнёностью и химическим составом среды. На этой стадии происходили окислительные процессы разложения под действием атмосферного кислорода, а также кислорода, растворённого в верхнем слое торфяных вод и анаэробных бактерий. В этот период происходило также накопление растительного вещества и его подготовка в ходе окислительного разложения к превращению в различные генетические типы ископаемых углей. Наблюдения за современными торфяными залежами и эмиссией «тепличных газов» показывают, что по мере роста толщины торфяного пласта заметную роль играет анаэробное разложение органического вещества. В результате деятельности метаногенных бактерий образуются метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2), которые выделяются в атмосферу.

При переходе от торфа к бурым углям главными отличительными признаками являются только содержание влаги и кислорода. В торфе содержание влаги составляет около 75 %, в бурых углях – 60 % и менее. Кислорода, соответственно, 31–40 % и 18–26 %. Это свидетельствует о том, что степень преобразования при переходе от бурых углей к каменным, связана, в основном, с количеством удалённой влаги и кислорода из бурых углей под воздействием внешних условий. При воздействии на бурый уголь факторов, присущих метаморфическим преобразованиям (давление, температура и период времени), он теряет до 90 % влаги и начинает приобретать присущие каменным углям качества (спекаемость, коксуемость, выход смолы и т. д.). Процессы, определяющие торфяную стадию углеобразования связаны, в большей части, с удалением влаги и разложением исходного материала с образованием газов.

Образование воды на торфяной и буроугольной стадиях не происходило, так как геологические преобразования исходного вещества на стадиях диагенеза

заклучались только в её удалении. Аналогичные процессы только удаления влаги продолжались на каменноугольной стадии, которая относится к метаморфическим преобразованиям.

Содержание влаги во многом определяет опасные свойства шахтопластов. При их прогнозировании необходимо учитывать установленный факт только удаления влаги, без её дополнительного образования, на торфяной, буроугольной и каменноугольной стадиях. Степень преобразования исходного вещества на этих стадиях во многом определяется количеством удалённой влаги. Исходя из постоянства соотношения между содержанием водорода и углерода на каменноугольной стадии практически исключено дополнительное образование и выделение влаги. Протекание таких процессов возможно только на антрацитовых стадиях. На высокую вероятность протекания процессов образования воды в природных условиях на антрацитовых стадиях указывает факт выделения и удаления гидратной влаги из алюмосиликатов (глин), оксидов и гидроксидов железа (гепатитов) при температуре 500 °С в лабораторных условиях при озолении угля [3, 4].

Следует отметить, что буроугольная стадия связана с дальнейшим разложением растительных остатков и протекала она в торфянике на глубине, недоступной атмосферному кислороду, при участии анаэробных бактерий. Этот период рассматривают как стадию формирования осадочной породы (раннего диагенеза или сингенеза) с взаимодействием составных частей осадка между собой и с окружающей их средой, стремящихся к установлению между ними равновесия [9]. Ориентировочно эти процессы происходили при температуре 100–200 °С. При такой температуре термического разложения углей без доступа воздуха испаряется влага и удаляются аккомодированные, поглощённые углями газы [3]. Согласно разработанной академиком И. И. Аммосовым схеме все газы, образованные на стадии диагенеза, выделялись в атмосферу. Это в некоторой степени противоречит протеканию буроугольной стадии на недоступных атмосферному кислороду глубинах и свидетельствует о возможном сохранении части этих газов, преимущественно CH_4 и CO_2 , в системе и их участия в последующих процессах углеобразования.

Сохранившиеся доли метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2) оказывали влияние на формирование опасных свойств шахтопластов на следующих каменноугольной и антрацитовой стадиях. Образование дополнительного количества метана на каменноугольной стадии полностью исключено, так как при одностороннем росте содержания углерода (до 88 %) в горючей (органической) массе содержание водорода оставалось практически постоянным на уровне 4,5–5,5 %. При содержании углерода более 88 % образование некоторой дополнительной доли метана под воздействием высокой температуры (до 550 °С) возможно только на антрацитовых стадиях, о чём свидетельствует резкое сокращение водорода в горючей (органической) массе.

В значительной мере газоносность угольных шахтопластов и их опасные свойства определяются количеством метана, образовавшегося на буроугольной стадии и сохранившейся его части на последующих каменноугольной и антрацитовых стадиях. Количество сохранившейся части метана определяется индивидуальной геологической историей каждого шахтопласта и условиями его последующих метаморфических преобразований. К сохранившейся на антрацитовых стадиях доле метана добавляется некоторая его часть,

образовавшаяся при усилении влияния метаморфических преобразований под воздействием высокой температуры.

Исходя из существенных отличий протекания процессов образования метана и условиями его удаления на разных стадиях углеобразования, газоносность угольных шахтопластов со времени ведения горных работ окончательно формируется как процессами образования флюидов на отдельных стадиях, так и их миграцией (всех или некоторой части) во вмещающие породы и (или) в атмосферу. Некоторые опасные свойства шахтопластов (газоносность, внезапные выбросы угля и газа) определяет только сохранившаяся часть метана. Она достоверно характеризуется экспериментальными данными о природной газоносности углей, которая была сформирована под воздействием практически независимыми между собой процессами метаморфизма углей и условиями последующего удаления флюидов.

Рассматривая изменение соотношения между всеми основными компонентами элементного состава в процессе метаморфических преобразований шахтопластов, исключается необходимость установления условий образования якобы восстановительной среды на торфяной стадии (рис.). Протекание восстановительных процессов (увеличение элементного содержания кислорода) в природных условиях невозможно, так как процессы углеобразования на всех стадиях являются необратимыми. Об этом свидетельствует и одностороннее снижение элементного содержания кислорода при усилении метаморфических преобразований (росте содержания углерода) на каменноугольной и антрацитовых стадиях. Термины «восстановленность» и «окислённость» относятся только к характеристике потребительских качеств ископаемых углей. По этой причине нет оснований их использовать для прогноза опасных свойств шахтопластов.

Результаты проведенных исследований позволили разработать научно обоснованные предложения по уточнению общей схемы углеобразования:

- основными компонентами исходного материала углеобразования являются пять компонентов (углерод, водород, кислород, азот и органическая сера), а не три, как предусмотрено схемой;
- при анаэробном разложении органического вещества в результате деятельности метаногенных бактерий на торфяной стадии образуются метан и углекислый газ, которые в большей части выделяются в атмосферу;
- на поздней стадии диагенеза (образования бурых углей) и ранней (переходной) стадии метаморфизма (образования каменных углей) некоторая часть метана и углекислого газа, образовавшихся при биохимических процессах, в зависимости от геологических условий могут выделяться в атмосферу, поглощаться вмещающими породами или оставаться в органическом веществе;
- на каменноугольной стадии при метаморфических процессах дополнительное образование метана и углекислого газа не происходит (об этом свидетельствуют односторонний рост элементного содержания углерода и снижение кислорода и водорода, а также сокращение влаги); опасные свойства шахтопластов на этой стадии в значительной мере определяются количеством сохранившихся флюидов, образование которых происходило на предыдущих стадиях;
- на антрацитовых стадиях выделяется незначительное дополнительное количество влаги и других флюидов с возможным участием в их образовании всех основных компонентов, в том числе и углерода (суммарное количество

образовавшихся газов на отдельной антрацитовой стадии не превышает нескольких процентов от сохранившейся массы преобразованного вещества);

– на каменноугольной и антрацитовых стадиях количество удалённых газов связано с условиями протекания геологических процессов, определяющих их выделение, как во вмещающие породы, так и на дневную поверхность.

Выводы. Уточнённые отдельные пункты схемы углеобразования меняют существовавшие представления о формировании опасных свойств шахтопластов. Для усовершенствования нормативной базы по безопасному ведению горных работ и предупреждению аварийных ситуаций необходимо решить ряд актуальных научных проблем, установленных по результатам проведенных исследований. Наиболее актуальными из них являются:

– изучить индивидуальную зависимость проявления опасных свойств каждого шахтопласта от соотношения элементного содержания между всеми основными компонентами органической (горючей) массы, так как она наиболее полно характеризует одну из сторон метаморфических преобразований углей по фактору изменения элементного состава;

– оценить, исходя из фактического соотношения между основными компонентами органической (горючей) массы, возможный количественный и качественный состав газов, которые могли образоваться при определённом температурном режиме на предыдущих стадиях углеобразования;

– установить индивидуальную историю шахтопласта и определить факторы, способствовавшие образованию и сохранению флюидов или их удалению во вмещающие породы и (или) выделению на земную поверхность;

– исследовать отличительные признаки шахтопластов переходной стадии от каменных углей к антрацитам, как по соотношению основных компонентов, так и по физико-механическим свойствам;

– произвести количественную оценку метана, образовавшегося на антрацитовых стадиях и возможную его долю, сохранившегося при предыдущих геологических процессах;

– разработать критерии отнесения шахтопластов к одной степени метаморфических преобразований по элементному соотношению всех основных компонентов и физико-механическим свойствам углей;

– исследовать совместное влияние минеральных примесей и основных компонентов органической (горючей) массы на проявление опасных свойств шахтопластов.

Список литературы / References

1. Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах. – М. : Недра, 1979. – 319 с.
Rukovodstvo po borbe s pylyu v ugolnykh shakhtakh [Guide to Coal Mine Dust Control]. М., Nedra Publ., 1979. 319 p. (In Russian)
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К.: Основа, 1994. – 311 с.
Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyacii ugolnykh shakht [Design Guide for Coal Mine Ventilation]. К., Osnova Publ., 1994, 311 p. (In Russian)
3. О влиянии минеральных примесей на проявление опасных свойств угольных шахтопластов / Е. С. Руднев, Н. И. Антощенко, Э. Н. Филатёва, Ю.А. Романченко // Вести

Донецкого горного института. – 2021. – №2 (49). – С. 85–95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95>.

Rudnev, E. S., Antoshchenko, N. I., Filatieva, E. N., Romanchenko, Yu. A. *O vliyani mineral'nykh primesej na proyavlenie opasnykh svoystv ugol'nykh shahtoplastov* [On the influence of mineral impurities on the manifestation of hazardous properties of coal seams]. *Vesti Donetskogo gornogo instituta*. 2021; no. 2 (49), pp. 85-95. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95>. (In Russian)

4. Авгушевич, И.В. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей / И. В. Авгушевич, Е. И. Сидорук, Т. М. Броневец. – М. : Реклама мастер, 2018. – 576 с.

Avgushevich, I. V., Sidoruk, E. I., Bronovec, T. M. *Standartnye metody ispytaniya uglej. Klassifikacii uglej* [Standard Test Methods for Coals. Coal Classifications]. М., Reklama master Publ., 2018, 576 p. (In Russian)

5. Определение содержания серы в минеральной массе для прогноза опасных свойств угольных шахтопластов / Н. В. Пронская, Э. Н. Филатьева, М. В. Филатьев, Н. В. Шашло // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 58–72. – DOI 10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72. – EDN WUYPWO.

Pronskaya, N. V., Filatieva, E. N., Filatiev, M. V., Shashlo N. V. *Opreделение soderzhaniya sery v mineral'noi masse dlya prognoza opasnykh svoystv ugol'nykh shakhtoplastov* [Determination of sulfur content in mineral mass for prediction of hazardous properties of coal mine seams]. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024; no. 8 (1), pp. 58-72. – DOI 10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72. – EDN WUYPWO. (In Russian)

6. Кошовский, Б. И. Влияние влаги на процесс низкотемпературного окисления угля / Б. И. Кошовский, В. П. Орликова // Уголь Украины. – 2015. – № 3–4. – С. 39–43.

Koshovskij, B. I., Orlikova, V. P. *Vliyanie vlagi na process nizkotemperaturnogo okisleniya uglya*. *Ugol' Ukrainy*. 2015; no. 3-4, pp. 39-43. (In Russian)

7. Antoshchenko, N. I., Rudniev, Ye. S., Filatiev, M. V., Brozhko, R. N. Hazardous properties of coal layers and the accuracy of their forecast on the escape of volatile substances. *SWorldJournal*, Issue 8, Part 2 (2021): 45-57. DOI: 10.30888/2663-5712.2021-08-02 (In English)

8. Антощенко, Н. И. Метан в угольных пластах от образования до выделения : Монография / Н. И. Антощенко, В. Д. Шепелевич. – Алчевск : ДонГТУ, 2006. – 267 с.

Antoshchenko, N. I. Shepelevich, V. D. *Metan v ugol'nykh plastakh ot obrazovaniya do vydeleniya* : Monografiya. Alchevsk : DonGTU, 2006. 267 p. (In Russian)

9. Геолого-углехимическая карта Донецкого бассейна. Донецкий научно-исследовательский угольный институт (ДонУГИ). Вып. VIII. – М. : Углетехиздат, 1954. – 432 с.

Geologo-uglekhimicheskaya karta Doneckogo bassejna. Doneckij nauchno-issledovatel'skij ugol'nyj institut (DonUGI). Вып. VIII. М., Ugletekhizdat Publ., 1954, 432 p. (In Russian)

10. Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов / Донецкий научно-исследовательский угольный институт. – М. : Недра, 1972. – 168 с.

Doneckiy nauchno-issledovatel'skiy ugol'nyy institut. *Spravochnik po kachestvu kamennykh ugley i antracitov Doneckogo i Lvovsko-Volynskogo basseynov*. М., Nedra Publ., 1972, 168 p. (In Russian)

11. Rudniev, Ye., Antoshchenko N., Filatieva, E., Filatiev, M. Scientific basis for the development of a method for forecasting the hazardous properties of coal seams. *News from the Donetsk Girnic Institute*, 1 (2022): 132-45. EDN OMKCEJ (In English)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 02.04.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Elvira Nikolaevna Filatieva, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department;

e-mail: Elafilatyeva@gmail.com

Alexander Timofeevich Pavlenko, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Department;

e-mail: pavlenko1901@yandex.ru

Mikhail Vladimirovich Filatiev, Dr. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;

e-mail: Mfilatev@gmail.com

Alexander Vasilyevich Krasnogradov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor,

Associate Professor of the Department; e-mail: krasnogradov@mail.ru

Vladimir Yuryevich Malkin, Dr. of Economics, Associate 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: +79591112945

ACTUAL ISSUES OF STUDYING COAL FORMATION PROCESSES AND THE MANIFESTATION OF HAZARDOUS PROPERTIES OF COAL SEAMS

Objective. Study of coal formation processes for scientific substantiation of forecasting of occurrence and manifestation of hazardous properties of specific coal seams during mining operations.

Methods. The study is based on modern concepts of coal formation processes. To confirm or establish the discrepancy between the processes occurring at different stages of coal formation, experimental data from reference and regulatory documents have been used. Statistical processing of experimental data makes it possible to establish changes in the elemental composition of organic or combustible mass at different stages of metamorphic transformations of coal seams.

The results of the conducted studies have made it possible to develop scientifically substantiated proposals for clarifying the general scheme of coal formation.

The scientific novelty consists in the possibility of hazardous properties formation of coal seams not only at the stage of metamorphic transformations, and their occurrence is genetically associated, to a large extent, with previous processes of accumulation of the source material, which has been subjected to successive transformation at the peat, brown coal, coal or anthracite stages of coal formation.

Practical significance. The results of the conducted analytical studies can be used to solve a number of urgent scientific issues on improving the regulatory framework for safe mining operations and preventing emergency situations.

Key words: *coal seams; hazardous properties; processes; coal formation; stages; regulatory framework; safety; improvement; problems.*

For citation: Filatieva E. N., Pavlenko A. T., Filatiev M. V., Krasnogradov A. V., Malkin V. Yu. Actual issues of studying coal formation processes and the manifestation of hazardous properties of coal seams. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 35–44. EDN WFEGEW

УДК [614.895:614.8-051]:678

*Александр Васильевич Баринов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры;
e-mail: a.barinov@agz.50.mchs.gov.ru*

*Михаил Федорович Баринов, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры;
e-mail: barinovmf@rambler.ru*

Антон Андреевич Кучербаев, слушатель; e-mail: marteldoran@gmail.com

Евгений Вячеславович Иванов, канд. техн. наук, доцент; e-mail: e.ivanov@amchs.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»*

141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: +7 (498) 699-06-94

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Определение основных зависимостей при разработке полимерных материалов для защитной экипировки спасателей, а также оценка многофункциональности этих материалов.

Методы. Системный анализ информационных источников, а также результатов экспериментальных исследований защитных свойств современных многофункциональных материалов.

Результаты. Установлены и систематизированы основные закономерности для определения защитных свойств материалов на этапе их разработки и изготовления.

Научная новизна. Впервые обобщен и разработан методический подход к определению свойств многофункциональных материалов для создания защитной экипировки спасателей.

Практическая значимость. Внедрение установленных зависимостей в практике создания новых материалов с заранее заданными свойствами позволит обеспечить необходимый уровень защиты спасателей при проведении аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: защитная экипировка; аварийно-спасательные работы; многофункциональные материалы; защита от осколков.

Для цитирования: Баринов А. В., Баринов М. Ф., Кучербаев А. А., Иванов Е. В. Исследование многофункциональной защиты спасателя с использованием полимерных материалов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 45–54. – EDN XXDCFB

Постановка проблемы. Ежегодно фиксируются случаи, связанные с травматизмом и гибелью спасателей в ходе проведения аварийно-спасательных работ [1]. Риск является неотъемлемой частью профессиональной деятельности спасателей, но вместе с тем, за счет формирования оптимальной системы защиты, он может быть сведен к минимуму [2].

Для безопасного нахождения в экстремальных средах требуется комбинированная защита, способная обеспечить защиту от нескольких видов поражающих факторов. Такие требования обуславливают необходимость применения различных сочетаний материалов. Переход к единому многофункциональному материалу может обеспечить упрощение производства экипировки и повысить ее эргономичность, что значительно повысит эффективность проведения аварийно-спасательных работ, когда спасатели могут подвергаться воздействию множества поражающих факторов.

На практике переход к единому многофункциональному материалу, сочетающему высокую термическую и баллистическую стойкость, связан

с определенными трудностями из-за ряда существенных ограничений, которые исключают одновременное сохранение обоих свойств. Полимеры обладают химической стабильностью и высокой прочностью по отношению к массе, однако ряд недавних исследований в области теплопроводности полимерных материалов позволил выявить закономерность, согласно которой относительный модуль упругости и модуль относительной теплопроводности не равны друг другу за рядом исключений [3]. Данное обстоятельство доказывает наличие нетривиальных взаимосвязей между двумя этими величинами. У полимерных волокон есть определенный лимит теплопроводности, превышение которого приводит к постепенному ухудшению свойств нити.

Цель исследования – определение основных зависимостей при разработке полимерных материалов для защитной экипировки спасателей, а также оценка многофункциональности этих материалов.

Результаты исследований. Большинство полимеров обладают низкой теплопроводностью, однако использование дополнительных наполнителей с высокой теплопроводностью позволяет добиться нужных показателей с одновременным снижением механических свойств материала [4]. Дальнейшие исследования по решению задачи подобного соотношения привели к появлению ряда работ, где предлагалось с помощью изменения взаимной ориентации кристаллитов или выравнивания молекулярных цепей изменить структуру вещества [5].

Ароматические полиамиды (они же – арамидные волокнообразующие полимеры) изготавливают методом сухоструйно-мокрого прядения. Так, например, кевлар получают путем полимеризации жидкокристаллического раствора: изначально все молекулы в нем имеют произвольную ориентацию, что изменяется пропусканием раствора в виде тонкой струи через фильеру. В итоге струя вытягивается, как следствие, удлиняется, а молекулы внутри нее принимают тождественную ориентацию, благодаря чему на выходе из коагулирующей ванны струя преобразуется в кристаллическое волокно. Полученный продукт промывают, высушивают, обрабатывают различными способами и получают арамидную нить.

Однако возникают сложности, связанные с обеспечением новых полимерных материалов заданными свойствами. Пример может быть проиллюстрирован особенностями синтеза материала Nomex, который имеют высокую термическую стойкость, обеспеченную медленным теплопереносом по слабо упорядоченным молекулярным связям внутри волокон. Модуль упругости такого волокна в силу неупорядоченных связей значительно ниже, чем у кевлара, молекулы которого имеют куда более ярко выраженную упорядоченную и ориентированную структуру, будучи кристаллизованными под воздействием механического напряжения при вытягивании полимерного раствора. Профилирование молекулярных цепей подобным образом оказывает значительное влияние на механические характеристики волокна и нити из него, однако способствует более эффективной теплопередаче.

Процесс теплообмена представляет собой передачу кинетической энергии атомов и молекул (которая характеризует температуру) от одного тела к другому или от более нагретой части одного тела к менее нагретой и характеризуется коэффициентом теплопроводности k . Определить последний для одиночной арамидной нити в упрощенном виде возможно с помощью одномерного уравнения Фурье (задача о нагревании стержня).

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $T(x, t)$ – температура в точке x в момент времени t , К;

α – коэффициент температуропроводности, учитывающий удельную теплоемкость C_p (Дж/(кг·К)), плотность материала ρ (кг/м³) и коэффициент теплопроводности k (Вт/(м·К)), м²/с:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}. \quad (2)$$

Для создания полноценной математической модели нужны граничные и начальные условия, введем их следующим образом:

1) $T(x, 0) = T_0(x)$, где $T_0(x)$ – начальное распределение температуры по координате x ;

2) для обыкновенного дифференциального уравнения зададим граничные условия по Дирихле (пусть температуры в граничных точках известны);

3) для задачи определения теплопередачи введем граничное условие Ньютона (граничное условие конвекции), подразумевая, что поступающее с конвективной стороны тепло должно покидать поверхность со стороны проводимости.

Для упрощения рассмотрим стационарный процесс (температура не меняется со временем), тогда уравнение (1) примет вид:

$$\alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Дважды проинтегрировав уравнение, получим:

$$T(x) = C_1 x + C_0, \quad (4)$$

где C_1 и C_0 – константы интегрирования, определенные граничными условиями.

Если известны длина образца L (м) и температура в граничных точках $T(0) = T_1$ и $T(x) = T(L) = T_2$, то

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{L}, \quad (5)$$

$$C_0 = T_1. \quad (6)$$

Таким образом, температура в любой точке может быть выражена:

$$T(x) = \frac{T_1 - T_2}{L} x + T_1. \quad (7)$$

Используя формулу (7) и закон Фурье, получим уравнение для теплового потока q (Вт/м²), откуда в дальнейшем сможем определить значение коэффициента теплопроводности:

$$q = -k \frac{T_1 - T_2}{L}. \quad (8)$$

Теплоперенос внутри полимерного вещества, в том числе, зависит от того, насколько упорядочены его молекулы относительно друг друга и могут ли они при этом образовать подобие теплопроводных сетей. Этому может способствовать модифицирование различными наполнителями: наночастицами никеля, графита, кремния и т. п. Так, экспериментальными исследованиями с целью повышения свойств теплопроводности арамидных нановолокон путем добавления карбида кремния в качестве наполнителя создан композитный материал, теплопроводность которого увеличилась практически на 300 % по сравнению с «чистыми» нановолокнами [6]. Однако при этом снизилась прочность на разрыв, что в очередной раз подтверждает существование противоречия между требованиями к механическим и термическим характеристикам арамидных волокон.

Для современных арамидных материалов, применяемых в экипировке пожарного и спасателя, значение коэффициента теплопроводности может достигать верхнего предела примерно 0,4÷0,5 Вт/(м·К). Требования к материалам, используемым в целях пожарной безопасности за рубежом, представлены в документах ASTM E1952, NFPA 1971, EN 469.

При баллистическом воздействии защитная структура претерпевает различные деформационные изменения, главным из которых является высокая разрывная нагрузка. Следовательно, с точки зрения баллистической стойкости важнейшей характеристикой арамидной нити является ее способность при деформации удлиниться вплоть до разрыва.

Разрывная нагрузка в общем виде может быть выражена через максимальное напряжение, соответствующее значению, при котором арамидные волокна разорвутся:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t), \quad (9)$$

где $\sigma(t)$ – напряжение, Па;

E – модуль продольной упругости, Па;

$\varepsilon(t)$ – относительная линейная упругая деформация.

Исследованиями отечественных специалистов [7] подтверждено, что «сухо-мокрый» способ формирования нити приводит к минимизации дефектов структуры самого волокна и увеличению диаметра филаментов, влияющих на скорость распространения волновых процессов (волнового отвода кинетической энергии) при баллистическом воздействии на бронеструктуру.

Также обнаружено и подтверждено, что зависимость между упруго-прочностными характеристиками материала и конечными баллистическими свойствами бронепакета носит линейный характер [8], а при прочих равных условиях повышение баллистической стойкости защитной панели на 1 % требует увеличения прочности исходной нити на 4–5 % [9]. В совокупности это подводит конструкторов к тому, чтобы добиваться предельного заполнения внутреннего

пространства бронеструктуры однородными филаментами армированных волокон с минимальным содержанием связующего вещества.

При попадании поражающего элемента (ПЭ) в композитную бронеструктуру из арамидных нитей происходит как поглощение энергии поражающего элемента нитями, которые непосредственно соприкоснулись с ним, так и передача этой энергии другим нитям, которые не контактируют непосредственно с поражающим элементом, однако взаимодействуют с затронутыми нитями первой группы вследствие деформации всей бронеструктуры. Помимо параметров самого ПЭ (его геометрия, скорость и т. д.), большое значение имеют свойства арамидных нитей и их взаимная ориентация в структуре бронепакета: поражающий элемент может как разорвать нить, так и выдернуть ее из структуры композита или взаимодействовать с ней иным образом. Однако для преодоления сопротивления каждой нити поражающий элемент неизбежно тратит свою кинетическую энергию, преобразуя ее в работу над преодолением силы трения не только той нити, с которой контактирует непосредственно, но и прочих, входящих в композит.

Если предположить, что имеется n слоев из плотно уложенных нитей с одинаковыми свойствами, а направление укладки нитей каждого следующего слоя ортогонально предыдущему (композит из UD-структур), то уравнение движения поражающего элемента при попадании в такой композит перпендикулярно первому слою можно описать следующим уравнением:

$$m \frac{d\vartheta(t)}{dt} = -F_T(t) - \sum_{i=1}^n F_{d,i}(t), \quad (10)$$

где m – масса поражающего элемента, кг;

v – скорость поражающего элемента в момент времени t (с), м/с;

F_T – сила трения, зависящая от положения поражающего элемента между слоями, Н;

$F_{d,i}$ – силы упругости, учитывающие деформацию каждого i -го слоя, Н.

Силы трения и упругости в данной модели могут быть представлены в следующем виде:

$$F_T(t) = \mu \left[mg + \sum_{i=1}^n N_i(t) \right], \quad (11)$$

$$F_{d,i}(t) = k_i \varepsilon_i(t), \quad (12)$$

где μ – коэффициент трения между нитями;

N_i – нормальная сила, действующая на i -й элемент (в данном случае – на слой полимера), учитывающая динамический характер взаимодействия ПЭ и композита, Н;

k_i – жесткость i -го слоя, Н/м;

(ε_i) – смещение i -го слоя, вызванное деформацией, м.

Нормальную силу для каждой отдельной нити можно определить также через жесткость j -го элемента, который зависит от его модуля упругости и геометрических характеристик:

$$N_j(t) = k_j \varepsilon_j(t) L_j = \frac{ES_j}{L_j} \varepsilon_j(t) L_j = ES_j \varepsilon_j(t). \quad (13)$$

Так как ε представляет собой отношение изменения размера к начальному, то можем представить его в виде:

$$\varepsilon_j(t) = \frac{\Delta L_j(t)}{L_j}. \quad (14)$$

Тогда уравнение (13) примет вид:

$$N_j(t) = ES_j \frac{\Delta L_j(t)}{L_j} = k_j \Delta L_j(t). \quad (15)$$

Уравнением (15) можно описать, как нормальная сила взаимодействует с каждой j -й нитью в зависимости от ее жесткости, начальной длины L_j (м) и площади поперечного сечения S_j (м²), а также относительного изменения длины из-за деформации нити.

Для упрощения будем принимать, что каждый i -й слой представляет собой монолитную структуру, максимально заполненную филаментами волокон. Уравнение для смещения каждого слоя:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \vartheta_i(t). \quad (16)$$

Тогда можем составить систему уравнений из (10) и (16):

$$\left\{ \begin{aligned} m \frac{d\vartheta(t)}{dt} &= -\mu \left[mg + \sum_{i=1}^n N_i(t) \right] - \sum_{i=1}^n k_i \varepsilon_i(t), \\ \frac{dx_i(t)}{dt} &= \vartheta_i(t). \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Работа W , совершаемая ПЭ в каждом слое для преодоления силы трения и деформации, может быть выражена через энергетический баланс:

$$W(t) = \int_0^t \left\{ \mu \left[mg + \sum_{i=1}^n N_i(t) \right] + \sum_{i=1}^n k_i \varepsilon_i(t) \right\} \vartheta(t) dt. \quad (18)$$

На основании зависимости (18) можно сделать вывод: чем большими окажутся значение силы трения (и чем плотнее нити и их волокна находятся друг к другу) и модуль упругости самих нитей, тем больше кинетической энергии потребуются ПЭ для преодоления всей бронеструктуры. Данная модель является упрощенной и не учитывает влияние демпфирующих эффектов между слоями, влияние температуры, разнотянутости нитей и другие сложности взаимодействия нитей

и слоев полимерного материала, и служит только для демонстрации взаимосвязи между модулем упругости и прочности композита.

Важно помнить, что сплошное заполнение филаментами нитей пространства бронеструктуры с высокой вероятностью негативно скажется на термической стойкости бронепакета. Упорядоченное расположение как самих волокон нитей, так и их молекулярных цепей, приведет к повышению теплопроводности изделия.

Модуль упругости арамидных волокон, применяемых в производстве экипировки пожарных и спасателей, должен находиться в пределах $70 \div 130$ ГПа, для СВМПЭ нитей – $30 \div 45$ ГПа. За рубежом этот показатель регламентируется ISO 11612, NFPA 1971 и EN 469.

Предполагается, что проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ либо происходит в условиях отсутствия риска поражения личного состава осколочными поражающими элементами, либо существующие средства защиты окажутся неэффективны по ряду причин, главная из которых – низкая эргономичная сочетаемость с иными элементами экипировки.

Традиционно считается, что защитная экипировка в полном объеме полагается саперам подразделений инженерных войск при проведении соответствующих работ. Отчасти это мнение оправданно. Во-первых, стандартные средства защиты личного состава (бронезилет и шлем) часто имеют большой вес и конструктивно могут неудачно сочетаться с другой специализированной экипировкой (в частности, с костюмами радиационной, химической и биологической защиты). Во-вторых, нормами отечественного и зарубежного опыта исследований защиты жизненно важных органов человека (по образцу ГОСТ В21114-75) принято считать достаточным процент защищенности поверхности тела в пределах 30–35 % (общевойсковой комплект из бронезилета и бронешлема), оставляя незащищенными конечности. Совокупность этих факторов приводит к практике, когда спасатели идут на осознанный риск и выполняют аварийно-спасательные операции с неполным набором снаряжения, что снижает уровень защиты от осколков, но позволяет им работать более эффективно.

В современных условиях защита от осколочных поражающих элементов все чаще требуется спасательным формированиям, действующим не только в условиях военной опасности, но и в мирное время: опасность может подстерегать на различных объектах производства и складах, где хранятся взрывоопасные вещества; в зданиях, расположенных в зонах массовых беспорядков; в частных домах или пристройках с газовыми баллонами; на реконструируемых или строящихся объектах, где проводятся газосварочные работы. При проведении аварийно-спасательных работ на подобных участках всегда существует риск баллистического воздействия на спасателя ввиду стечения ряда неблагоприятных обстоятельств, приводящих к детонации взрывчатых веществ и, как следствие, поражению произвольным числом крупных и мелких осколков.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В условиях военной опасности к поражающим факторам, воздействующим на спасателя в период проведения аварийно-спасательных работ, добавляются риски баллистического воздействия осколочных поражающих элементов. Это выдвигает дополнительные требования к материалам для защитной экипировки спасателя, которые должны удовлетворять комплексу критериев.

Все материалы следует выбирать и комбинировать друг с другом, исходя из принципов разумной достаточности, требующих обеспечения термической и баллистической стойкости – с одной стороны, с другой стороны – сохранения необходимой трудоспособности.

С точки зрения оптимизации изготовления специальной защитной одежды и экипировки, необходимо комбинировать ее, руководствуясь не свойством отдельного вида материала (ткани) или их композиций из нескольких наименований, а применять модифицированные материалы с комплексными защитными свойствами, удовлетворяющие сразу нескольким требованиям.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных разработок в данной области показывает перспективность применения методов синтеза полимерных волокон с добавлением наночастиц для придания новых или улучшения существующих свойств. Таким образом, в настоящее время вопросы изготовления защитной экипировки различного целевого назначения из полимерных материалов, в основном зависят от возможности производить в необходимых объемах соответствующие полимерные волокна.

Учитывая конструктивные требования к защитной одежде спасателя (необходимость противостоять интенсивному температурному воздействию, защищать от механических и баллистических факторов, обладать устойчивостью к химическому воздействию и т. п.), получение универсального полимерного материала и комбинирование его в многослойный эргономичный пакет из тканей / препрегов решило бы существующую проблему создания экипировки спасателя с комплексной защитой от нескольких поражающих факторов.

Список литературы / References

1. О результатах анализа научно-методического аппарата в области обеспечения защиты спасателей / А. В. Рыбаков, П. П. Петренко, Е. В. Иванов, Д. В. Мясников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 2 (66). – С. 150–155.

Rybakov, A. V., Petrenko, P. P., Ivanov, E. V., Myasnikov, D. V. *O rezul'tatah analiza nauchno-metodicheskogo apparata v oblasti obespecheniya zashchity spasatelej* [On the results of the analysis of the scientific and methodological apparatus in the field of ensuring the protection of rescuers]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2024, vol. 13, no. 2 (66), pp.150-155. (In Russian)

2. Формирование модели оценки защищенности спасателей при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений / П. П. Петренко, А. В. Рыбаков, Е. В. Иванов, А. Н. Терехов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 2 (61). – С. 25–36.

Rybakov, A. V., Ivanov, E. V., Petrenko, P. P., Terehov, A. N. *Formirovanie modeli ocenki zashchishchennosti spasatelej pri provedenii avarijno-spasatel'nyh rabot v usloviyah obrushenij zdaniy i sooruzhenij* [Formation of a model for assessing the safety of rescuers during emergency rescue operations in the conditions of collapses of buildings and structures]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2024, no. 2(61), pp. 25-36. (In Russian)

3. Pabst W., Gregorová E. Critical assessment 18: elastic and thermal properties of porous materials—rigorous bounds and cross-property relations. *Materials Science and Technology*, 2015, vol. 31, no. 15, pp. 1801-1808. (In English)

4. Wang X. et al. Thermal conductivity of high-modulus polymer fibers. *Macromolecules*, 2013. vol. 46, no. 12, pp. 4937-4943. (In English)

5. Xu S., Liu J., Wang X. Thermal conductivity enhancement of polymers via structure tailoring. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2020, vol. 27, no. 5, pp. 463-489. (In English)

6. Liu Z. et al. Nanofibrous kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments. *Acs Nano*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 5703-5711. (In English)

7. Новый ассортимент арамидных нитей «Русар-С» для баллистической защиты и конструкционных органокомпозитов / В.Г. Бова [и др.] // Материалы конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности». ФГУП ВИАМ. – Москва, 2015. – С. 129–135.

Bova, V. G., Tihonov, I. G., Shchetinin, V. M., Bova, A. V., Kutyurin, A. Yu. *Novyy assortiment aramidnyh nitej «Rusar-S» dlya ballisticheskoy zashchity i konstrukcionnyh organokompozitov* [A new range of “Rusar-S” aramid filaments for ballistic protection and structural organocomposites]. *Materialy konferencii “Polimernye kompozicionnye materialy novogo pokoleniya dlya grazhdanskikh otraslej promyshlennosti”*, Moscow, 2015, pp. 129-135. (In Russian)

8. Морозова, Т. В. Исследование свойств арамидных волокон, полученных технологией сухо-мокрого формования / Т. В. Морозова, Е. Ф. Харченко, Е. В. Куприянова // Вестник Технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 9. – С. 19–23.

Morozova, T. V., Harchenko, E. F., Kupriyanova, E. V. *Issledovanie svojstv aramidnyh volokon, poluchennyh tekhnologiej suho-mokrogo formovaniya* [Investigation of the properties of aramid fibers obtained by dry-wet molding technology]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2020, vol. 23, no. 9, pp. 19-23. (In Russian)

9. Харченко, Е. Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Том 2. Современные защитные структуры и средства индивидуальной бронезащиты / Е. Ф. Харченко. – Москва, 2014. – 332 с.

Kharchenko, E. F. *Kompozitnye, tekstil'nye i kombinirovannye bronematerialy. Tom 2. Sovremennye zashchitnye struktury i sredstva individual'noj bronezashchity* [Composite, textile, and combined armor materials. Volume 2. Modern protective structures and personal protective equipment]. Moscow: 2014, 332 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 22.05.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Aleksandr Vasil'evich Barinov, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department;

e-mail: a.barinov@agz.50.mchs.gov.ru

Mihail Fedrovich Barinov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department;

e-mail: barinovmf@rambler.ru

Anton Andreevich Kucherbaev, Student; e-mail: marteldoran@gmail.com

Yevgeny Vyacheslavovich Ivanov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor;

e-mail: e.ivanov@amchs.ru

Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education

«The Civil Defence Academy of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»

141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya st., 1A. Phone: +7 (498) 699-06-94

RESEARCH OF MULTIFUNCTIONAL RESCUER PROTECTION USING POLYMER MATERIALS

Objective. Determination of the main dependencies in the development of polymeric materials for protective equipment for rescuers, as well as an assessment of the multifunctionality of these materials.

Methods. A systematic analysis of literary sources, as well as the results of experiments aimed at studying the protective properties of modern multifunctional materials.

Results. The main patterns that allow determining the protective properties of materials at the stage of development and manufacture have been identified and systematized.

Scientific novelty. For the first time, an approach to the selection of properties of multifunctional materials used to create protective equipment for rescuers is generalized and outlined.

Practical significance. By introducing the presented dependencies into practice, it is possible to create new materials with predefined properties, which will ensure the necessary level of protection for rescuers during rescue operations.

Key words: *protective equipment; emergency rescue operations; multifunctional materials; protection from splinters.*

For citation: Barinov A. V., Barinov M. V., Kucherbaev A. A., Ivanov E. V. Research of multifunctional rescuer protection using polymer materials. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 45-54. EDN XXDCFB

УДК 614.895.5-057.36

Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.;

e-mail: a.dolzhenkov@80.mchs.gov.ru

Татьяна Олеговна Мороз, нач. отд.; e-mail: t.moroz@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-43

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ СПАСАТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ

Цель. Исследование характера термического воздействия на спасателя теплового потока различной плотности и обоснование времени его пребывания в различных температурных условиях.

Методика. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований эффективности защитной одежды. Обоснование номенклатуры методов исследования контактных и бесконтактных физико-химических характеристик термозащитных тканей, применяемых для изготовления термостойкой защитной одежды спасателей.

Результаты. Получены зависимости степени воздействия теплового потока различной плотности на кожу человека и сформулированы требования к теплозащитной одежде спасателя. Обоснованы подходы к прогнозированию времени, которое теоретически достаточно для получения ожогов второй степени в результате воздействия на спасателя теплового потока.

Научная новизна. Установлена зависимость степени защищенности пожарного-спасателя от теплопроводности специального материала защитной одежды, свойств материала верха отражать тепловое излучение и его воспламеняемости.

Практическая значимость. Полученные результаты позволили обосновать требования к теплозащитной одежде спасателя, эксплуатируемой при термическом воздействии теплового потока различной плотности и времени пребывания человека в различных температурных условиях.

Ключевые слова: *теплозащитная одежда; термодеструкция; пожарный-спасатель; тепловой поток; термостойкость; конвективный нагрев.*

Для цитирования: Долженков А. Ф., Мороз Т. О. Оценка эффективности защитной одежды спасателей при воздействии высокотемпературных факторов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 55–60. EDN PIQNAW

Постановка задачи. При проведении аварийно-спасательных работ во время пожара пожарные-спасатели подвергаются воздействию многих температурных факторов (повышенная температура, тепловое излучение, конвективный нагрев, контакт с нагретыми поверхностями и т.д.), поэтому обеспечение их безопасности имеет важное значение. Весьма большому риску пожарный-спасатель подвергается при непосредственном контакте с пламенем, например, при возгорании одежды на человеке, поскольку он может получить ожоги, которые, в том числе, становятся причиной летального исхода. В связи с этим, применение термостойкой защитной одежды пожарного-спасателя может значительно снизить вероятность получения ожога поверхности тела пожарного-спасателя при ликвидации аварийных ситуаций.

Анализ последних исследований. Опасным для жизни человека является воздействие высокой температуры и продуктов горения. Превышение температуры нагретых газов над температурой тела человека в таких условиях приводит к ожогам и тепловому удару. Уже когда температура кожи человека поднимается до 42...46 °С появляются болевые ощущения. Температура окружающей среды 60...70 °С опасна для жизни человека, особенно при значительной влажности и вдыхании горячих

газов, а при температуре выше 100 °С происходит потеря сознания и через несколько минут наступает смерть.

Помимо открытого пламени к высокотемпературным факторам относятся: тепловое излучение, конвективный нагрев и контакт с нагретыми поверхностями. Тепловое излучение образуется в результате теплообменных процессов, происходящих при горении. Все тепло, выделяющееся в зоне химической реакции горения, отводится из него в окружающую среду в виде теплового излучения и только 3 % энергии используется для поддержания и продления процесса горения [1–5]. Тепловое излучение с интенсивностью 1,1...1,4 кВт/м² вызывает у человека такие же ощущения, как и температура 42...46 °С.

Время, в течение которого человек способен переносить тепловое излучение при разной его интенсивности зависит от плотности теплового потока [2]. В связи с тем, что воздух передает тепловое излучение без повышения его температуры, энергию теплового излучения (кВт/м²) можно определить по формуле

$$Q = \frac{0,78F\left(\left(\frac{T}{100}\right)^4 - 110\right)}{l^2},$$

где F – площадь излучающей поверхности, м²;

T – температура излучающей поверхности, К;

l – расстояние от излучающей поверхности до объекта, м.

Цель. Исследование характера термического воздействия на пожарного-спасателя теплового потока различной плотности и времени его пребывания в различных температурных условиях.

Методы исследования. Исследования действия плотности теплового потока на кожные покровы спасателя проводились двумя методами. Первый метод заключался в регистрации средневзвешенной температуры кожи с множества точек [4]. В процессе эксперимента измерялось время изменения температуры, фиксировался рост температуры кожи вплоть до наступления последствий термического воздействия и по полученным величинам определялся локальный тепловой поток. Второй метод – импульсное исследование теплофизических характеристик [5]. Датчик (платиновый термометр сопротивления) с начальной температурой 0 °С вводили в контакт с участком кожи человека. Нагрев датчика не превышал 5 °С. Длительность измерительного импульса составила 1,5...2 с. Плотность теплового потока – 3...5 %. Точность измерения температуры кожи при таком подходе составляла 1 %.

Результаты исследований. Установлено, что при плотности теплового потока 3 кВт/м² какое-либо термическое воздействие на кожу человека отсутствует, а время воздействия может быть неограниченным. При плотности теплового потока от 4 до 7 кВт/м² возникает боль от температурного воздействия, даже если пожарный-спасатель в защитной одежде и шлеме с защитным стеклом. При 7 кВт/м² – время нахождения пожарного-спасателя в зоне теплового воздействия не должно превышать 5 минут, поскольку такой характер термического воздействия вызывает сильную боль при воздействии на кожу человека. При плотности теплового потока от 8,5 до 10,5 кВт/м² пребывание в защитной одежде, смоченной водой, и в шлеме с защитным стеклом, а также под защитой распыляемых струй воды или водяной завесы, также не должно превышать 5 минут, поскольку такой характер термического

воздействия вызывает ожоги кожи. При плотности теплового потока от 14 кВт/м^2 пожарный-спасатель должен быть экипирован в теплоотражающий костюм и находиться под защитой распыляемых струй воды или водяных завес не более 5 минут, а при плотности теплового потока 85 кВт/м^2 и такой же экипировке – не более 1 минуты.

Учитывая вышесказанное, степень защищенности пожарного-спасателя зависит от теплопроводности специального материала защитной одежды, а также свойства материала верха отражать тепловое излучение и его воспламеняемости [3].

Достижение самой низкой теплопроводности, как одного из основных защитных показателей защитной одежды от повышенного теплового воздействия, обеспечивается с помощью специальных материалов и конструкций защитного костюма. Защита защитной одежды тем эффективнее, чем ниже теплопроводность пакета из специального материала, изолирующего человека от окружающей среды.

Следует учитывать, что накопление тепла в пространстве теплозащитной одежды увеличивается прямо пропорционально времени нахождения человека в опасной зоне и зависит от степени сложности выполняемой задачи. На основе анализа зарубежных и отечественных нормативных документов нами были сформулированы требования к теплозащитной одежде на основе показателей, характеризующих основные свойства одежды пожарных-спасателей (рис.).



Рис. Группы показателей, характеризующих теплозащитные свойства одежды пожарных-спасателей

При улучшении защитных свойств теплозащитной одежды пожарных-спасателей следует учитывать показатели термостойкости [6]. В зависимости от области применения теплозащитного костюма и источников высокотемпературных воздействий, в процессе его эксплуатации постоянно происходит термическое разрушение специального материала, особенно при воздействии опасных факторов:

– последствия термических воздействий (тепловое излучение, повышенная температура);

- действие открытого пламени;
- контакт с твердыми нагретыми поверхностями.

Термическая стойкость теплозащитной одежды пожарного-спасателя зависит от стойкости его материала к разрушению под воздействием высокоинтенсивного температурного потока [7]. Термостойкие комбинезоны считаются защитными для защиты пожарного-спасателя от негативного воздействия тепловых потоков.

Важным фактором обеспечения долговечности теплозащитной одежды пожарных-спасателей от действия высокоинтенсивных тепловых потоков является материал данной спецодежды, который характеризуется определенными значениями теплофизических характеристик, определяющих продолжительность перехода теплового потока от наружной поверхности к внутренней.

Экспериментально установлены основные характеристики и физико-химические показатели комбинезонов пожарных-спасателей. Из-за разных механизмов теплообмена, существуют разные методы исследования этих характеристик, которые в свою очередь могут быть контактными или бесконтактными. Поэтому при оценке теплозащитных свойств материалов для теплозащитной одежды пожарных-спасателей необходимо учитывать различные методы и приспособления.

Один из методов основан на эксперименте по сохранению тепловой энергии, с помощью которого устанавливается факт того, что повреждение от пожара может произойти в результате двух различных механизмов теплопередачи или в результате комбинации обоих тепловых явлений. Испытания проводят на предварительно увлажненных материалах под воздействием инфракрасного излучения с плотностью теплового потока до $8,4 \text{ кВт/м}^2$. После этапа облучения образец переходит ко второму этапу – сжатию, при котором измеряется накопленная и переданная тепловая энергия от теплозащитной одежды [8]. Существенным недостатком данного метода испытаний является то, что считывание результатов осуществляют контактным методом, несмотря на высокую инерцию.

Тестирование теплозащитных свойств материалов является наиболее важным классом лабораторных испытаний, используемых для оценки теплозащитных свойств защитной одежды. Эта категория испытаний включает в себя исследования, начиная от теплозащитного утеплителя и заканчивая полномасштабным манекеном, в условиях разрушения защитной одежды.

Прогрессивным методом является прогнозирование времени, которое теоретически достаточно для получения ожогов второй степени за счет слоев защитной одежды с конвективным источником тепла 84 кВт/м^2 . Эксперименты, проведенные в этом направлении, помогли выявить ряд ошибок и недостатков в оценке теплозащитных свойств материалов. Завершающим экспериментом этого метода является тестирование на манекенах в сочетании с защитным шлемом, перчатками и обувью. Тем не менее, эти испытания не были целенаправленно оптимизированы для использования в работе пожарных-спасателей или других специальных служб. Оптимизация данного метода для теплозащитной одежды пожарных-спасателей требует дальнейшего совершенствования конфигураций и условий, в том числе оценки воздействия на средства индивидуальной защиты органов дыхания.

В последнее время в связи с развитием информационных технологий, появилась возможность использовать вычислительный эксперимент для анализа параметров и характеристик спецодежды и тепловых режимов. Это даст возможность

прогнозировать поведение специального материала и разработать его новые конструкции. При этом важно учитывать, что информация, полученная экспериментальными методами, не может обеспечить абсолютное моделирование процессов, происходящих при пожаре и его ликвидации, из-за невозможности предсказать все события, которые могут возникнуть, а может лишь существенно приблизить их к реальным условиям.

Выводы. Полученные в результате проведенных исследований показатели характера термического воздействия на пожарного-спасателя теплового потока различной плотности и времени его пребывания в различных температурных условиях позволили обосновать требования к теплозащитной одежде.

Список литературы / References

1. Одинцов, Л. Г. Средства индивидуальной защиты спасателей МЧС России / Л. Г. Одинцов // Производство. Технология. Экология. ПРОТЭК-2001: сборник трудов международной научно-практической конференции, Москва : «Станкин», 2001. – С. 380–390.

Odintsov, L. G. *Sredstva individualnoy zashchity spasateley MCHS Rossii* [Personal protective equipment for rescuers of the EMERCOM of Russia]. Production. Technology. Ecology. PROTEK-2001: a collection of papers of the international scientific-practical conference, Moscow: Stankin, 2001; pp. 380–390. (In Russian).

2. Гигиеническая оценка теплового излучения и исследование эффективности теплозащитных экранов / Ф. М. Шакиров, С. С. Козий, Т. Б. Козий // Издательство Самарского университета, 2021. – 48 с.

Shakirov F. M., Koziy S. S., Koziy T. B. *Gigiyenicheskaya otsenka teplovogo izlucheniya i izucheniye effektivnosti teplozashchitnykh ekranov* [Hygienic assessment of thermal radiation and study of the effectiveness of heat-protective screens]. Samara University Publishing House, 2021; 48 p. (In Russian).

3. Конкин А. А., Кудрявцев Г. И., Щепинин А. М. Термостойкие и негорючие волокна. – Москва : Химия, 2006. – 424 с.

Konkin A.A. *Termozharostoykiye i negoryuchiye volokna* [Heat-resistant and non-flammable fibers]. Moscow: Chemistry, 2006; 424 p. (In Russian).

4. Родичева М. В., Обоснование методологии контактного измерения средневзвешенной температуры кожи / М. В. Родичева // Фундаментальные прикладные проблемы техники и технологии: научный журнал. – Орел, 2019. – № 4-2 (282). – С. 51–56.

Rodicheva M.V., *Obosnovaniye metodologii kontaktnogo izmereniya srednevzveshennoy temperatury kozhi* [Justification of the methodology of contact measurement of average weighted skin temperature]. Fundamental Applied Problems of Engineering and Technology: Scientific Journal. Orel, 2019; no. 4-2 (282), pp. 51–56. (In Russian).

5. Симанков Д. С. Оценка тепловой активности поверхностных тканей человека импульсным методом // Д. С. Симанков // Современные проблемы науки и образования: научный журнал. – М., 2018. – № 3. – С. 27–35.

Simankov, D.S. *Otsenka teplovoy aktivnosti poverkhnostnykh tkaney cheloveka impul'snym metodom* [Evaluation of thermal activity of human surface tissues by the pulse method]. Modern problems of science and education: scientific journal. Moscow, 2018; no. 3, pp. 27–35. (In Russian).

6. Микова, Е. В. Тепломассообменные свойства материалов и пакетов теплозащитной одежды / Е. В. Микова, Е. Х. Меликов и др. // Москва : Швейная промышленность. – 2000. – №6. – С. 37–38.

Mikova, Ye. V. *Teplomassoobmennyye svoystva materialov i paketov teplozashchitnoy odevzdy* [Heat and mass transfer materials properties and packages of heat protective clothing]. Moscow: Sewing Industry, 2000; no. 6, pp. 37–38. (In Russian).

7. Рукавишникова, А. С. Математическая модель процесса сжатия объемных утеплителей для проектирования теплозащитной одежды / А. С. Рукавишникова // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 4. – С. 113–117.

Rukavishnikova, A. S. *Matematicheskaya model' protsesssa szhatiya ob'yemnykh utepliteley dlya proyektirovaniya teplozashchitnoy odezhdy* [Mathematical model of the compression process of volumetric insulation materials for the design of thermal protective clothing]. Modern science-intensive technologies, 2018; no. 4, pp. 113–117. (In Russian).

8. Жуков, В. И. Современные средства измерения и оценки параметров текстильных материалов и изделий / В. И. Жуков, Э. В. Новиков, У. Ю. Титова. – Кострома : Костромской государственный университет, 2019. – 142 с.

Zhukov V. I., Novikov E. V., Titova U. Yu. *Sovremennyye sredstva izmereniya i otsenki parametrov tekstil'nykh materialov i izdeliy* [Modern means of measuring and evaluating the parameters of textile materials and products]. Kostroma, Kostroma State University, 2019; 142 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 17.02.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Anatoliy Filippovich Dolzhenkov, Dr. of Tech. Sci., Leading Researcher;

e-mail: a.dolzhenkov@80.mchs.gov.ru;

Tatyana Olegovna Moroz, Head of Department; e-mail: t.moroz@80.mchs.gov.ru

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

283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 332-78-43

EVALUATION OF RESCUERS PROTECTIVE CLOTHING EFFECTIVENESS WHEN EXPOSED TO HIGH-TEMPERATURE FACTORS

Objective. Study of heat flow thermal impact nature of varying density on a rescuer and time substantiation of rescuer stay under various temperature conditions.

Methods. Analysis and generalization of theoretical and experimental studies results of the protective clothing effectiveness. Substantiation of the methods nomenclature for studying contact and non-contact physical and chemical specifications of thermal protective fabrics used for manufacture of heat-resistant protective clothing for rescuers.

Results. Dependences of heat flow impact degree of different density on human skin have been obtained and requirements for heat-protective clothing of a rescuer have been formulated. Approaches to predicting the time that is theoretically sufficient for receiving second-degree burns as a result of heat flow impact on a rescuer have been substantiated.

Scientific novelty. Dependence has been identified between the protection degree of firefighter-rescuer and thermal conductivity of protective clothing special material, upper material ability to reflect thermal radiation and its flammability.

Practical value. The results obtained made it possible to substantiate the heat protective clothing requirements of a rescuer used under the heat flow thermal influence of different densities and the time of a rescuer's stay under different temperature conditions.

Keywords: *heat protective clothing; thermal destruction; firefighter-rescuer; heat flow; heat resistance; convective heating.*

For citation: Dolzhenkov A. F., Moroz T. O. Evaluation of rescuers protective clothing effectiveness when exposed to high-temperature factors. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 55-60. EDN PIQHAW

УДК 622.867.324

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

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

Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-45

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ФУТЛЯРА ШАХТНОГО САМОСПАСАТЕЛЯ

Цель. Определение путей совершенствования защитного футляра шахтного самоспасателя в части эргономических и эксплуатационных показателей.

Методы. Аналитические методы исследования факторов, негативно влияющих на защитный футляр шахтного самоспасателя.

Результаты. Рассмотрены этапы совершенствования защитных футляров шахтных самоспасателей.

Научная новизна. Проанализированы требования к футляру шахтного самоспасателя, к материалам для его изготовления, определены наиболее перспективные из них.

Практическая значимость. В результате анализа определены наиболее перспективные материалы, которые могут быть применены для изготовления футляра шахтного самоспасателя.

Ключевые слова: *дыхательный аппарат; средства индивидуальной защиты органов дыхания; самоспасатель; защитный футляр.*

Для цитирования: *Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И. Совершенствование защитного футляра шахтного самоспасателя // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 61–67. EDN XMGMJM*

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Обеспечение горнорабочих эффективными средствами защиты органов дыхания является одной из важных и актуальных проблем безопасного ведения работ в угольной промышленности. Особенно остро эта проблема стоит для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, взрывам метана и пожарам. В настоящее время работники таких шахт обеспечиваются индивидуальным дыхательным аппаратом – самоспасателем типа ШСС-1 с химически связанным кислородом, с гарантированным временем защитного действия 60 мин и сроком службы 5 лет со дня изготовления.

В жестких условиях эксплуатации в шахтах футляр самоспасателя постоянно подвергается воздействию климатических и химических факторов: рудничного воздуха, насыщенного влагой при температуре от 10 до 40 °С и содержащего агрессивные примеси (сернистый газ, сероводород, окислы азота, углекислый газ); шахтных вод, среда которых может быть от кислой до щелочной при содержании наиболее агрессивных компонентов – хлор- и сульфат-ионов. Кроме того, в процессе ношения футляр самоспасателя испытывает значительные механические нагрузки: удары о шахтную крепь, о породу и уголь, особенно при передвижении в лавах маломощных пластов. В связи с этим к футляру самоспасателя предъявляют ряд особых требований, обеспечивающих безопасность пользователя.

Анализ последних исследований и публикаций. К средствам индивидуальной защиты органов дыхания в настоящее время предъявляется комплекс требований, обеспечивающих возможность их использования

по назначению. Это показатели защитной эффективности, надежности, стойкости к внешним воздействиям, эргономические и др. Указанные требования регламентированы в настоящее время ГОСТ 12.4.292-2023, который распространяется на изолирующие самоспасатели с химически связанным кислородом, предназначенные для экстренной защиты органов дыхания в непригодной для дыхания атмосфере при эвакуации или в ожидании помощи [1, 2]. Стандарт устанавливает требования: конструктивные, по назначению, по стойкости к внешним воздействиям, а также требования безопасности и методы их проверки.

Температура окружающей среды, при которой самоспасатели должны обеспечивать защиту, составляет величину от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

Применяемые для изготовления самоспасателя материалы, непосредственно соприкасающиеся с кожей пользователя, не должны оказывать раздражающего или иного вредного воздействия на человека. Самоспасатели, особенно предназначенные для подземных работ, должны быть устойчивы к механическим воздействиям: выдерживать испытание на транспортирование, сохранять работоспособность после воздействия вибрационной нагрузки с частотой 50–60 Гц, а также после падения с высоты 1,5 м на бетонную поверхность, должны быть стойкими к раздавливанию усилием 98 кН в вертикальном и наклонном положениях и усилием 392 кН – в горизонтальном положении.

Масса самоспасателей с номинальным временем защитного действия до 30 мин не должна превышать 2,5 кг; с временем защитного действия 30...60 мин – 3,5 кг.

К самоспасателям предъявляются следующие конструктивные требования:

- должны отсутствовать выступающие детали или острые грани, которые могли бы цепляться за окружающие предметы при движении человека в узких проходах;
- поверхность любой контактирующей с пользователем части самоспасателя не должна иметь острых краев или заусенцев;
- наружная поверхность самоспасателя должна легко очищаться;
- конструкцией самоспасателя, в частности, замка футляра должны быть обеспечены удобство и быстрота вскрытия и исключена возможность случайного вскрытия по оплошности при ношении.

В случае использования самоспасателей во взрывоопасной среде составные части самоспасателей, которые могут быть подвержены ударам при эксплуатации, должны быть изготовлены из материалов, обеспечивающих фрикционную искробезопасность, а сами самоспасатели должны быть антистатическими – сопротивление изоляции неметаллических частей самоспасателя должно быть не более 10^9 Ом [1–3].

Самоспасатель должен быть герметичен, не должно быть проникновения внешней атмосферы в аппарат, а корпус (футляр) и замок (запорное устройство) должны быть защищены от коррозии. Т. е., помимо конструктивных требований к самоспасателю, футляр шахтного самоспасателя также должен соответствовать определенным условиям:

- футляр должен иметь форму, удобную для ношения дыхательного аппарата и не препятствующую передвижению по горным выработкам малого сечения;
- состоять из корпуса и крышки, обеспечивающих надежную герметизацию;
- быть герметичным при внешнем пневматическом давлении (4900 ± 200) Па;

- конструкция футляра и его замка должна быть удобной при вскрытии, технологичной и рассчитанной на массовый выпуск;

- использованный для изготовления футляра материал должен быть недорогостоящим и недефицитным, обеспечивающим фрикционную искробезопасность, он не должен загораться в контакте с регенеративным продуктом, которым снаряжен самоспасатель, и выделять вредные или пахнущие вещества в условиях эксплуатации.

Для футляров шахтных самоспасателей в качестве конструкционного материала вначале была применена листовая углеродистая сталь общего назначения с лакокрасочным покрытием или покрытием молотковой эмалью, но данный материал футляра не обеспечивал гарантированного сохранения работоспособности шахтного самоспасателя.

У самоспасателей для гражданского населения, появившихся в последнее время в РФ, отсутствует необходимость столь жестких требований к параметрам футляра. У самоспасателей СПИ-20 и СПИ-50 футляр представлен коробкой, рабочая часть уложена в герметичный трёхслойный пакет. Рабочая часть самоспасателя УДС-15 укладывается в пакет из трехслойного пленочного материала, который затем упаковывается в сумку, предохраняющую рабочую часть от попадания влаги, масла и механических повреждений [3, 4].

Цель исследования – определение путей совершенствования защитного футляра шахтного самоспасателя.

Результаты исследований. Футляр самоспасателя предохраняет рабочую часть от механических повреждений, попадания воды, масла, воздействия влаги окружающего воздуха при транспортировании, хранении и эксплуатации по назначению. Опломбированный определенным образом, футляр не позволяет производить его несанкционированное вскрытие.

Многолетний опыт эксплуатации на угольных шахтах изолирующих самоспасателей в корпусе из углеродистой стали показал, что лакокрасочное покрытие (эмаль ПФ-133 по грунтовке ГФ-0119) неэффективно в шахтных условиях, в которых аппараты подвергаются воздействию абразивных, климатических, механических и химических факторов производственной среды, в том числе и шахтного воздуха с температурой до 40 °С и относительной влажностью до 100 %. В обводненных выработках на самоспасатель воздействуют шахтные воды, агрессивность которых, выраженная в РН среды, может быть от 4 до 9 (от кислой до щелочной среды), а содержание компонентов хлор- и сульфат-ионов достигает более 1000 мг/л. Поэтому на некоторых шахтах самоспасатели в корпусе из углеродистой стали подвергаются сильной коррозии, вплоть до образования сквозных отверстий в защитном футляре, что, следовательно, приводит к преждевременному выходу аппаратов из строя.

Одной из тенденций развития современных изолирующих дыхательных аппаратов является постепенное увеличение доли пластмассы в конструкциях дыхательных аппаратов. Пластические массы (пластмассы) – композиционные материалы на основе полимеров, содержащие различные компоненты, придающие определенные свойства материалам, улучшая механические, термические, теплоизоляционные, диэлектрические свойства, а также снижающие усадку.

Полимерные материалы обладают высокой химической стойкостью, хорошими тепло- и электроизоляционными свойствами. К недостаткам полимерных

материалов относится возможность их деструкции и изменения прочностных характеристик в процессе хранения и эксплуатации. Отрицательным свойством полиэтилена и всех других пластмасс является способность накапливать на своей поверхности электрический заряд, что представляет опасность при эксплуатации в шахтах изделий из него. Пример использования полимерных материалов – футляр самоспасателя ШСС-ТМ (разработанный ОАО «Корпорация «Росхимзащита»), состоящий из антистатичной пластмассы, дополнительно усиленной вспененным компаундом [5].

Технические требования к материалам футляра изолирующих дыхательных аппаратов предъявляются, исходя из условий эксплуатации самоспасателей: это отсутствие выделения вредных веществ при хранении при температурах от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$, стойкость к воздействию открытого пламени, к токсичным продуктам в заданных концентрациях, самозатухаемость, газо- и влагонепроницаемость, ударопрочность, морозостойкость.

В известных зарубежных самоспасателях SSR-60B, SSR 30/100, Biocell и др. для изготовления футляров используются композиционные материалы на основе полиамидов и ударопрочных сополимеров: полипропилен, полиэтилен.

В НИИ «Респиратор» для покрытий футляра из углеродистой стали были опробованы масляно-лаковые и глифталевые материалы, которые наносились на металл распылением или окунанием, образуя необратимое покрытие в процессе сушки. Проведенные испытания показали, что ни одно из испытанных лакокрасочных покрытий не обеспечивало эффективную защиту футляра от коррозии. В связи с этим изыскание новых, более эффективных лакокрасочных покрытий для футляра шахтного дыхательного аппарата самоспасателя стало актуальной задачей.

Для шахт с особо агрессивными шахтными водами (шахта им. А. Засядько, ДНР) изготавливались отдельные партии самоспасателя в корпусе из нержавеющей стали, однако массовое производство таких корпусов невозможно из-за высокой стоимости и трудности изготовления.

Изучение возможности использования для изготовления защитного футляра самоспасателя пластических масс, выпускаемых отечественной промышленностью: полиэтилена низкого давления, полипропилена, полистирола ударопрочного, акрилонитрилбутадиенстирольного пластика АБС-220, показало следующее.

Механические свойства полиэтилена низкого давления черного цвета (полиэтилен-209) удовлетворяют требованиям к жесткости и прочности футляра. Однако, несмотря на химическую стойкость и достаточную износостойкость, недостатком этого материала является высокий коэффициент технологической усадки (до 4 %). Для полипропилена характерны высокая прочность, износостойкость и химическая стойкость, значительно меньший коэффициент усадки, чем у полиэтилена. При том, что деформация деталей при изготовлении из него футляров была незначительной и при сборке самоспасателей обеспечивалась необходимая герметичность, от применения данного материала пришлось отказаться ввиду его малой морозостойкости.

При хороших прочностных характеристиках и самой малой усадочной деформации полистирола ударопрочного, футляры из этой пластмассы подвергались старению и растрескивались через 1,5–2 года, что не соответствует требованию к сроку службы самоспасателя.

Акрилонитрилбутадиенстирольный пластик ABS-220, широко применяемый в автомобильной промышленности для изготовления деталей кузова, отличается удовлетворительными механическими свойствами и морозостойкостью, однако изготовленный из него футляр самоспасателя оказался недостаточно жестким.

Таким образом, из четырех апробированных пластмасс наиболее пригодным оказался полиэтилен-209. Аппарат с экспериментальным футляром из этой пластмассы с толщиной стенок 4–6 мм был устойчив к механическим воздействиям, после которых герметичность аппарата сохранилась. Воздействие агрессивной шахтной среды не сказывалось на состоянии внешнего вида футляра и не влияло на сохранение герметичности. Также полиэтилен-209 обеспечивал получение отливкой доброкачественных деталей.

Впоследствии было установлено, что футляр самоспасателя (ШСМ-30), изготовленный из полиэтилена-209, при хранении в течение двух лет теряет герметичность вследствие деформации корпуса и крышки из-за разнотолщинных стенок, т. е. из-за неудачной конструкции деталей.

В связи с этим были разработаны новые чертежи корпуса и крышки самоспасателя, толщина стенок которых приблизительно одинакова в любом сечении. Изготовленные из термостабилизированного полистирола средней ударпрочности новые корпуса и крышки отличались незначительной поводкой, что обеспечивало герметичность корпуса после галтовки в течение 18 мин. При этом для лучшей герметичности использовалось уплотнительное кольцо не круглого, а трапецеидального сечения. После галтовки было установлено, что крепление к корпусу и крышке металлических деталей замка с помощью кнопок с острыми кромками, врезающимися при запрессовке в пластмассу, не отличается эксплуатационной надежностью, так как происходит ослабление. В связи с этим металлические детали замка были прикреплены к корпусу и крышке с помощью заклепок, установленных в отверстиях на герметизирующей пасте. Измененный футляр подвергся галтовке в течение 18 мин и сбрасыванию с высоты 1,5 м на бетонное основание в направлении трёх взаимно перпендикулярных осей. Герметичность футляра сохранялась. Исследованиями, проведенными МакНИИ, установлено, что данный футляр самоспасателя относится к искробезопасным объектам. На основании результатов этих испытаний было выдано заключение о возможности его использования в шахте.

На основании проведенных исследований в качестве материала для футляра самоспасателя ШСС специалистами НИИ «Респиратор» предложен полимер грилон, основными компонентами которого являются полиамиды (полиамид-6, полиамид-66) и их сополимеры¹. Полимер грилон был использован в качестве материала для футляра серийно выпускаемых самоспасателей ШСС-1П и Си-30 (разработчик – НИИГД «Респиратор», изготовитель – ООО «ДЗГА»).

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Усовершенствование шахтных самоспасателей происходит в направлении поиска и (в дальнейшем) применения материалов футляров и технических решений, обеспечивающих максимальную защиту аппаратов от вредных внешних (механических и коррозионных) воздействий. Одна из тенденций последнего времени – разработка

¹ Иностранные полимеры и их аналоги отечественного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.simplexnn.ru/9909> (19.02.2025)

футляров из ударопрочной антистатичной пластмассы, не подверженной воздействию коррозионных шахтных вод.

Список литературы / References

1. Чуйков, А. М. Средства индивидуальной защиты от вредных веществ на производстве / А. М. Чуйков, Г. И. Сметанкина, О. В. Дорохова // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2019. – Т. 1, № 10. – С. 472–474.

Chuikov, A. M., Smetankina, G. I., Dorokhova, O. V. *Sredstva individualnoy zashchity ot vrednykh veshchestv na proizvodstve* [Means of individual protection against harmful substances in the manufacture]. Modern technologies for civil defense and emergency response. 2019; no. 1 (10), pp. 472-474. (In Russian)

2. Как сохранить жизнь шахтера в аварийных условиях шахты / А. С. Голик, В. Б. Попов, А. С. Ярош, О. С. Токарев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 3. – С. 63–68.

Golik, A. S., Popov, V. B., Yarosh, A. S., Tokarev, O. S. *Kak sokhranit zhizn shakhtera v avariynykh usloviyakh shakhty* [How to save the life of a miner in the mine emergency situation]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2018; no. 3, pp. 63-68. (In Russian)

3. Современные средства изолирующей защиты органов дыхания гражданского населения при пожарах и других чрезвычайных ситуациях / С. В. Гудков, Н. В. Крылова, С. Б. Путин, А. Ю. Хромов // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 2. – С. 58–62. EDN KNUAAV

Gudkov, S. V., Krylova, N. V., Putin, S. B., Khromov, A. Yu. *Sovremennyye sredstva izoliruyushchey zashchity organov dykhaniya grazhdanskogo naseleniya pri pozharakh i drugikh chrezvychaynykh situatsiyakh* [Modern means of isolating protection of the respiratory organs of the civilian population during fires and other emergency situations]. Fire and Explosion Safety. 2008; no. 17 (2), pp. 58-62. (In Russian)

4. Ятчишин, М. С. Средства индивидуальной защиты органов дыхания в условиях чрезвычайных ситуаций / М. С. Ятчишин, Б. В. Буданов // Научный альманах Центрального Черноземья. – 2022. – № 1-9. – С. 452–467. EDN NSXUUD

Yatchishin, M. S., Budanov, B. V. *Sredstva individual'noy zashchity organov dykhaniya v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy* [Personal respiratory protection equipment in emergency situations]. Scientific almanac of the Central Black Earth Region. 2022; no. 1-9, pp. 452-467. (In Russian)

5. Гудков, С. В. Современное состояние и перспективы развития отечественных шахтных самоспасателей. Часть 2. Новые разработки для реализации многоступенчатого подхода к обеспечению выхода подземного персонала угольных шахт из непригодной для дыхания атмосферы / С. В. Гудков, И. А. Смирнов // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 10. – С. 52–55. EDN RDKBTT

Gudkov, S. V., Smirnov, I. A. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya otechestvennykh shakhtnykh samospasateley. Chast' 2. Novyye razrabotki dlya realizatsii mnogostupenchatogo podkhoda k obespecheniyu vykhoda podzemnogo personala ugol'nykh shakht iz neprigodnoy dlya dykhaniya atmosfery* [Current status and development prospects of domestic mine self-rescuers. Part 2. New developments for the implementation of a multi-stage approach to ensuring the exit of underground coal mine personnel from an atmosphere unsuitable for breathing]. Occupational safety in industry. 2013; no. 10, pp. 52-55. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Г. И. Пейтибаев

Дата поступления рукописи 10.04.2025

Дата опубликования 19.06.2025

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, Senior Researcher; e-mail: lzborschik@yandex.ru;
Ruslan Sergeevich Pletenetskiy, Senior Researcher; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;
Viktor Ivanovich Frantsev, Lead Engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma st., 157. Phone: +7 (856) 332-78-45

IMPROVING MINE SELF-RESCUER PROTECTIVE CASE

Objective: Identify the ways to improve mine self-rescuer protective case in terms of ergonomic and operational indicators.

Methods. Analytical methods for studying factors that negatively affect mine self-rescuer protective case.

Results. Stages of improving the protective cases of mine self-rescuers have been considered.

Scientific novelty. It has been established that mine self-rescuer protective case, as the main Respiratory system protective device for underground accidents, must be rigid and resistant to significant mechanical impacts and preferably made of corrosion-resistant, impact-resistant materials.

Practical significance. As a result of the study, the most promising materials for application in mine self-rescuer case have been identified.

Key words: *breathing apparatus; respiratory system protective device; self-rescuer; protective case.*

For citation: Zborshchik L. A., Pletenetskiy R. S., Frantsev V. I. Improving mine self-rescuer protective case. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 61-67. EDN XMGMJM

УДК 622.867:533.68

Денис Анатольевич Федоров, главный специалист¹, аспирант²; e-mail: d.fedorov@vgsch.mchs.gov.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие*

«Военизированная горноспасательная часть» МЧС России,

²*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего*

образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

115193 Москва, ул. Петра Романова, 7, стр. 1. Тел.: + 7 (495) 677-36-65

ВЛИЯНИЕ ЛОБОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель работы. Определение лобового аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием, для обоснования увеличения дополнительной депрессии при перераспределении воздушных потоков.

Методы. Аналитические исследования параметров проветривания горных предприятий с учетом аэродинамических сопротивлений горношахтного оборудования.

Результаты. Предложена методика определения коэффициента лобового аэродинамического сопротивления, приведен пример влияния лобового аэродинамического сопротивления на перераспределение воздушных потоков и увеличение дополнительной депрессии, обусловленной лобовым аэродинамическим сопротивлением.

Научная новизна. Впервые предложено к лобовым аэродинамическим сопротивлениям относить только движущиеся объекты в горных выработках предприятий.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для анализа состояния шахтной вентиляционной сети, повышения точности расчетов режимов проветривания, что позволит повысить общий уровень безопасности и эффективность ведения горных работ.

Ключевые слова: шахта; лобовое аэродинамическое сопротивление; проветривание; безопасность; эксперимент; методика.

Для цитирования: Федоров Д. А. Влияние лобовых аэродинамических сопротивлений на безопасность горных предприятий // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 68–75. EDN JJPLQV

Постановка проблемы. Проветривание горнодобывающих предприятий при добыче полезных ископаемых подземным способом является важнейшим вопросом промышленной безопасности на опасных производственных объектах. В действующих нормативных документах предусмотрены общие требования о распределении воздуха в горных выработках при нормальном и аварийном режимах проветривания с помощью вентиляционных устройств, а также требования к обеспечению аэрологической безопасности^{1, 2}. Однако технологическое развитие подземных горных работ и внедрение мощной современной техники на опасных производственных объектах требует уточнения отдельных параметров подземного проветривания, в частности, определения величины аэродинамического сопротивления.

Одним из приоритетных направлений является определение и учет величины лобового аэродинамического сопротивления для различных типов самоходного

¹ Приказ Ростехнадзора от 18.12.2020 № 507 (ред. от 23.06.2022) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103/>

² Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 506 (ред. от 08.06.2022) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт» – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012300105>

горного оборудования, таких как шахтных автосамосвалов (далее – ШАС) и погрузочно-доставочных машин (далее – ПДМ).

Анализ последних исследований. По состоянию за 2023 г. подземным способом добыто 97,7 млн т угля, при этом газовыми являются около 86 % угольных шахт, в том числе примерно 66 % – с III категорией по метану и выше³ (рис. 1).

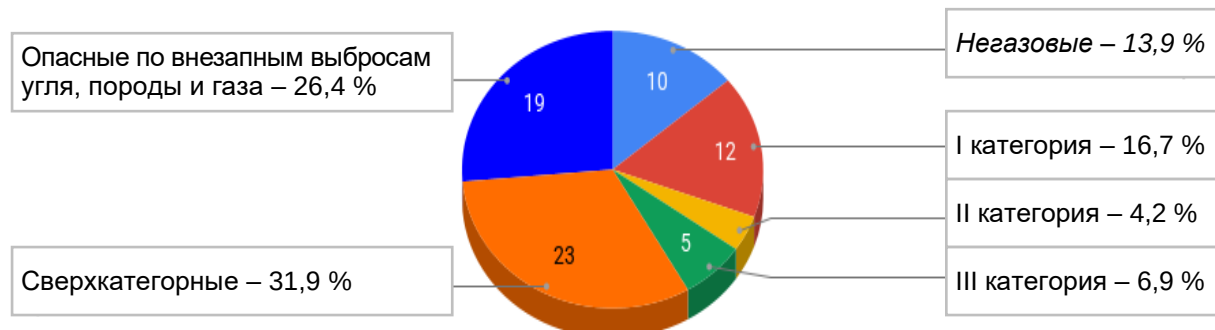


Рис. 1. Категорийность угольных шахт России

На угольных шахтах около 512 участков, опасных по слоевым скоплениям метана. И только по официальной статистике на угольных шахтах Кемеровской области – Кузбасса за 2024 г. было зафиксировано более 850 случаев загазирования, из них более 250 – аварийные. Часть случаев загазирования непосредственно связана с аэродинамическим сопротивлением горношахтного оборудования.

В работе [1] авторами предложен порядок расчета величины лобового аэродинамического сопротивления только неподвижного горного оборудования. Однако, рассматривая проветривание откаточного горизонта действующего горного предприятия, можно увидеть, что при движении ШАС или ПДМ в порожняковом квершлаге происходит временное перераспределение воздушных потоков, увеличивается аэродинамическое сопротивление выработки (рис. 2).

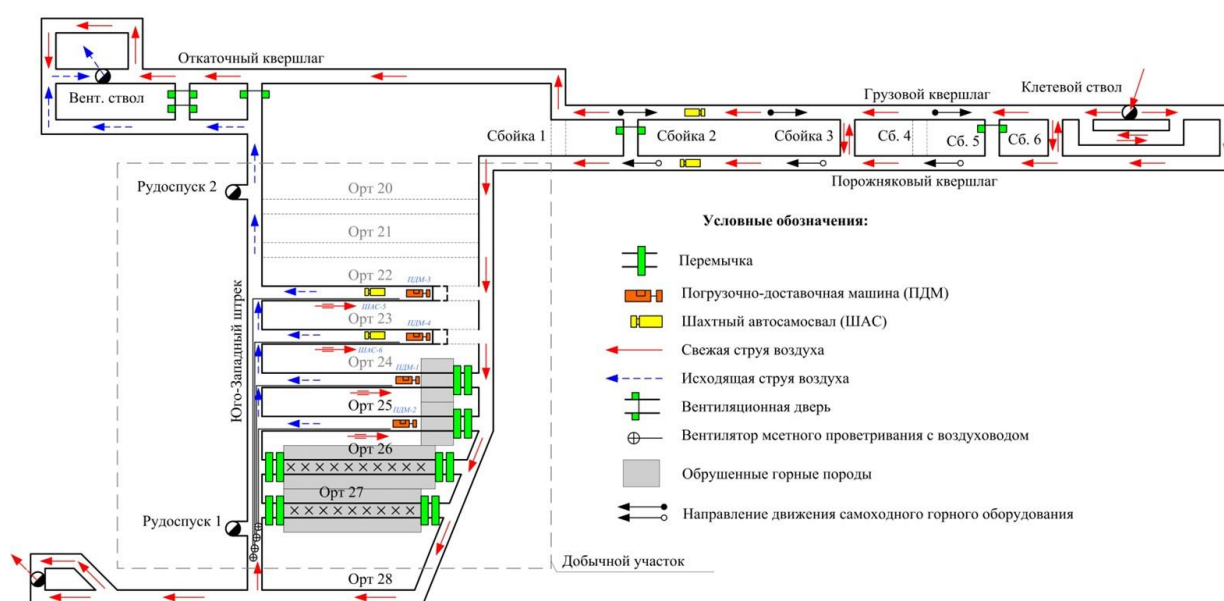


Рис. 2. Вентиляционный план откаточного горизонта

³ Официальный сайт федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Сибирское управление. Информация по добыче угля на шахтах России – URL: <https://usib.gosnadzor.ru/info/>

Большая часть воздуха идет по грузовому квершлагу до откаточного штрека и далее до вентиляционного ствола, а уменьшение количества воздуха в порожняковом квершлагте приводит к падению расхода в Юго-Западном штреке, в котором установлена группа вентиляторов местного проветривания, обеспечивающая свежей струей воздуха добычные и проходческие участки (орты 22–25).

Одной из причин данной ситуации является отсутствие учёта всех видов аэродинамического сопротивления. Результаты исследований сопротивления трения горной крепи и местных сопротивлений приведены в статьях [2–4], однако в этих работах не учитывалось лобовое аэродинамическое сопротивление самоходного горного оборудования.

Цель исследования. Определение лобового аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием, для обоснования увеличения дополнительной депрессии при перераспределении воздушных потоков.

Материалы и результаты исследований. Лобовое аэродинамическое сопротивление – общее аэродинамическое сопротивление тела потоку обтекаемого воздуха [4, 5]. В аэродинамике под лобовым аэродинамическим сопротивлением понимают силу, препятствующую движению тел в газах, в рудничной аэрологии к лобовым аэродинамическим сопротивлениям относят только движущиеся объекты ПДМ, ШАС, вагонетки, электровозы и т. п., клетки, скипы и люди, расстрелы стволов, рудничные стойки, отдельно стоящее неподвижное горное оборудование относят к местным сопротивлениям.

Величина потери напора при обтекании воздухом препятствия (лобовое аэродинамическое сопротивление) $h_{л.}$, Па, определяют из выражения

$$h_{л.} = h_{об.} - h_{тр.} \pm h_{ск.}, \quad (1)$$

где $h_{об.}$ – суммарная величина потерь напора на лобовом аэродинамическом сопротивлении вследствие обтекания препятствия, Па;

$h_{тр.}$ – величина потери напора на трение воздуха о борта, почву и кровлю выработки, Па;

$h_{ск.}$ – разность скоростных напоров при наличии разных скоростей в замерных сечениях, Па.

Также лобовое аэродинамическое сопротивление $h_{л.}$, Па, можно определить по формуле

$$h_{л.} = \frac{\gamma S_m c u_B^2}{gS}, \quad (2)$$

где c – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, 1;

γ – удельный вес воздуха, кгс/м³;

u_B – средняя скорость потока в выработке у тела, формирующего сопротивление, м/с:

$$u_B = \frac{v_B S}{(S - S_m)}; \quad (3)$$

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

v_B – средняя скорость потока в выработке, м/с;

S_M – миделево сечение тела, м²;

S – площадь поперечного сечения горной выработки, м².

Тогда выражение для определения коэффициента лобового аэродинамического сопротивления c , 1, имеет вид

$$c = \frac{gSh_{л.}}{\left(\gamma S_M \cdot \left(\frac{v_B S}{(S - S_M)} \right)^2 \right)} . \quad (4)$$

Величину потери напора на трение $h_{тр.}$, Па, вычисляют по формуле:

$$h_{тр.} = \frac{\alpha PLQ^2}{S^3}, \quad (5)$$

где α – коэффициент трения воздуха о стенки, 1, определяют экспериментальным путем или принимают по ГОСТ Р 57718 – 2017;

P – периметр горной выработки, м;

L – длина участка, на котором проводится измерение перепадов давления, м, должна быть не менее 100 м;

Q – расход воздуха в горной выработке, м³/с.

Величину потери напора на лобовом аэродинамическом сопротивлении вследствие обтекания препятствия $h_{об.}$, Па, определяют в натурных условиях, располагая статические трубки с обеих сторон лобового аэродинамического сопротивления. Опыты в натурных условиях необходимо проводить при числах Рейнольдса, $Re > 100\,000$.

Разность скоростных напоров при наличии разных скоростей в замерных сечениях, $h_{ск.}$, Па, определяют из выражения

$$h_{ск.} = \frac{(k_1 v_{B1}^2 - k_2 v_{B2}^2) \gamma}{2g}, \quad (6)$$

где v_{B1} и v_{B2} – средняя скорость соответственно в первом и втором сечениях, м/с;

k_1 и k_2 – энергетические коэффициенты (коэффициенты кинетической энергии), соответственно в первом и втором сечениях, определяют по формуле

$$k_i = 0,81 + 282\alpha . \quad (7)$$

Таким образом, выражение (1) примет вид

$$h_{л.} = h_{об.} - \frac{\alpha PLQ^2}{S^3} \pm \frac{(k_1 v_{B1}^2 - k_2 v_{B2}^2) \gamma}{2}. \quad (8)$$

По формуле (4) определяют величину коэффициента лобового аэродинамического сопротивления c .

Измерения входящих в расчетные формулы величин необходимо проводить в горных выработках с учетом следующих особенностей:

- на прямолинейном участке горной выработки без наличия самоходной горной техники;
- на прямолинейном участке горной выработки с самоходной горной техникой без движения;
- на прямолинейном участке горной выработки (самоходная горная техника движется в том же направлении, что и воздух);
- на прямолинейном участке горной выработки (самоходная горная техника движется в противоположном направлении относительно движения воздуха).

Количество измеряемых параметров (величин) по разработанной методике может быть уменьшено при условии, что выбранный экспериментальный участок имеет выдержанное сечение, один тип крепи, в нем отсутствуют местные аэродинамические сопротивления. Располагаясь в одном сечении, необходимо произвести измерения следующих параметров:

- скорость движения воздуха, v_v , м/с;
- температура воздуха, T , °С;
- относительная влажность воздуха, W ;
- абсолютное атмосферное давление, p , Па;
- перепад давления, h , Па (для измерения депрессии необходимо записать длину (L , м) участка, на котором проводят измерение перепада давления, она должна быть не менее 100 м);
- периметр горной выработки, P , м;
- площадь сечения горной выработки, S , м².

Также необходимо зафиксировать следующие параметры:

- скорость движения самоходной горной техники (v_m , м/с) (при этом скорость в процессе движения не должна изменяться);
- марка и тип самоходного горного оборудования (машины);
- длина, ширина и высота самоходного горного оборудования (машины).

Экспериментальные исследования по определению величины депрессии лобового аэродинамического сопротивления и коэффициента лобового аэродинамического сопротивления необходимо произвести при разных скоростях движения самоходного горного оборудования (5 км/ч, 10 км/ч, 20 км/ч и – при возможности – 40 км/ч).

Схема проведения измерений при встречном движении самоходного горного оборудования и воздушного потока представлена на рис. 3.

Для определения величины лобового аэродинамического сопротивления разработана и опробована методика шахтных экспериментов и натурные исследования на нескольких рудниках, подтвердившие наличие дополнительного аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием. Так, на Кировском руднике дополнительная депрессия вырастает с 1 Па до 3–4,5 Па в зависимости от скорости движения самоходного горного оборудования (рис. 4).

Была проведена серия экспериментов на шахте «Шерегешская» в транспортном штреке горизонта +10 м. Депрессия горной выработки на 100-метровом участке, обусловленная только сопротивлением трения, равна 4 Па.

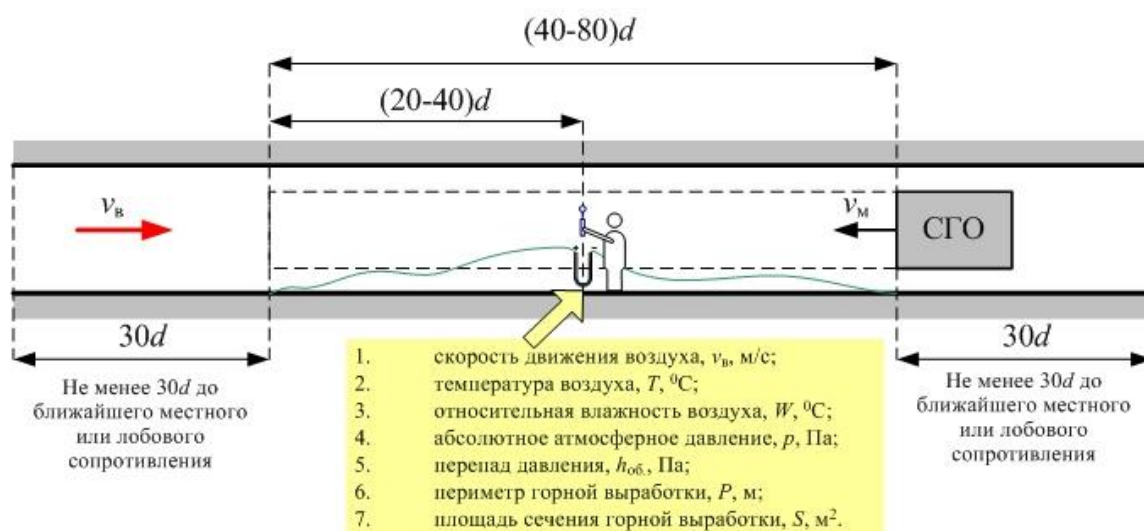


Рис. 3. Схема проведения измерений при встречном движении самоходного горного оборудования и воздушного потока (d – гидравлический диаметр, м, $d = 4S/P$)

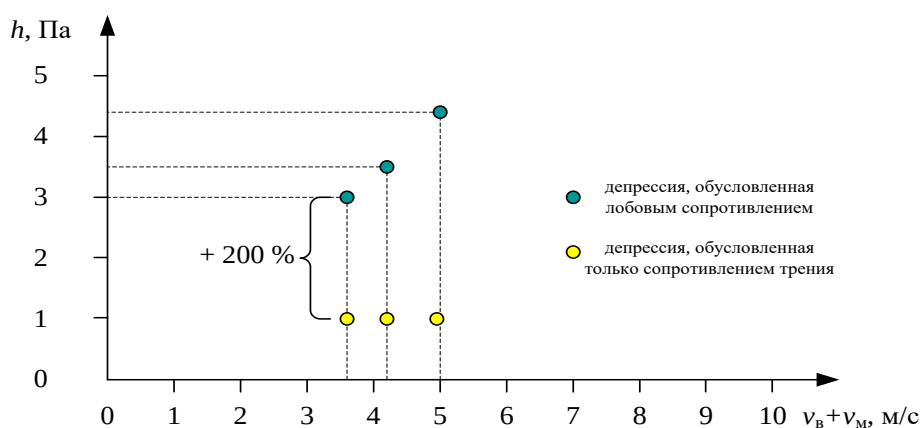


Рис. 4. Результаты натурных исследований на Кировском руднике

При наличии в горной выработке ШАС марки «НУУК-30» депрессия вырастает до 16 Па (рост в 4 раза), при движении ШАС со скоростью 5 км/ч депрессия вырастает до 25 Па (рост в 6,25 раза). Перекрытие сечения транспортного штрека горизонта +10 м при движении ШАС составляло не более 25 %. Уменьшение площади сечения горных выработок приведет к увеличению депрессии в выработках.

Таким образом, движение ШАС вызывает дополнительную депрессию и, как следствие, снижение расхода и скорости движения воздуха вследствие увеличения лобового аэродинамического сопротивления, влияющего на общешахтное аэродинамическое сопротивление. При этом возможны эпизоды нарушения проветривания, что, в свою очередь, может привести к кратковременному загазированию.

Выводы. Разработана и опробована методика определения лобового аэродинамического сопротивления, подтвердившая наличие аэродинамического сопротивления, обусловленного движущимся самоходным горным оборудованием.

Результаты применения данной методики могут быть использованы для анализа состояния шахтной вентиляционной сети, повышения достоверности расчетов проветривания, что позволит повысить общий уровень безопасности и эффективность ведения горных работ.

Список литературы / References

1. Горная аэродинамика: физико-химические закономерности и принципы / И. Е. Колесниченко [и др.] // Уголь. – 2018. – № 5 (1106). – С. 58–65.

Kolesnichenko, I. E., Artemyev, V. B., Kolesnichenko, E. A., Cherechukin, V. G., Lybomishchenko, E. I. *Gornaya aerodinamika: fiziko-himicheskie zakonomernosti I principi* [Mountain aerodynamics: physico-chemical patterns and principles]. *Coal*. 2018, no. 5 (1106), pp. 58-65. (In Russian)

2. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока / В. В. Смирняков, В. А. Родионов, В. В. Смирнякова, Ф. А. Орлов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71–81. – DOI 10.31897/PMI.2022.12. – EDN NVUPQR.

Smirnyakov, V. V., Rodionov, V. A., Smirnyakova, V. V., Orlov, F. A. [The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow]. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 71-81. (In Russian)

3. Левин, Л. Ю. Определение перепада давления на сопряжении вентиляционного ствола и канала ГВУ / Л. Ю. Левин, М. А. Семин, А. В. Зайцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S7. – С. 93–104.

Levin, L. Yu., Semin, N. A., Zaycev, A. V. *Opredelenie perepada davleniya na sopryagennii ventilyacionnogo stvola i kanala GVU* [Determination of the pressure drop at the interface of the ventilation shaft and duct main fan installation]. *Mining information and analytical bulletin*. 2015, no. S7, pp. 93-104. (In Russian)

4. Кобылкин, С. С. Анализ влияния местных сопротивлений горных выработок на общешахтное аэродинамическое сопротивление / С. С. Кобылкин, В. К. Ушаков, И. И. Кузнецов // Горная промышленность. – 2024. – № 2. – С. 93–96.

Kobylkin, S.S., Ushakov, V.K., Kuznetsov, I.I. *Analiz vliyaniya mestnih soprotivleniy gornih virabotok na obshcheshakhtnoe aerodinamicheskoe soprotivlenie* [Analysis of the effect of local mining resistances on overall mine aerodynamic drag]. *Mining industry*. 2024, no.2, pp. 93-96. (In Russian)

5. Оценка влияния местных сопротивлений на общее аэродинамическое сопротивление воздухопроводов / С.С. Кобылкин, О.С. Каледин, А.С. Кобылкин, С.А. Дядин // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета, г. Санкт-Петербург, 28–29 окт. 2015 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2015. – С. 91–92.

Kobylkin, S. S., Kaledin, O. S., Kobylkin, A. S., Dyadin, S. A. *Ocenka vliyaniya mestnih soprotivleniy na obshchee aerodinamicheskoe soprotivlenie vozduhovodov* [Assessment of the effect of local drag on the overall aerodynamic drag of air ducts]. *Mining in the 21st century: technology, science, education: materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 110th anniversary of the Mining Faculty, Saint-Petersburg, 28-29 October 2015*. 2015, pp. 91-92. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Е. А. Головченко
Дата поступления рукописи 20.05.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Denis Anatolyevich Fedorov, Lead Specialist ¹, Postgraduate Student²;

e-mail: d.fedorov@vgsch.mchs.gov.ru

¹ Federal State Unitary Enterprise «Paramilitary Mountain Rescue Unit» EMERCOM of Russia

² National University of Science and Technology «MISIS»

115193 Moscow, Petr Romanov st., 7/1. Phone: + 7 (495) 677-36-65

THE IMPACT OF SHOCK AERODYNAMIC RESISTANCE ON THE SAFETY OF MINE

Objective. Determination of frontal aerodynamic drag caused by moving self-propelled mining equipment.

Methods. Analytical studies of the ventilation parameters of mining enterprises, taking into account the aerodynamic resistances of mining equipment.

Results. The procedure for determining the coefficient of frontal aerodynamic drag is proposed, and an example of the effect of frontal aerodynamic drag on the redistribution of air flows and an increase in additional depression caused by frontal aerodynamic drag is given.

Scientific novelty. For the first time, it is proposed to classify only moving objects in mine workings as frontal aerodynamic resistance.

Practical significance. The results obtained can be used to analyze the condition of the mine ventilation network, improve the accuracy of ventilation calculations, which will improve the overall level of safety and efficiency of mining operations.

Key words: mine; frontal aerodynamic resistance; ventilation; safety; experiment; technique.

For citation: Fedorov D. A. The impact of shock aerodynamic resistance on the safety of mine. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 68-75. EDN JJPLQV

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [614.8-051:331.461]:001.891.34

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru

Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: petr63203@gmail.com

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-49

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ГОРНОСПАСАТЕЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПЛАНА ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ

Цель. Обоснование методического подхода к разработке мероприятий по обеспечению безопасности ведения аварийно-спасательных работ на основе оценки профессионального риска горноспасателя.

Методы. Анализ, обобщение и систематизация материалов по анализу опасностей и оценке риска, количественный и качественный метод.

Результаты. Обоснован методический подход к оценке профессионального риска при разработке мероприятий плана ликвидации аварий на угольных шахтах.

Научная новизна. Впервые разработаны алгоритмы анализа и оценки профессионального риска при разработке мероприятий плана ликвидации аварий на угольных шахтах.

Практическая значимость. Предложенный методический подход и разработанные алгоритмы позволяют оценить профессиональный риск горноспасателя на стадии разработки мероприятий плана ликвидации аварий.

Ключевые слова: *план ликвидации аварий; мероприятия; профессиональный риск; горноспасатель; алгоритмы анализа и оценка риска.*

Для цитирования: Мамаев В. В., Иваненко А. Ф., Мухин П. Е. Оценка профессионального риска горноспасателя при разработке мероприятий плана ликвидации аварий // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 76–83. – EDN XGJPOB

Постановка проблемы. В целях спасения шахтеров и ликвидации чрезвычайных ситуаций в первоначальный период их возникновения на угольных шахтах разрабатывается План ликвидации аварий (далее – ПЛА)¹. В настоящее время в нормативных правовых актах, Федеральных нормах и правилах, других нормативных документах РФ, регламентирующих требования в области промышленной безопасности и охраны труда, не в полной мере обеспечено нормативное регулирование и отсутствуют рекомендации по оценке риска при разработке мероприятий ПЛА на угольных шахтах и оценке профессионального риска горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ (далее – АСР). Кроме того, в заданиях, выдаваемых отделениям горноспасателей согласно мероприятиям ПЛА, не учитывают существенное изменение обстановки

¹ Правила безопасности в угольных шахтах, утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 507; Постановление Правительства РФ от 27.04.2018 № 517; Инструкция по порядку разработки ПЛА на угольных шахтах, утв. приказом Ростехнадзора от 27.11.2020 № 467

на аварийном участке, возможные сценарии развития аварии и возникающие при этом осложнения и угрозы, связанные с ними риски.

Задача исследований заключается в разработке методики применения риск-ориентированных подходов при составлении мероприятий ПЛА.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью использования научно-обоснованных подходов к решению задачи обеспечения безопасного ведения АСР на угольных шахтах.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительное количество научных работ и документов, посвящено вопросам охраны труда и промышленной безопасности на предприятиях угольной отрасли. Согласно ст. 10 Федерального закона № 116-ФЗ от 21.07.1997 предприятия, осуществляющие добычу полезного ископаемого подземным способом, обязаны планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий. Обязанности по спасению людей и ликвидации аварий на угольных шахтах возложены на профессиональные горноспасательные службы и формирования (далее – ВГСЧ), которые в повседневной деятельности и при ведении АСР руководствуются своими внутренними нормативными документами.

Анализ публикаций по тематике обеспечения безопасности горноспасателей при ведении АСР в угольных шахтах [1–8] показал, что практически все авторы оценивают эту проблему как очень серьезную. Подтверждение этому – значительный уровень травматизма среди горноспасателей, в том числе – со смертельным исходом. В настоящее время отсутствует научно обоснованный риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности горноспасателей при ведении АСР в угольной шахте.

Цель исследования. Обоснование методического подхода к разработке мероприятий по обеспечению безопасности ведения аварийно-спасательных работ на основе оценки профессионального риска горноспасателя.

Результаты исследований. Основная цель анализа и оценки риска чрезвычайной ситуации (далее – ЧС) – идентификация опасностей и их качественное описание, определение вероятности возникновения, развития и возможных последствий ЧС, а также установление степени опасности ЧС для своевременного предотвращения негативного воздействия опасных и/или вредных факторов.

Оценку риска проводят с целью получения объективных данных, на основании которых будут разработаны мероприятия ПЛА с использованием риск-ориентированных подходов, что будет способствовать повышению уровня безопасности горноспасателей при выполнении АСР в угольных шахтах.

В процессе оценки риска ЧС на угольной шахте в зависимости от поставленных задач применяют качественные и/или количественные методы определения вероятности возникновения ЧС, ожидаемого ущерба, а также возможных последствий. Выбор метода оценки зависит от цели исследования, требуемой детализации, типа и диапазона анализируемого риска, возможных последствий ЧС, наличия информации и ее объема.

Результаты оценки риска могут быть представлены качественными и/или количественными показателями, в том числе – включать в себя характеристики основных опасностей возникновения, развития и последствий ЧС. Так, при количественной оценке риск может быть выражен в виде произведения вероятности возникновения ЧС на ожидаемый ущерб.

Существуют следующие способы оценки риска:

- измерение и сравнение результатов с нормативами;
- расчеты на основе статистических данных с применением методов теории вероятностей; моделирование сценариев развития ЧС;
- экспертные оценки.

При оценке риска возникновения ЧС (R) рекомендуется использовать формулу

$$R = p_f U, \quad (1)$$

где R – количественная оценка риска, руб.;

p_f – вероятность появления в течение определенного периода (например, в течение года) потенциально опасных факторов, следствием которых может быть ЧС, 1;

U – ожидаемый ущерб от воздействия рассматриваемых опасных факторов в случае возникновения ЧС, руб.

Вероятность (p_f), как правило, выражается действительным числом в интервале от 0 (событие невозможно) до 1 (событие обязательно произойдет) и является функцией от надежности работы технических устройств, эффективности деятельности персонала, природно-технологических условий функционирования объекта

$$p_f = f(H_{\text{ч}}, H_{\text{т}}, H_{\text{с}}), \quad (2)$$

где $H_{\text{ч}}$ – эффективность деятельности персонала, 1;

$H_{\text{т}}$ – надежность технических устройств, 1;

$H_{\text{с}}$ – надежность природно-технологических условий среды, 1.

Ожидаемый ущерб (U) определяется в форме прямого и косвенного материального ущерба от ЧС.

Если в течение рассматриваемого периода может произойти несколько ЧС, то показателем риска служит сумма рисков от всех возможных ЧС за этот промежуток времени, а именно:

$$R = \sum_{i=1}^n p_i U_i, \quad (3)$$

где R – количественная оценка риска, выражаемая в тех же показателях, что и ущерб, руб.;

n – число вариантов возможных ЧС, включая нулевой, $i=1$;

p_i – вероятность наступления ЧС i -го варианта, 1; $[p_i] = \text{год}^{-1}$;

U_i – величина ожидаемого ущерба i -го варианта ЧС, руб.

В общем случае, когда ущерб может быть вследствие различных и независимых друг от друга ЧС, средний риск может быть определен согласно следующей формуле:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} U_{ij}, \quad (4)$$

где P_{ij} – вероятность получения ущерба U_{ij} при наступлении ЧС j -го типа, 1.

Качественную оценку риска применяют при высокой степени неопределенности происходящих процессов, отсутствии или недостатке статистических данных и достоверной информации.

В данной статье авторами предлагается методический подход к анализу и оценке профессионального риска горноспасателя во время ведения АСР (рис.), который включает следующие этапы:

- получение достоверных сведений о плане горных работ на угольной шахте;
- получение максимально полной информации о маршруте движения горноспасательного отделения, включая места возможного нахождения застигнутых аварией людей, их числа и возможности самостоятельного их выхода из аварийного участка, горно-геологические и горнотехнические условия, состояние горных выработок и путей передвижения по маршруту, показания датчиков аппаратуры объективного автоматического контроля состояния аэрогазовой обстановки, наличие электроэнергии, воды в пожарно-оросительном трубопроводе, сжатого воздуха, средств связи и т. п.;
- получение информации об уровне профессиональной, физической и психологической подготовки как подразделения ВГСЧ в целом, так и отдельных горноспасателей;

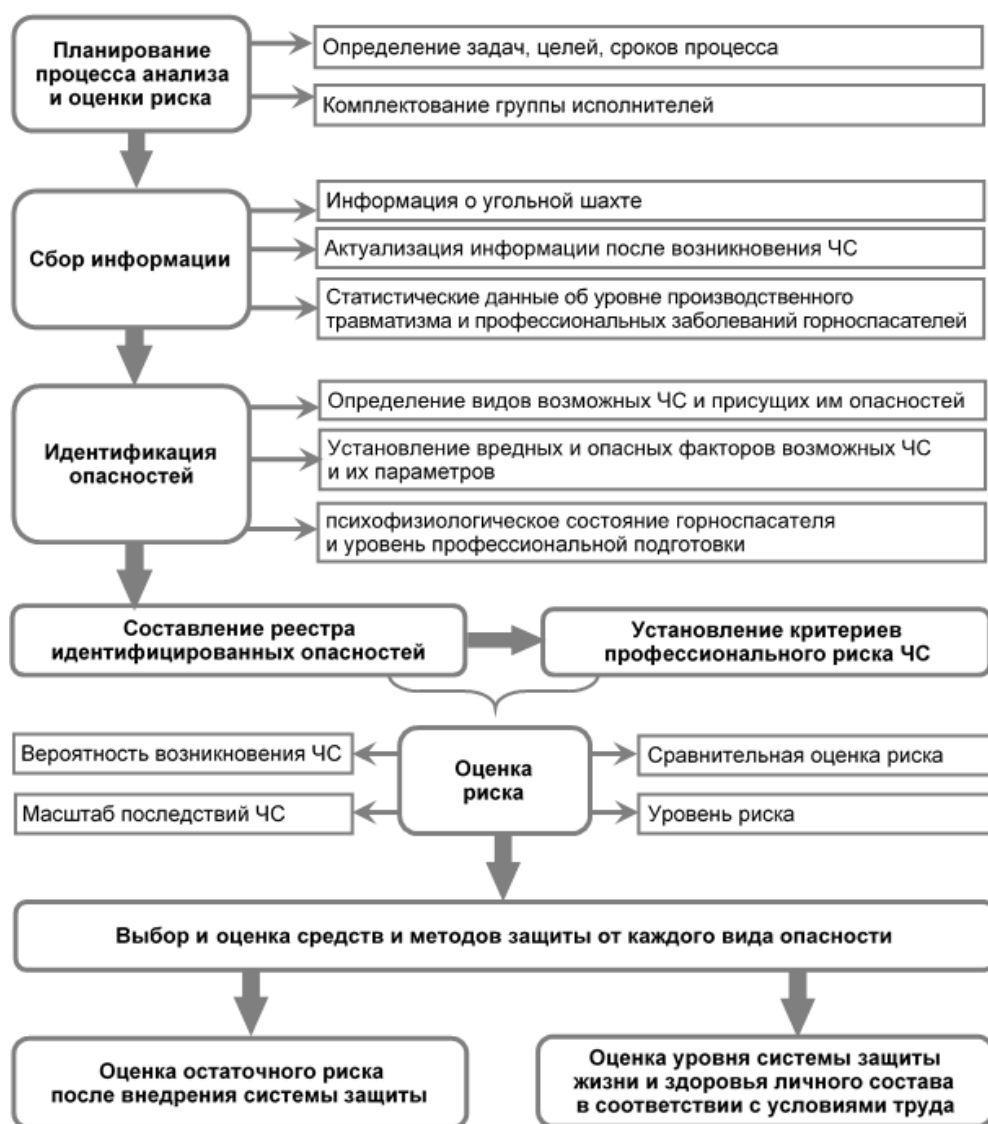


Рис. Блок-схема алгоритма анализа и оценки профессионального риска горноспасателя во время ведения АСР

- прогнозирование возникновения возможных ЧС (осложнений) в ходе ведения АСР и идентификацию присущих им опасностей;
- определение параметров вредных и опасных факторов возможных ЧС;
- составление реестра идентифицированных опасностей;
- выполнение анализа риска с использованием метода Файна – Кинни (на этом этапе для каждой идентифицированной опасности определяют балльные значения трех показателей: вероятности возникновения опасности (P_i), подверженности работника воздействию такой опасности (D_i) и последствий наступления опасностей (A_i));
- выполнение оценки риска для каждой идентифицированной опасности с расчетом ИПР (W_i , балл) по формуле:

$$W_i = P_i \times D_i \times A_i, \quad (5)$$

где i – номер идентифицированной опасности в реестре, 1;

- определение критериев оправданного (допустимого) риска во время ведения АСР. Законодательством РФ² определено понятие «оправданный риск» горноспасателей при ведении АСР, направленных на спасение застигнутых людей (по нашему мнению, такое определение не научное, а субъективное, социально-ценностно окрашенное, поскольку довольно сложно установить границы «оправданного риска»; более объективным и однозначным является понятие «научно-обоснованный (или обоснованный) допустимый риск», который базируется на применении горноспасателями средств индивидуальной защиты, использовании специальной техники и тактических приемов при ликвидации ЧС и их последствий, на высокой специальной, физической и психологической подготовке);
- сравнение значений, полученных в результате анализа риска, с установленными критериями оправданного (допустимого) риска;
- установление уровня опасности и возможности выполнения задания;
- выбор и оценка средств и методов защиты от каждого вида опасности;
- разработка или корректировка существующих мер по снижению риска возможных ЧС для всех идентифицированной опасностей;
- оценка эффективности и достаточности разработанных мер и разработка, в случае необходимости, дополнительных.

Ранее нами уже был описан процесс определения балльных показателей P_i , D_i и A_i [4]. Применительно к ведению АСР, предусмотренных мероприятиями ПЛА, рекомендуется балльные показатели определять по табл. 1.

ИПР (W_i), рассчитанный по каждой идентифицированной опасности по формуле (5), служит основанием для установления лингвистического уровня профессионального риска горноспасателя и принятия соответствующих управленческих решений реагирования на риск. Матрица определения уровня профессионального риска и соответствующих управленческих решений приведена в табл. 2.

Организационные и инженерно-технические мероприятия, разработанные для снижения уровня риска, вносятся в оперативные планы ликвидации аварии с указанием сроков исполнения и ответственных лиц.

² Федеральный закон от 22.08.1995 № 151ФЗ

Таблица 1

Определение значений балльных показателей

Баллы	Вероятность возникновения опасности (P_i)	Подверженность работника воздействию такой опасности (D_i)	Тяжесть последствий наступления опасностей (A_i)
10	Скорее всего произойдет в течение рабочей смены	Более 70 % продолжительности рабочей смены	Катастрофа, два и более несчастных случая со смертельным исходом. Прекращение АСР
8	Очень вероятно произойдет в течение рабочей смены	50–70 % продолжительности рабочей смены	Групповой несчастный случай с тяжелыми травмами, несчастный случай со смертельным исходом. Прекращение АСР более смены
6	Нехарактерно, но, возможно, произойдет в течение рабочей смены	20–50 % продолжительности рабочей смены	Тяжелая травма с перспективой инвалидности, групповой несчастный случай независимо от степени тяжести. Срыв выполнения задания смены
4	Маловероятно, что произойдет в течение рабочей смены	10–20 % продолжительности рабочей смены	Средней тяжести или тяжелая травма, потеря трудоспособности более чем на 5 суток. Срыв выполнения оперативного задания
2	Вряд ли возможно	5–10 % продолжительности рабочей смены	Легкая или средней тяжести травма, временная нетрудоспособность до 5 суток. Без срыва выполнения оперативного задания
1	Практически невозможно	До 5 % продолжительности рабочей смены	Легкая травма, требуется первая медицинская помощь
0,5	Теоретически невозможно	Практически никогда	Легкая травма, медицинская помощь не требуется

Таблица 2

Матрица определения уровня профессионального риска и соответствующих управленческих решений

Баллы	Риск	Управленческие решения
< 1	Минимальный	Наблюдение в штатном режиме
1–7	Незначительный (допустимый)	Дополнительные меры не требуются, ведомственный контроль
8–63	Возможный (оправданный)	Необходим постоянный ведомственный контроль и профилактические меры
64–215	Значительный	Необходимо принятие мер по улучшению ситуации
216–511	Высокий	Необходимо принятие срочных мер, для снижения уровня опасности до начала работ
> 512	Катастрофический	Немедленное прекращение деятельности (работ). Возобновление работ возможно после устранения или снижения уровня риска до допустимого или оправданного

Вывод. Разработанные алгоритмы анализа опасностей и оценки профессионального риска позволяют спрогнозировать вероятность возникновения опасных последствий для личного состава, принять необходимые решения и тем самым минимизировать ущерб. Результаты исследований позволят разработать план мероприятий по ликвидации аварий на угольных шахтах ДНР.

Список литературы / References

1. Горноспасательные дела в России / А.С. Голик [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2019. – № 1. – С. 42–49.

Golik, A. S., Popov, V. B., Yarosh, A. S., Oguretskiy, V. A., Oguretskiy, V. V., Oguretskiy, A. V. *Gornospasatelnyye dela v Rossii* [Mine rescue cases in Russia]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2019; no. 1, pp. 42-49. (In Russian)

2. Палеев, Д. Ю. Состояние и перспективы научного обеспечения горноспасательных работ / Д. Ю. Палеев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 22–28.

Paleyev, D. Yu. *Sostoyaniye i perspektivy nauchnogo obespecheniya gornospasatelnykh rabot* [Condition and prospects of mine rescue works scientific support]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2020; no. 1, pp. 22-28. (In Russian)

3. Кузнецов, М. В. Структура, функционирование и перспективы деятельности Управления военизированных горноспасательных частей (ВГСЧ) МЧС России / М. В. Кузнецов, Ю. О. Воронина // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, № 1 (43). – С. 48–52.

Kuznetsov, M. V., Voronina, Yu. O. *Struktura, funktsionirovaniye i perspektivy deyatel'nosti Upravleniya voyenizirovannykh gornospasatel'nykh chastey (VGSC) MCHS Rossii* [Structure and operation of the department of paramilitary mine-rescue units (DPMRU)]. Civil Security Technology. 2015; no. 12-1 (43), pp. 48-52. (In Russian)

4. Иваненко, А. Ф. Обоснование научно-методических подходов к оценке профессионального риска горноспасателей / А. Ф. Иваненко, П. Е. Мухин // Научный Вестник НИИ «Респиратор». – 2024. – № 2 (61). – С. 65–73.

Ivanenko, A. F., Mukhin, P. E. *Obosnovaniye nauchno-metodicheskikh podkhodov k otsenke professional'nogo riska gornospasateley* [Substantiation of scientific and methodological approaches to assessing the occupational risk of rescuers]. Scientific bulletin of the NII «Respirator»; 2024; no. 2 (61), pp. 65-73. (In Russian)

5. Иванкин, А. Ю. Обоснование необходимости корректировки позиции плана ликвидации аварии при возникновении позиции «взрыв» / А. Ю. Иванкин, А. В. Масленков, Д. Ю. Палеев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 39–43.

Ivankin, A. Yu., Maslenkov A. V., Paleyev D. Yu. *Obosnovaniye neobkhodimosti korrektyrovki pozitsii plana likvidatsii avarii pri vozniknovenii pozitsii «vzryv»* [Accident elimination plan positions correction necessity justification at «explosion» position occurrence]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2010; no. 1, pp. 39-43. (In Russian)

6. Концепция единой системы спасения шахтеров при авариях и катастрофах в шахтах / А. С. Голик [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 2. – С. 28–33.

Golik A. S., Galeev I. K., Yarosh A. S., Popov V. B., Mullov A. B., Kulmukhametov V. A., Izmailov I. R., Petrov S. A., Malakhov Yu. V. [The concept of a unified miners' rescue system during mine accidents and catastrophes]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2018; no. 2, pp. 28-33. (In Russian)

7. Мамаев, В. В. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах / В. В. Мамаев, А. Ф. Иваненко, П. Е. Мухин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2019. – № 3 (19). – С. 124–128.

Mamayev, V. V., Ivanenko A. F., Mukhin P. E. *Otsenka riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh* [Assessing the risk of emergency situations at hazardous production facilities]. Civil Defence Academy Journal. 2019; no. 3 (19), pp. 124-128. (In Russian)

8. Ярош, А. С. Количественный метод оценки multifunctionальной системы жизнеобеспечения работников при локализации и ликвидации аварии «Пожар – взрыв» на угольной шахте / А. С. Ярош // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 29–35.

Yarosh A. S. [Quantitative method of assessment of multifunctional life support system of workers in the localization and liquidation of the accident “Fire – explosion” in the coal mine]. Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety). 2020; no. 1, pp. 29-35. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым

Дата поступления рукописи 10.04.2025

Дата опубликования 19.06.2025

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. of Tech. Sci., Main Researcher; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Anatoliy Fedorovich Ivanenko, Head of Department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru

Petr Evgenievich Mukhin, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: petr63203@gmail.com

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

283048, Donetsk, Artyoma st., 157. Phone: +7 (856) 332-78-49

ASSESSMENT OF MINE RESCUERS OCCUPATIONAL HAZARDS WHEN DEVELOPING EMERGENCY RESPONSE PLAN MEASURES

Objective. Substantiate methodological approach to the development of measures to ensure the emergency rescue operations safety based on mine rescuer occupational risk assessment.

Methods. Analysis, generalization and systematization of materials on hazard analysis and risk assessment, quantitative and qualitative method.

Results. Methodological approach to assessing occupational risk when developing measures for the emergency response plan measures in coal mines has been substantiated.

Scientific novelty. For the first time, algorithms for analyzing and assessing professional risk have been developed when developing measures for emergency response plan in coal mines.

Practical value. The proposed methodological approach and developed algorithms allow assessing mine rescuer occupational risk at the stage of developing measures for emergency response plan.

Keywords: *emergency response plan; measures; occupational risk; mine rescuer; risk analysis algorithms and assessment.*

For citation: Mamayev V. V., Ivanenko A. F., Mukhin P. E. Assessment of mine rescuers occupational hazards when developing emergency response plan measures. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 76-83. EDN XGJPOB

УДК 614.842.663

Елена Ивановна Добрякова, науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-44

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ ЭВАКУАЦИИ

Цель. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации в зданиях с массовым пребыванием людей.

Методика. Аналитические исследования модели процесса обеспечения вынужденной эвакуации с помощью навигационных систем в зданиях и систем оповещения и управления эвакуацией.

Результаты. Систематизирована информация о принципах работы навигационных систем для зданий. Выполнена оценка целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации и степени влияния навигационных систем на процесс вынужденной эвакуации.

Научная новизна. Разработана модель процесса обеспечения вынужденной эвакуации с помощью навигационных систем в зданиях с массовым пребыванием людей и систем оповещения и управления эвакуацией с учетом психоэмоционального состояния человека.

Практическая значимость. Исследования целесообразности применения навигационных систем в здании при вынужденной эвакуации и содействие ее внедрению на законодательном уровне позволит повысить уровень безопасности людей в местах их массового пребывания.

Ключевые слова: *пожарная безопасность; эвакуация; позиционирование; месторасположение; психоэмоциональное состояние.*

Для цитирования: *Добрякова Е. И. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 84–93. – EDN KNUYFM*

Постановка проблемы. В рамках исследования целесообразности применения навигационных систем под вынужденной эвакуацией будем подразумевать движения, которые человек вынужден предпринимать, чтобы покинуть здание с массовым пребыванием людей из-за возникшего пожара. Следует учитывать, что степень угрозы для жизни человека в рассматриваемой ситуации следует отнести к смертельной. Об этом свидетельствуют результаты анализа гибели и травматизма людей во время пожара [1, 2], согласно которым ежегодно в мире возникает до 9 млн пожаров, на которых погибают до 90 тыс. человек и травмируются до 630 тыс. человек. В 4 % от общего количества рассматриваемых случаев, гибель людей на пожарах была вызвана обстоятельствами, затрудняющими эвакуацию. Эти обстоятельства наиболее характерны для пожаров в жилых зданиях и для объектов защиты с массовым пребыванием людей¹.

Случаи массовой гибели людей на пожарах [3] выделили в качестве проблемы несовершенство существующей системы обеспечения пожарной безопасности. При этом следует отметить, что трагические последствия пожара были вызваны не только воздействием опасных факторов пожара, но, в том числе, и нарушениями процесса эвакуации. На государственном уровне нормативные требования пожарной

¹ Согласно п. 5 Правил противопожарного режима в РФ (Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479) к объектам защиты с массовым пребыванием людей относятся здания или сооружения (кроме жилых домов), в которых могут одновременно находиться 50 и более человек

безопасности, обеспечивающие в том числе оценку риска гибели людей на пожаре и условия для обеспечения безопасной эвакуации, определены Федеральным законом от 22.07.2008 № 123-ФЗ² и СП 3.13130.2009³. Порядок определения индивидуального пожарного риска регламентируется методикой⁴, согласно которой при оценке параметров движения людских потоков, как одного из факторов влияния на риск гибели людей на пожаре, учитываются такие характеристики, как возраст и группа мобильности людей. При этом не рассматриваются особенности влияния психоэмоционального состояния человека на процесс эвакуации.

Анализ последних исследований. Вопросы недооценки психоэмоционального состояния человека в методике расчета времени вынужденной эвакуации, изложенной в ГОСТ 12.1.004-9⁵, отмечены в статье [4]. Авторы считают, что расчеты скорости движения человека при эвакуации из здания, основанные на результатах моделирования изучаемого процесса, отличаются от результатов реальной ситуации вследствие невозможности учета психологического состояния человека, вызванного реальной опасностью. Угроза жизни может вызывать у человека панику, состояние замешательства из-за недостатка информации (например, о безопасности выбранного маршрута эвакуации). Степень тревожности человека снижается при получении информации, необходимой для безопасной эвакуации, от вызывающего доверие источника [5, 6]. Вопросы возможности сбора и передачи информации, необходимой для оказания персонифицированной помощи человеку в процессе эвакуации, путем использования навигационных систем рассматривается в работах [7–9].

Цель исследования. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации в зданиях с массовым пребыванием людей.

Результаты исследований. В источнике [4] психоэмоциональный фактор состояния человека при вынужденной эвакуации, Э, представлен предложенной академиком П. В. Симоновым потребно-информационной теорией эмоций, приведенной в формуле

$$\text{Э} = f(\text{П}; \text{И}_\text{м} - \text{И}_\text{н}) \quad (1)$$

где П – потребности человека;

И_м – получаемая человеком текущая информация;

И_н – информация, необходимая для спасения человека.

Как следует из формулы (1), при равенстве показателей И_м и И_н психоэмоциональное состояние человека стабилизируется. В противном случае, при (И_м < И_н) психоэмоциональное состояние человека приведет к стрессу. Результаты исследований [4–6] дают возможность предположить, что стабилизация психоэмоционального состояния человека благотворно влияет на процесс эвакуации и напрямую зависит как от уровня его подготовки к действиям в экстремальных условиях, так и возможности получения человеком необходимого количества

² Федеральный закон от 22.07.2022 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»

³ СП 3.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности.

⁴ Приказ МЧС России от 14.11.2022 № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности»

⁵ ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

достоверной информации о факторах влияния на безопасность эвакуации по выбранному маршруту. Например, графическая информация о месте расположения источника опасности, о кратчайшем безопасном пути эвакуации, о местах расположения эвакуационных выходов, удаленности человека от источника опасности, плотности потока эвакуирующихся повысит возможности адаптации человека к переживаемым испытаниям, а осознание участия внешних сил в контроле над ситуацией и корректировке предлагаемого кратчайшего безопасного пути эвакуации в режиме реального времени способны препятствовать возникновению стресса у человека и содействовать его успешной эвакуации из здания. Следовательно, вышеприведенная информация относится к I_n . Согласно патенту⁶ и данным из [7–9] такую информацию способны представить навигационные системы в зданиях.

С целью оценки степени инновации применения навигационных систем в зданиях при вынужденной эвакуации из здания, выполним оценку практической ценности их применения в разрезе требований пожарной безопасности к системам оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей в зданиях и сооружениях (далее – СОУЭ), регламентируемым ст. 84 Федерального закона от 22.07.2022 № 123-ФЗ². Модель процесса организации вынужденной эвакуации людей из здания представим в виде цепочки событий и действий, как реакции на событие (рис. 1).



Рис. 1. Цепочка событий и действий, как реакции на событие

В качестве противодействия возможным последствиям пожара рассмотрим перечень требований пожарной безопасности к СОУЭ. Модель процесса обеспечения вынужденной эвакуации с помощью навигационных систем в зданиях и СОУЭ представлена на рис. 2.

В рамках исследования исходим из гипотезы, что для обеспечения безопасной эвакуации человека из здания недостаточно поставить его в известность о необходимости эвакуации с помощью звукового сигнала или заранее заготовленного текста через речевые ретрансляторы. Психоэмоциональное состояние человека значительно улучшится, если путем предоставления персональной информации оказать помощь человеку в идентификации его местонахождения (определить координаты его нахождения), предложить кратчайший и безопасный маршрут эвакуации и дать возможность отслеживать правильность движения по предлагаемому маршруту, оказывать помощь в корректировке первоначально предложенного пути эвакуации при изменении оперативной обстановки. Рассмотрим возможности навигационных систем в разрезе вышеперечисленных действий.

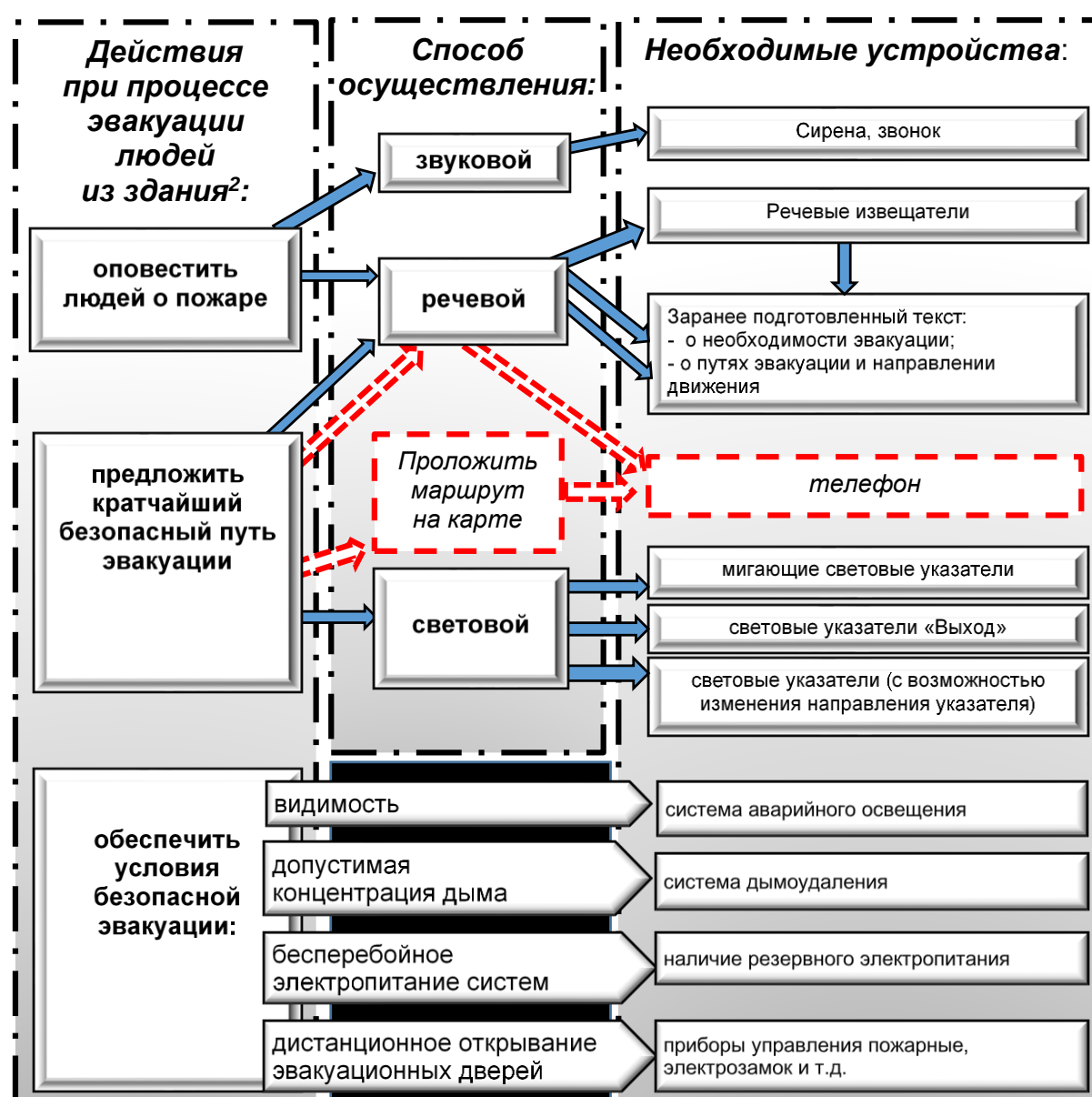
⁶ Пат. RU 2760114 на изобретение, (51) МПК A62B 3/00 (2006.01), G08B 17/00 (2006.01), F21S 4/00 (2006.01). Система эвакуации и навигации в зданиях / Н.А. Давидсон (RU). № 2019142666; заявл. 28.05.2020; опубл. 22.11.2021, Бюл. № 33.

В настоящее время широкое распространение получили навигационные системы в зданиях, способные определить координаты нахождения человека и ориентировать посетителей при передвижении внутри зданий.

Существует два вида технологии навигации в зданиях – аппаратная и безаппаратная.

Алгоритм применения аппаратной технологии для определения местонахождения человека в здании следующий:

- в разных местах помещений устанавливают специальные маячки или метки;
- маячки (метки) рассылают радиосигналы;
- на телефон посетителя устанавливается мобильное приложение;
- в зоне радиосигнала датчики определяют местонахождение человека с телефоном, в котором установлено мобильное приложение, и отправляют информацию на считывающую систему.



Примечание: стрелки и текст в окантовке красным штрихом относятся только к навигационным системам в здании

Рис. 2. Модель процесса обеспечения вынужденной эвакуации с помощью навигационных систем в зданиях и СОУЭ

При безаппаратной технологии навигации маячки (метки) не устанавливаются. Местоположение человека определяется по магнитным или беспроводным помехам (при помощи направленного луча).

Результаты анализа информации из доступных источников (патент⁶ и [7–9]) о возможностях некоторых систем навигации, используемых внутри помещений для управления процессом эвакуации из зданий, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Возможности некоторых систем навигации, используемых внутри помещений
для управления процессом эвакуации из зданий

Наименование системы	Информация о работе системы
Индор-навигация	– Персональная навигация с помощью мобильного приложения для безопасного выхода людей из мест с потенциальной угрозой – Оперативное оповещение экстренных оперативных служб о ЧС – Интеллектуальное изменение маршрута эвакуации с учетом отслеживания угроз и текущей обстановки – Объединение данных из системы видеонаблюдения, распознавания лиц, системы навигации, мобильных приложений, датчиков и других источников – Распознавание лиц в видеопотоке в реальном времени, с высокой точностью – Прием и обработка экстренных вызовов со стационарных устройств и из мобильного приложения с учетом нормативных требований
Smartsense	Для успешного поиска смартфона внутри помещения в него должна быть предварительно загружена карта этого помещения. Имея нужную карту в памяти, телефон использует два сенсора – акселерометр и сенсор магнитного поля Земли – для того, чтобы найти местоположение внутри здания
Bluetooth	Смартфон пользователя принимает импульсы от маячков и передает определенную информацию. Основным преимуществом технологии является точность (до 1 м)
Лайт Роут	Система способна на основании информации от датчиков пожаротушения прокладывать и менять (в зависимости от оперативной обстановки) эвакуационный путь из каждого помещения здания и производить блокировку/разблокировку электронных замков в дверях на пути эвакуации. Эвакуационный путь прокладывает в виде светящейся «бегущей дорожки». Система хорошо видна в дыму. Система путем синхронизации работы с системами пожаротушения, видеонаблюдения, системой аварийного освещения и оповещения о пожаре, сигнализации и т. д. способна отправить сообщение о пожаре в МЧС, вывести информацию о порядке необходимых действий на все экраны в здании
RescueMe	С помощью облачных серверов предоставляет пользователям данные в режиме реального времени о местах скопления людей или выходных дверях, которых следует избегать, когда они ищут быстрый выход из здания в чрезвычайной ситуации. AR-метки на телефоне указывают путь к выходу и оставшееся расстояние, которое необходимо преодолеть пользователю, чтобы добраться до выходной двери

Как следует из табл. 1, для определения местонахождения человека с помощью устройств Smartsense, Bluetooth-маячков автоматически от Wi-Fi загружается карта объекта, телефон с помощью двух сенсоров или маячков определяет свое положение на карте, владелец телефона отслеживает свое перемещение по карте и находит выход из здания. Недостатком системы является отсутствие возможности предотвращения нарушения правил пожарной безопасности в виде закрытой двери эвакуационного выхода (одной из основных причин гибели людей на пожаре в процессе эвакуации). Однако эта опция предусмотрена в системе Лайт Роут. Очевидно, что навигационные системы обладают большими возможностями.

На базе данных табл. 1 выполним оценку возможностей навигационных систем для обеспечения человека всей необходимой для безопасности эвакуации информацией (табл. 2).

Таблица 2

Оценка возможностей навигационных систем для обеспечения человека всей необходимой для безопасности эвакуации информацией

Вид информации	Наименование системы			
	Индор-навигация	RescueMe	Лайт Роут	Navigate
Оперативное оповещение МЧС о пожаре	+	+	+	+
Определение места нахождения человека	+	+		+
Просмотр маршрута перемещения человека	+	+		+
Возможность блокировки/разблокировки электронных замков, запирающих двери эвакуационных выходов			+	
Построение кратчайшего и безопасного маршрута эвакуации для человека	+	+	+	
Изменения предложенного маршрута эвакуации в режиме реального времени в зависимости от развития пожара			+	
Уведомление человека с помощью push-сообщений об источнике опасности и правилах поведения в сложившейся ситуации				+
Уведомление человека с помощью push-сообщений о местах нахождения опасных зон				+
Уведомление человека с помощью push-сообщений о кратчайшем безопасном маршруте от места его нахождения до выхода из здания				+
Фиксация мест падения человека				+
Данные в режиме реального времени о местах скопления людей или выходных дверях		+		
С помощью AR-метки на телефоне в режиме реального времени указывают эвакуационный путь и оставшееся расстояние до выхода		+		

Применение навигационных систем предполагает наличие у посетителей объекта с массовым пребыванием людей телефона, определенного уровня цифровой грамотности и доверия к источнику информации. Приведенные в [9] результаты исследования свидетельствуют, что у пользователей смартфонов в возрасте до 35 лет уровень доверия к информации, полученной через интернет, составляет 85 %.

Согласно результатам оценки цифровой грамотности населения России (в возрасте 18–75 лет) [10]:

- наблюдается разрыв между уровнем цифровой грамотности населения в зависимости от возраста (проблемы у лиц старшего возрастной группы), социально-профессиональной группы (чем выше уровень достатка, тем больше доверия к цифровым технологиям), уровня образования (чем выше уровень цифровой грамотности, тем выше уровень доверия к интернет ресурсам);

- у 2 % населения отсутствуют навыки владения базовыми цифровыми компетенциями;

- у 38 % населения уровень цифровой грамотности ниже базового;

- 60 % населения владеют базовыми уровнем цифровой грамотности.

Как следует из вышеизложенного, уровень цифровой грамотности населения России достаточный для рассмотрения перспектив использования навигационных систем для эвакуации посетителей из зданий при пожаре.

Выводы. Согласно результатам проведенных исследований установлено, что целесообразность применения средств навигации в зданиях для эвакуации людей из зданий зависит от уровня владения цифровой грамотности населения. При этом установлено, что уровень владения цифровой грамотностью у населения России достаточный для рассмотрения перспектив использования навигационных систем для эвакуации посетителей из зданий при пожаре.

В рамках проведения оценки целесообразности применения навигационных систем для вынужденной эвакуации из зданий при пожаре рассмотрены и подтверждены следующие возможности навигационных систем:

- оказать человеку персональную психоэмоциональную поддержку;
- оповестить экстренные службы о пожаре;
- выстроить персонально для человека безопасный кратчайший путь эвакуации из здания;

- отслеживать оперативную информацию о распространении пожара и вносить корректировку в первоначально предложенный эвакуационный маршрут;

- при разработке кратчайшего и безопасного пути эвакуации учитывать плотность потока при эвакуации;

- путем синхронизации работы с системами пожаротушения, видеонаблюдения, системой аварийного освещения и оповещения о пожаре, сигнализации и т. д. отправлять сообщение о пожаре в МЧС, выводить информацию о порядке необходимых действий на все экраны в здании, на основании информации от датчиков пожаротушения прокладывать и менять (в зависимости от оперативной обстановки) эвакуационный путь из каждого помещения здания и производить блокировку/разблокировку электронных замков в дверях на пути эвакуации.

Таким образом, вышеперечисленные возможности навигационных систем для вынужденной эвакуации из зданий направлены на персональное взаимодействие с человеком и построение индивидуального маршрута эвакуации в доступной

для пользователя форме, что благотворно влияет на психоэмоциональное состояние человека в стрессовой ситуации.

СОУЭ является комплексом разработанных мероприятий по организации безопасной эвакуации и предназначенных для их реализации технических средств. При этом формы передачи информации, предусмотренные в данном комплексе, более формализованы и не направлены на непосредственную связь с человеком.

Для более точной оценки целесообразности применения навигационных систем в зданиях для вынужденной эвакуации необходимо проведение исследований путем моделирования процесса эвакуации и изучения проблем по взаимодействию участников эвакуации с системами. Очевидна необходимость популяризации навигационных систем (в том числе в процессе обучения населения правилам пожарной безопасности) и обеспечения их внедрения на законодательном уровне, разработки порядка сравнительной оценки эффективности существующих навигационных систем в повышении безопасной эвакуации из зданий.

Список литературы / References

1. Статистический анализ гибели и травмирования людей при пожарах в странах мира и России (2008–2012 гг.) / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, В. И. Евдокимов, О. В. Иванова // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2015. – № 2. – С. 30–37. – EDN UBVOIZ

Brushlinsky, N. N., Sokolov, S. V., Evdokimov, V. I., Ivanova, O. V. *Statisticheskiy analiz gibeli i travmirovaniya lyudey pri pozharakh v stranakh mira i Rossii (2008–2012 gg.)* [Statistical analysis of deaths and injuries from fires worldwide and in Russia (2008–2012)]. Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations. 2015; no. 2, pp. 30–37. – EDN UBVOIZ (In Russian)

2. Анализ пожаров, связанных с гибелью и травматизмом людей на территории Республики Башкортостан / Н. Г. Курамшина, Т. П. Смирнова, А. Н. Елизарьев, Д. В. Ахметшина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – № 4-2 (43). – С. 56–63. – DOI 10.24411/2500-1000-2020-10345. – EDN WEYPIK

Kuramshina, N. G., Smirnova, T. P., Elizariev, A. N., Akhmetshina, D. V. [Analysis of fires associated with death and injury of people in the Republic of Bashkortostan]. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2020; no. 4-2 (43), pp. 56–63. – DOI 10.24411/2500-1000-2020-10345. – EDN WEYPIK (In Russian)

3. Плотников, А. С. Анализ последствий пожаров на объектах с массовым пребыванием людей и мер, направленных на их смягчение / А. С. Плотников, Д. В. Седов // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – Т. 5, № 1 (17). – С. 71–83.

Plotnikov, A. S., Sedov, D. V. [Analysis of the consequences of fires at facilities with a mass presence of people and measures aimed at mitigating them]. XXI century. Technosphere safety. 2020; vol. 5, no. 1(17), pp. 71–83. (In Russian)

4. Кремень, М. А. Психоэмоциональное состояние людей как фактор процесса вынужденной эвакуации в случае пожара / М. А. Кремень, А. С. Дмитриченко, С. А. Татарников // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2005. – № 1 (1). – С. 75–79. – EDN SMNXQR

Kremen, M. A., Dmitrichenko, A. S., Tatarnikov, S. A. [The psycho-emotional state of people as a factor in the process of forced evacuation in case of fire]. Bulletin of the Command Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. 2005; no. 1 (1), pp. 75–79. – EDN SMNXQR. (In Russian)

5. Добрякова, Е. И. Психологические аспекты обучения людей действиям в условиях пожара / Е. И. Добрякова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – № 3 (119). – С. 199–202.

Dobryakova, E. I. [Psychological aspects of teaching people how to act in fire conditions]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2016; no. 3 (119), pp. 199-202. (In Russian)

6. Добрякова, Е. И. Психологические аспекты поведения людей в условиях пожара / Е. И. Добрякова // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2016. – № 4 (53). – С. 102–111. – EDN WXHJTT

Dobryakova, E.I. [Psychological aspects of human behavior in fire conditions]. Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”. 2016; no. 4 (53), pp. 102-111. (In Russian)

7. Топчий, Д. В. Возможности применения глобальных спутниковых навигационных систем для функций строительного контроля и регулирования ресурсного обеспечения строительных предприятий за счет оптимизации маневровой работы / Д. В. Топчий, Д. Ю. Юргайтис, А. С. Болотова // Инновации и инвестиции: строительство и архитектура. – 2019. – № 19. – С. 258–263.

Topchiy, D. V., Yurgaitis, D. Yu., Bolotova, A. S. [The possibilities of using global satellite navigation systems for the functions of construction control and regulation of resource provision of construction enterprises by optimizing maneuvering work]. Innovation and investment: construction and architecture. 2019; no. 19, pp. 258-263. (In Russian)

8. Саенко, Д. Ю. Концепции использования беспроводных технологий в повышении эффективности эвакуации людей из здания при пожаре // Мировая наука: компьютеры и информационные науки. – 2019. – № 2 (23). – С. 257–260.

Saenko, D. Yu. [Concepts of using wireless technologies in improving the efficiency of evacuation of people from buildings in case of fire]. World science: computers and information sciences. 2019; no. 2 (23). pp. 257-260. (In Russian)

9. Управление эвакуацией людей при пожаре на основе современных информационных технологий / С. Н. Терехин, А. С. Ракишев, Н. А. Кирсанова, М. М. Велибеков // Вестник науки и образования. – 2020. – № 22-2 (100). – С. 5–12. – EDN JAIBAF

Terekhin, S. N., Rakishev, A. S., Kirsanova, N. A., Velibekov, M. M. [Management of evacuation of people in case of fire on the basis of modern information technologies]. Bulletin of Science and Education. 2020; no. 22-2 (100). pp. 5-12. – EDN JAIBAF. (In Russian)

10. Оценка цифровой готовности населения России: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13–30 апр. 2021 г. / Н. Е. Дмитриева (рук. авт. кол.), А. Б. Жулин, Р. Е. Артамонов, Э. А. Титов; Нац. исслед. Ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. – 86 с. – ISBN 978-5-7598-2518-0 (в обл.). – ISBN 978-5-7598- 2279-0 (e-book).

Dmitrieva, N. E. (author's col.), Zhulin, A. B., Artamonov, R. E., Titov E. A. [Assessment of the digital readiness of the Russian population: report to the XXII Apr. international Scientific Conference on problems of economic and social development, Moscow, 13-30 Apr. 2021]; National. research. Higher School of Economics University. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2021. pp.86. – ISBN 978-5-7598-2518-0 (in the region). – ISBN 978-5-7598- 2279-0 (e-book). (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 22.04.2025
Дата опубликования 19.06.2025

Elena Ivanovna Dobryakova, Researcher; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 332-78-44

FEASIBILITY OF NAVIGATION SYSTEMS APPLICATION DURING EMERGENCY EVACUATION

Objective. Justify the feasibility of navigation systems application during forced evacuation in buildings with large number of people.

Methodology. Analytical research of the process model of providing emergency evacuation using navigation systems and warning and evacuation control systems in buildings.

Results. The information on the principles of navigation systems operation for buildings has been systematized. The feasibility of navigation systems application during emergency evacuation and the degree of navigation systems influence on the emergency evacuation process has been assessed.

Scientific novelty. The process model of ensuring emergency evacuation using navigation systems in buildings with a large number of people and warning and evacuation control systems has been developed, taking into account the psycho-emotional state of a person.

Practical significance. Research of feasibility of navigation systems application in buildings during emergency evacuation and promoting its implementation at the legislative level will improve the safety level in places with large number of people.

Keywords: *fire safety; evacuation; positioning; location; psycho-emotional state.*

For citation: Dobryakova E. I. Feasibility of navigation systems application during emergency evacuation. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 84-93. EDN KNUYFM

УДК 622.867.1

Виталий Александрович Руденко, первый заместитель генерального директора ², аспирант ¹;
e-mail: rva@vgsch.ru

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

²Федеральное государственное унитарное предприятие

«Военизированная горноспасательная часть» МЧС России

115193 Москва, ул. Петра Романова, 7 стр. 1. Тел.: + 7 (495) 677-36-72

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЧИСЛЕННОСТИ И ОПТИМАЛЬНОЙ РАССТАНОВКИ ЧЛЕНОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ КОМАНД ДЛЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Цель работы. Повышение безопасности и эффективного выполнения работ по локализации и ликвидации аварий членами вспомогательных горноспасательных команд на основе научного обоснования их численности и оптимальной расстановки в шахте.

Методы. Аналитические исследования готовности угольных шахт к противоаварийной защите с учетом тактики ведения горноспасательных работ на угольных шахтах.

Результаты. Разработана методика расчёта численности членов вспомогательных горноспасательных команд на угольных шахтах с учетом их основной профессии и предложен порядок их расстановки.

Научная новизна. Впервые научно обоснованы численность и расстановка членов вспомогательных горноспасательных команд с учетом их профессий и должностных обязанностей, требований действующих нормативных документов для выполнения превентивных мер по локализации и ликвидации аварий в шахте, а также устранения их последствий.

Практическая значимость. Согласно расчетам по данной методике во всех наиболее опасных местах будут находиться члены вспомогательных горноспасательных команд в количестве, достаточном для проведения превентивных мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, а также оказания первой помощи пострадавшим.

Ключевые слова: шахта; горноспасательное дело; вспомогательные горноспасательные команды; численность; расстановка; методика.

Для цитирования: Руденко В. А. Методика расчёта численности и оптимальной расстановки членов вспомогательных горноспасательных команд для угольных шахт // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 94–100. – EDN NVWTZG

Постановка проблемы. Аварийность угольной промышленности Российской Федерации последние 20 лет остается на довольно высоком уровне, а затраты на ликвидацию последствий аварий и восстановительные работы на угольных предприятиях превышают несколько миллиардов рублей.

Периодически раз в 3-4 года происходят особо крупные аварии, приводящие к большому числу травмированных и погибших горнорабочих (2010 г. – взрывы метана на шахте «Распадская» – 90 погибших; 2013 г. – взрыв метана на шахте «Воркутинская» – 18 погибших; 2016 г. – взрыв метана и угольной пыли на шахте «Северная» – 35 погибших и полная потеря угольного месторождения в связи с консервацией; 2021 г. – взрыв на шахте «Листвяжная» – 51 погибший)¹.

¹ Официальный сайт федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Сибирское управление. Информация по аварийности – URL: <https://usib.gosnadzor.ru/info/> (дата обращения: 05.05.2025)

Для локализации и ликвидации аварий на угольных предприятиях Российской Федерации в начальный период времени предусмотрено² задействование членов вспомогательных горноспасательных команд (далее – ВГК). Авария или несчастный случай могут произойти в шахте в любом месте и в любой момент времени, и членам ВГК необходимо оперативно среагировать и в максимально короткие сроки прибыть на место аварии (аварийный участок). Для выполнения горноспасательных работ членами ВГК их расстановка играет важную роль, поскольку теоретически они могут оказаться далеко от места возникновения чрезвычайной ситуации. Также следует учитывать, что в настоящее время нормативными документами не предусмотрено постоянное нахождение членов ВГК в характерных точках угольных шахт (очистные участки, подготовительные выработки, горные выработки, оборудованные ленточными конвейерами, шахтный подъем, камеры водоотлива и др.).

Анализ последних исследований. Вопросы создания условий для обучения шахтеров правилам и практическим навыкам поведения в чрезвычайных ситуациях, а также повышение уровня реагирования на аварии на объектах ведения горных работ являются приоритетными и не теряют своей актуальности [1–3]. Разработаны этапы реализации риск-ориентированного подхода и успешной ликвидации аварий на основе современной системы обучения горноспасателей и шахтеров и повышения уровня организации аварийно-спасательных работ [2, 3]. В работах [2–4] авторами рассмотрены оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд и вариант автоматизированного мониторинга выхождаемости и расстановки подземного персонала на шахтах, в том числе членов ВГК в соответствии с утверждёнными нормами.

Количество членов ВГК на угольных шахтах определяется нормой в 10 % от списочного состава всех горнорабочих, при этом в рабочую смену в подземных условиях должно быть не менее 5 членов ВГК [5].

Цель исследования. Повышение безопасности и эффективного выполнения работ по локализации и ликвидации аварий членами вспомогательных горноспасательных команд на основе научного обоснования их численности и оптимальной расстановки в шахте.

Материалы и результаты исследований. Расстановка членов ВГК по рабочим местам на угольных шахтах в настоящее время выполняется в соответствии с Приказом МЧС России от 29.11.2013 № 765 «Об утверждении Порядка создания вспомогательных горноспасательных команд». На объектах ведения подземных горных работ численность членов ВГК с учетом расстановки их по рабочим местам и сменам должна обеспечивать прибытие не менее 2 специалистов к месту аварии со стороны свежей струи воздуха в течение 30 минут с момента получения задания или сообщения об аварии [2, 3]. При этом численность членов вспомогательных горноспасательных команд (в том числе – подрядных организаций, осуществляющих подземные горно-капитальные работы) определяется руководителем организации.

Анализ численности и расстановки членов ВГК по рабочим местам на некоторых обслуживаемых подразделениями ФГУП «ВГСЧ» действующих угольных шахтах показал, что в большинстве случаев при расстановке членов ВГК объекты, находящиеся на значительном расстоянии друг от друга (очистные участки,

² Приказ МЧС России от 29.11.2013 № 765 (ред. от 24.02.2019) «Об утверждении Порядка создания вспомогательных горноспасательных команд» URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/uchrezhdeniya-mchs-rossii/spasatelnye-podrazdeleniya/voenizirovannye-gornospasatelnye-chasti/normativnye-pravovye-akty/>

подготовительные выработки, горные выработки, оборудованные ленточными конвейерами, шахтный подъем, камеры водоотлива и др.), объединяются, не учитывается направление вентиляционной струи при возможных аварийных ситуациях. При этом фактическая численность членов ВГК превышает расчетную.

На основе изучения тактики ведения горноспасательных работ профессиональными формированиями (подразделениями ВГСЧ МЧС России) [1, 2, 4] для эффективного решения задач в первоначальный период развития аварии по спасению людей, оказанию первой помощи пострадавшим и их эвакуации с аварийного участка, локализации (ликвидации) последствий аварий (чрезвычайных ситуаций) предлагается следующий вариант расстановки членов ВГК по местам ведения горных работ в смену:

- в подготовительных горных выработках длиной 50 м и более – не менее двух человек (без ограничений по профессии);
- на выемочных участках – не менее двух человек (без ограничений по профессии);
- на водоотливных установках – один человек на каждый водоотлив (машинист водоотливных установок, либо электрослесарь);
- на конвейерных линиях – не менее одного человека на 2,5 км конвейеров (без ограничений по профессии);
- для шахт, имеющих наклонные грузоподъемные и людские подъемы, – один машинист подъема на каждую установку;
- для шахт с вертикальными стволами – один машинист подъёмной установки, и на каждый действующий горизонт – один стволовой во всех вертикальных стволах, оборудованных подъёмными установками;
- для шахт, использующих транспорт с двигателями внутреннего сгорания, – не менее одного человека, имеющего право управления машинами с ДВС;
- для шахт, использующих электровозный транспорт, – не менее одного машиниста электровоза;
- электрослесари, квалификация которых позволяет осуществлять ремонт систем связи и АГК, – не менее двух человек в смену;
- электромеханики – не менее двух человек в смену;
- инженерно-технические работники участка аэрологической безопасности и других участков – не менее двух человек.

В вышеприведенном варианте расстановки учтены различные профессии не только инженерно-технических работников, но и горнорабочих, что позволяет учесть влияние вида и степени тяжести труда на физическую готовность членов ВГК для выполнения горноспасательных работ. Установлено, что для профессий с очень тяжелой нагрузкой (например, проходчики или горнорабочие очистного забоя) время стабильной работы составляет 1 час [1, 3, 5], после чего при выполнении горноспасательных работ повышается уровень опасности вследствие утомления.

Для расчёта списочной численности членов ВГК необходимо учитывать количество смен на предприятиях, занимающихся подземной добычей угля, возможность нахождения людей на больничном, в отпуске, а также текучесть кадров. Списочную численность членов ВГК $Ч_{сп}$, чел., можно рассчитать по формуле

$$Ч_{сп} = Ч_{тр} \cdot K_{сп} , \quad (1)$$

где $Ч_{тр.}$ – минимальная требуемая численность членов ВГК в смену, чел.;

$K_{сп}$ – коэффициент списочного состава для работников подземных специальностей на угольных шахтах.

Показатель $Ч_{тр.}$ устанавливается индивидуально для каждой угольной шахты (в зависимости от количества очистных (выемочных участков) и подготовительных забоев, количества конвейерных линий, наличия транспорта с двигателями внутреннего сгорания или электровозной откатки и пр.), в соответствии с вышеуказанным порядком учета расстановки членов ВГК, и рассчитывается по формуле

$$Ч_{тр} = Ч_{пв} \cdot N_{пв} + Ч_{ву} \cdot N_{ву} + Ч_{вод} \cdot N_{вод} + Ч_{кл} \cdot N_{кл} + Ч_{нп} \cdot N_{нп} + \\ + (Ч_{маш} \cdot N_{верт.ств} + Ч_{ств.гор} \cdot N_{гор}) + Ч_{тдв} + Ч_{эт} + Ч_{эл} + Ч_{элм} + Ч_{итр}, \quad (2)$$

где $Ч_{пв}$, $Ч_{ву}$, $Ч_{вод}$, $Ч_{кл}$, $Ч_{нп}$, $Ч_{маш}$, $Ч_{ств.гор}$, $Ч_{тдв}$, $Ч_{эт}$, $Ч_{эл}$, $Ч_{элм}$, $Ч_{итр}$ – требуемая численность членов ВГК в смену, чел., соответственно:

- в подготовительных выработках,
- выемочных участках,
- на водоотливных установках,
- конвейерных линиях,
- наклонных механизированных (грузолюдских и людских) подъёмах,
- вертикальных стволах,
- на каждый действующий горизонт во всех вертикальных стволах, оборудованных подъёмными установками,
- на транспорте с двигателями внутреннего сгорания,
- на электровозном транспорте,
- требуемая численность электрослесарей,
- электромехаников,
- инженерно-технических работников участка аэрологической безопасности, других участков;

$N_{пв}$, $N_{ву}$, $N_{вод}$, $N_{кл}$, $N_{нп}$, $N_{гор}$, $N_{верт.ств}$ – количество, соответственно:

- подготовительных выработок,
- выемочных участков,
- водоотливов,
- конвейерных линий,
- наклонных механизированных (грузолюдских и людских) подъёмов,
- действующих горизонтов в вертикальном стволе,
- вертикальных стволов, оборудованных подъёмными установками.

Коэффициент списочного состава $K_{сп}$ для работников подземных специальностей на угольных шахтах рассчитывается по формуле

$$K_{сп} = \frac{(t_k - t_{в.п})}{(t_k - t_{в.п} - t_o) \cdot K_y}, \quad (3)$$

где t_k – число календарных дней в году;

$t_{в.п}$ – число выходных дней предприятия, участка (рабочего места) с учётом праздничных дней в году, не совпадающих с выходными днями;

t_0 – средняя продолжительность отпуска (основного и дополнительного) рабочего;

K_y – коэффициент, учитывающий число невыходов по прочим уважительным причинам (болезни, выполнение общественных и государственных обязанностей, отпуска с разрешения администрации и др.), принимается равным 0,96.

Предложенная методика учитывает расстановку членов ВГК по рабочим местам и видам профессий.

Расчет списочной численности членов ВГК пяти действующих угольных шахт по разработанной методике, согласно формуле (1) представлен в таблице.

Таблица

Расчет списочной численности членов ВГК

Показатель	Шахта				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Параметры ведения горных работ на шахте					
– Количество подготовительных г/в длиной более 50 м	7	7	6	0	9
– Количество выемочных участков	2	1	1	2	2
– Количество водоотливных установок	4	10	20	5	23
– Протяженность конвейерных линии, км	9,26	10,9	10,2	6	18
– Количество наклонных механизированных подъемов	0	2	6	2	3
– Количество вертикальных стволов, оборудованных подъемными установками	0	1	0	0	3
– Количество действующих горизонтов	0	1	0	0	9
– Наличие подземного самоходного горного оборудования с ДВС	да	нет	да	да	Да
– Наличие электровозного транспорта	нет	нет	нет	нет	Нет
Режим работы шахты в течение календарного года					
– Количество календарных дней	365	365	365	365	365
– Количество нерабочих и праздничных дней	0	0	0	0	0
– Средняя продолжительность отпуска (основной и дополнительный)	82	60	60	60	60
– График сменности (количество смен в сутки)	3	4	3	4	3
$K_{сп}$	1,24	1,15	1,15	1,15	1,15
$Ч_{сп}$, чел.	123	189	180	97	259

Сравнительный анализ показателей численности членов ВГК на угольных шахтах, рассчитанных по существующим требованиям и с учетом предлагаемой методики за IV квартал 2024 г., показывает незначительное увеличение (не более чем на 1,4 %) рассчитанной по предлагаемой методике численности членов ВГК относительно фактического показателя (рис.).

Кроме того, предлагаемая методика позволяет учитывать физическое состояние работников, проработавших почти полную смену под землёй.

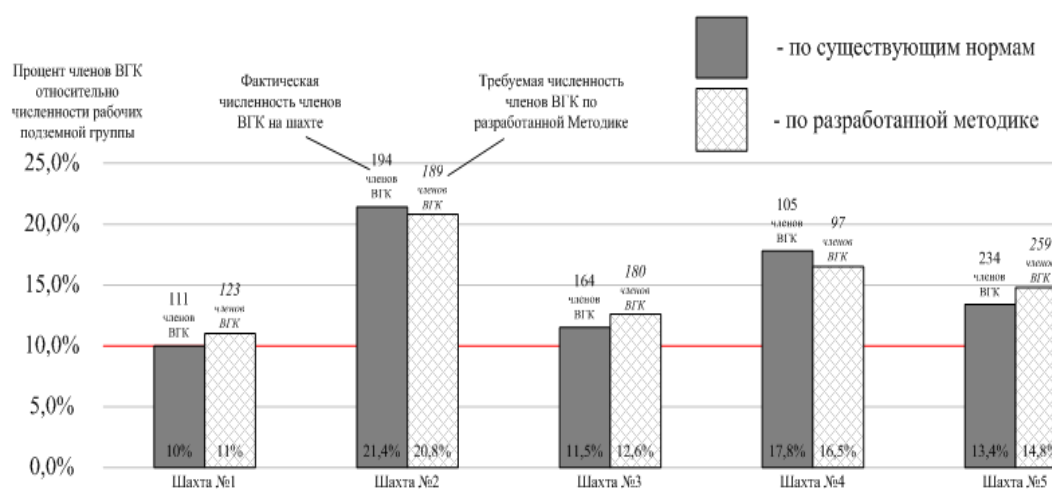


Рис. Анализ численности членов ВГК за IV квартал 2024 г.

Выводы. Количество находящихся на смене членов ВГК и их расстановка является одним из ключевых моментов при повышении безопасности и эффективности горноспасательных работ.

Разработанная методика расчета численности членов ВГК учитывает все существующие нормы и требования, которые регулируют численность работников горных предприятий и горноспасателей, не отменяет действующие нормативные требования (не менее 10 % от списочного состава работников, занятых на подземных работах), а уточняет их. При этом учтены как профессии членов ВГК, так и рабочие участки. При использовании данной методики во всех наиболее опасных местах будут находиться члены ВГК в количестве, достаточном для выполнения превентивных мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, а также оказания первой помощи пострадавшим. В методике учтены отпуска сотрудников, возможная текучесть кадров, вахтовый метод работы.

Учет основных видов профессий горнорабочих позволяет эффективно использовать все виды горного оборудования, что, в свою очередь, существенно повышает эффективность горноспасательных работ в составе горноспасательных отделений ВГСЧ.

Список литературы / References

1. Син, А. Ф. Обеспечение безопасности горноспасательных работ / А. Ф. Син // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и создание комплексных аварийно-спасательных центров в Арктике», ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России. – Москва, 2012. – С. 98–104.

Sin, A. F. *Obespechenie bezopasnosti gornospasatel'nykh rabot* [Ensuring the safety of mining and rescue operations]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Problems of emergency prevention and response and the creation of integrated emergency rescue centers in the Arctic», VNII GOCHS (FC) EMERCOM of Russia, Moscow; 2012, pp. 98-104.* (In Russian)

2. Аксенов, В. В. Перспективы развития горноспасательного дела в России / В. В. Аксенов // Уголь. – 2017. – №11 (1100). – С. 20–23.

Aksenov, V. V. *Perspektivi razvitiya gornospasatel'nogo dela v Rossii* [Prospects of mine rescue work development in Russia]. *Ugol*, 2017; no.11 (1100), pp. 20-23. (In Russian)

3. Клименти, Н. Ю. Организация аварийно-спасательных работ / Н. Ю. Клименти, О. С. Власова. – Волгоград: ВолГГТУ, 2018 – 288 с.

Kliment, N. Yu., Vlasova, O. S. *Organizatsiya avariynno-spasatelnykh rabot* [Organization of emergency rescue operations]. Volgograd, 2018; 288 p. (In Russian)

4. Руденко, В. А. Оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт / В. А. Руденко // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 3 – С. 243–249.

Rudenko V. A. [Assessment of readiness of auxiliary mine rescue teams in coal mines]. Mining Science and Technology (Russia). 2024; no. 9(3), pp. 243-249. (In Russian)

5. К вопросу мониторинга в режиме реального времени расстановки членов вспомогательных горноспасательных команд на шахтах / Р. С. Койнов, М. В. Ляховец, В. В. Комаров, П. С. Гурьянов // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): AS'2021: труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 64–69.

Koynov, R. S., Lyahovec, M. V., Komarov, V. V., Guryanov, P. S. *K voprosu monitoringa v rezhime realnogo vremeni rasstanovki chlenov vspomogatelnykh gornospasatelnykh komand na shakhtakh* [On the issue of monitoring in real time the placement of members of auxiliary mine rescue teams in mines]. *Sistemy avtomatizatsii (v obrazovanii, nauke i proizvodstve): AS'2021: trudy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem)*. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2021; pp. 64-69. (In Russian)

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

Дата поступления рукописи 16.05.2025

Дата опубликования 19.06.2025

Vitaly Aleksandrovich Rudenko, First Deputy Director General², Postgraduate Student¹;

e-mail: rva@vgsch.ru

¹ National University of Science and Technology «MISIS»

² Mines Rescue Service «VGSC»

115193 Moscow, Petr Romanov st., 7/1. Phone: + 7 (495) 677-36-72

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE NUMBER AND OPTIMAL PLACEMENT OF MEMBERS OF THE AUXILIARY MINE RESCUE TEAMS FOR COAL MINES

Objective. Development of a procedure for accounting for the placement of members of the auxiliary mine rescue teams and calculating their number for coal mines.

Methods. Analytical studies of the readiness of coal mines for emergency protection, taking into account the tactics of mining rescue operations in coal mines.

Results. The procedure for accounting for the placement of members of the VGK in coal mines is proposed and the methodology for calculating the number of members of the VGK is given, taking into account their main profession.

Scientific novelty. When calculating the number, the professions and job responsibilities of the members of the VGK are taken into account, which make it possible to safely and effectively carry out actions to localize and eliminate accidents at the mine.

Practical value. According to calculations based on this methodology, in all the most dangerous places there will be enough members of the Supreme Command to carry out preventive measures to localize and eliminate the consequences of accidents, as well as provide first aid to victims.

Keywords: mine; mining rescue; auxiliary mining rescue formations; number; arrangement; methodology.

For citation: Rudenko V. A. Methodology for calculating the number and optimal placement of members of the auxiliary mine rescue teams for coal mines. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 94-100. EDN NVWTZG

УДК 614.8:69.059

*Алексей Вячеславович Веселов, канд. воен. наук, старший преподаватель;
e-mail: Alexey-1987@mail.ru*

*Роман Михайлович Давыдов, курсант; e-mail: roma2003101@yandex.ru
ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»*

141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А. Тел.: +7 (913) 466-68-87

*Александр Викторович Кузьмин, канд. техн. наук, доцент; e-mail: avkuzmin16@gmail.com
ФГБВОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический*

университет им. А. Н. Туполева – КАИ»

420111, г. Казань, ул. Толстого, 15. Тел.: +7 (909) 311-57-22

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОИСКА ПОСТРАДАВШИХ

Цель. Повышение эффективности технических средств для поиска пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушениями зданий и сооружений.

Методы. Применен комплексный метод исследования, включающий анализ литературных источников, проведен детальный обзор современных технических средств поиска, включая акустические, тепловизионные и радиолокационные системы, применяемые в условиях чрезвычайных ситуаций.

Результаты. Применение комплексного показателя позволяет внедрение в практическую деятельность проведение многокритериального и системного анализа эффективности технических средств для поиска и обнаружения пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с масштабными разрушениями зданий и сооружений.

Научная новизна. Методология позволяет систематизировать технические характеристики, требующие их оптимизации для поискового оборудования.

Практическая значимость. Представленные практические рекомендации могут быть полезны с точки зрения обеспечения высокой готовности аварийно-спасательных служб к выполнению задач по предназначению.

Ключевые слова: поисково-спасательные работы; приборы поиска пострадавших; эффективность; акустические приборы; оптические приборы; радиолокационные приборы; модель эффективности технических средств поиска пострадавших.

Для цитирования: Веселов А. В., Давыдов Р. М., Кузьмин А. В. К вопросу оценки эффективности технических средств поиска пострадавших // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 2 (62). – С. 101–106. – EDN MXEZSQ

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Несмотря на недостаточные показатели эффективности имеющихся отечественных приборов поиска пострадавших, применение технических средств в ведении поисково-спасательных работ не утратило своей актуальности [1, 2].

В данной статье для оценки эффективности технических средств поиска пострадавших предлагается введение комплексного показателя по основным параметрам, влияние на которые позволит существенно повысить эффективность их применения в целом.

Анализ последних исследований и публикаций. Динамика возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением зданий и сооружений, имеет положительный характер. За 2022–2023 гг. в Российской Федерации был зафиксирован 41 случай обрушений зданий и сооружений, тогда как в 2021 г.

подобных случаев было 5 [3]. При этом фундаментальные научные работы в предметной области исследования датированы 2000 годами [4, 5].

Цель. Повышение эффективности технических средств для поиска пострадавших в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушениями зданий и сооружений.

Результаты исследований. С учетом научного и технического развития, а также современных технологий результаты предыдущих исследований утратили свою актуальность [2, 4, 5]. Таким образом, исследование вопросов повышения эффективности применения технических средств поиска открывает новые возможности их применения в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением зданий и сооружений [1, 6].

Чрезвычайные ситуации, связанные с разрушением зданий и сооружений, оказывают существенное влияние на жизнь и здоровье пострадавших, что требует оперативного проведения аварийно-спасательных работ, которые осуществляются в порядке, указанном на схеме (рис. 1).

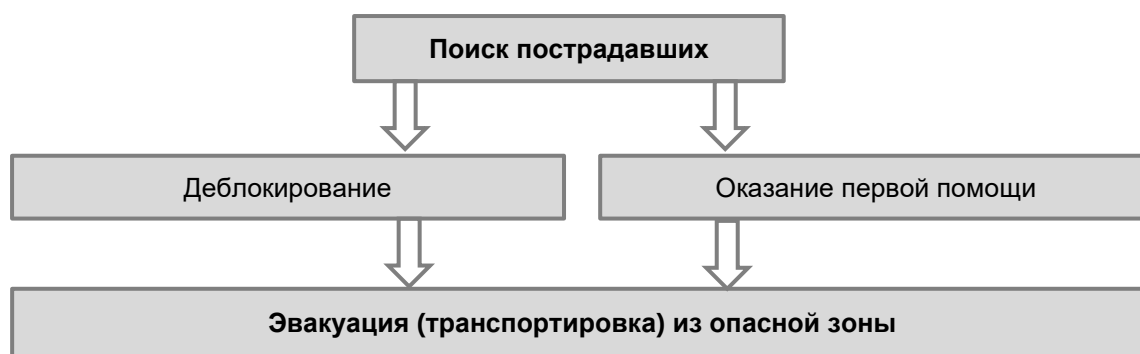


Рис. 1. Типовая технология ведения аварийно-спасательных работ

Поиск пострадавших является первым этапом при ведении аварийно-спасательных работ, а также ключевым при ведении поисково-спасательных работ, которые направлены на установление местонахождения пострадавших, оценку их состояния и оказания им соответствующей помощи [5, 6].

Поиск пострадавших может осуществляться разными способами в зависимости от доступности материально-технических и человеческих ресурсов, задействованных в ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, специфики оперативной обстановки в зоне проведения аварийно-спасательных работ, а также характера и масштаба задач, поставленных перед спасательными подразделениями (рис. 2). Наиболее эффективен поиск при помощи технических устройств [2, 5, 6]. Технические устройства поиска пострадавших предназначены для распознавания и регистрации признаков живого человека, скрытого под слоем завала¹ и реализуют один или несколько физических принципов: акустический, оптический, радиолокационный, электрографический, тепловой или химический².

Например, акустические приборы поиска используют звуковые волны для обнаружения и определения местоположения объектов в различных средах.

¹ ГОСТ 22.9.04-2022 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства поиска людей в завалах. Общие технические требования».

² ГОСТ 22.9.22-2023 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства аварийно-спасательные. Классификация».

Так, на акустическом принципе основан отечественный прибор АПП-1 (акустический прибор поиска пострадавших). Анализ практического применения данного устройства и его тактико-технических характеристик показал, что основными его недостатками являются: ограниченная дальность обнаружения, повышенная чувствительность к помехам, невозможность обнаружения неподвижных пострадавших, низкая энергоэффективность, высокая зависимость от погодных условий, низкая вероятность успешного обнаружения пострадавших, большое время поиска в одной точке завала, а также низкие показатели эргономичности [4].

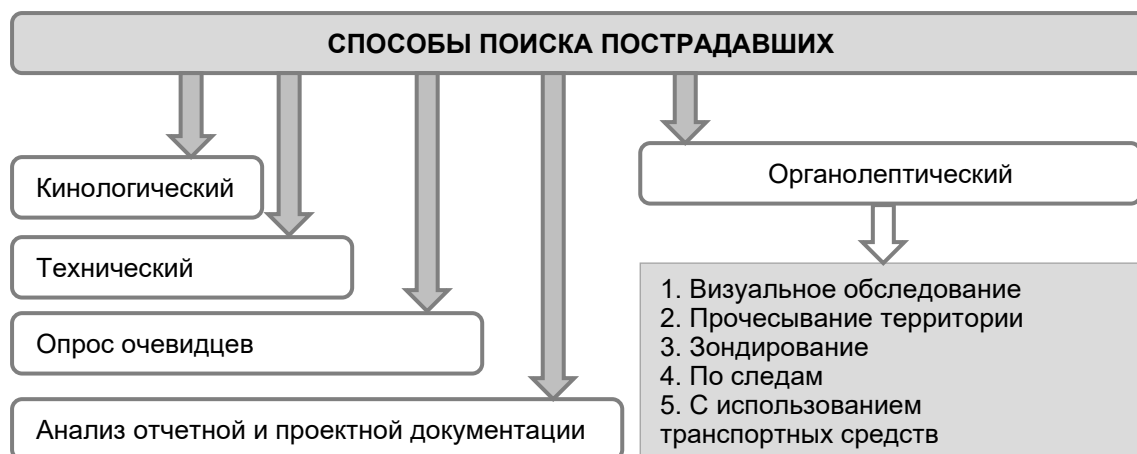


Рис. 2. Способы поиска пострадавших

Существуют также оптические приборы поиска пострадавших, предназначенные для дистанционного визуального обследования участков завалов и установления контакта с пострадавшим. Отечественным прибором, основанным на оптическом принципе, является телевизионная система поиска «Система-1К». Анализ практического применения и тактико-технических характеристик данного устройства показал, что основными его недостатками являются низкие показатели: дальности передачи сигнала на местности, качества изображения, энергоэффективности, устойчивости к внешним воздействиям, вероятности успешного обнаружения пострадавших, а также эргономичности [4].

Наиболее распространенными для поиска пострадавших являются радиолокационные приборы, работающие на основе излучения радиосигналов и анализа отраженных сигналов, что позволяет определять местоположение объектов даже сквозь препятствия. Отечественным представителем данного класса приборов является радиолокационный комплекс «Радар-01». Анализ практического применения и тактико-технических характеристик данного прибора выявил основные его недостатки – низкие показатели дальности обнаружения, эргономичности, вероятности успешного обнаружения пострадавших, энергоэффективности, а также большое время поиска в одной точке завала [4].

На основе проведенного анализа технических средств поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях, связанных с разрушением зданий и сооружений, можно сделать вывод о том, что основными параметрами, формирующими общую эффективность технических средств поиска пострадавших в таких условиях являются: дальность обнаружения пострадавших (L), вероятность

успешного обнаружения пострадавших (W), надежность работы системы (N_{ϕ}), и длительность работы в каждой точке поиска (t_c) [5, 6, 7].

С учетом вышеизложенного возникает необходимость использования комплексного показателя P , позволяющего оценить эффективность технического средства с учетом всех его значимых параметров и представляющего собой функцию от множества единичных показателей, которые необходимо максимизировать [7].

В формализованном виде задача оценки эффективности технических средств поиска пострадавших по присущим им параметрам выглядит следующим образом [7]: необходимо определить такой i -й прибор поиска, который обеспечит максимальную эффективность P :

$$P = f P_i(L, W, N_{\phi}, t_c) \Rightarrow \max,$$

где P_i – эффективность i -го прибора поиска;

L_i – дальность обнаружения пострадавших i -м прибором поиска;

W_i – вероятность успешного обнаружения пострадавших i -м прибором поиска;

$N_{\phi i}$ – надежность работы системы i -го прибора поиска;

t_{ci} – длительность работы в каждой точке поиска i -го прибора поиска;

Применение предложенной модели, основанной на комплексной оценке эффективности технических средств поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях, связанных с разрушением зданий и сооружений, позволяет уже на этапе производства уделять особое внимание параметрам, которые определяют и формируют эффективность прибора в целом. Внедрение данной модели способствует значительному повышению оперативности и точности поисково-спасательных работ за счет обоснованного выбора технических средств в зависимости от сценария чрезвычайной ситуации.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, предложенная модель не только расширяет теоретическую базу для анализа эффективности технических средств поиска пострадавших, но и предоставляет практический инструментарий для повышения качества и результативности спасательных работ, что является важным вкладом в развитие систем обеспечения безопасности и снижения последствий чрезвычайных ситуаций.

Список литературы / References

1. Полевой, В. Г. Приоритеты реализации государственной программы вооружения на 2018-2027 годы для спасательных воинских формирований МЧС России (итоги проведения круглого стола) / В. Г. Полевой, В. В. Сарасеко, Т. Г. Сулима // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 3 (38). – С. 13–24.

Polevoy, V. G., Saraseko, V. V., Sulima, T. G. *Prioritety realizatsii gosudarstvennoy programmy vooruzheniya na 2018-2027 gody dlya spasatel'nykh voinskikh formirovaniy MCHS Rossii (itogi provedeniya kruglogo stola)* [Priorities for the implementation of the state armament program for 2018-2027 for rescue war formation Ministry of Emergency Situation of Russia (results of the round table)]. *Nauchnyye i obrazovatel'nyye problemy grazhdanskoj zashchity*; 2018, no. 3 (38), pp. 13-24. (In Russian)

2. Грязнов, С. Н. Обоснование предложений по дальнейшему развитию системы технического оснащения спасательных сил МЧС России на долгосрочный период / С. Н. Грязнов, В. П. Малышев // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2015. – № 1 (8). – С. 34–50.

Gryaznov, S. N., Malyshev, V. P. *Obosnovaniye predlozheniy po dal'neyshemu razvitiyu sistemy tekhnicheskogo osnashcheniya spasatel'nykh sil MCHS Rossii na dolgosrochnyy period* [Justification of proposals for further development of the system of technical equipment of the rescue forces of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the long term]. Civil Defense Strategy: Problems and Research; 2015, no. 1 (8), pp. 34–50. (In Russian)

3. Зубова, Е. Д. Информационные технологии в профессиональной деятельности : учебное пособие для СПО / Е. Д. Зубова. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 212 с. – ISBN 978-5-507-52598-0. – Текст : электронный – URL: <https://e.lanbook.com/book/455726> (дата обращения: 05.04.2025).

Zubova, Ye. D. *Informatsionnyye tekhnologii v professionalnoy deyatel'nosti : uchebnoye posobiye dlya SPO*. Ed. 4. Sankt-Peterburg, Lan, 2025, 212 p. – ISBN 978-5-507-52598-0. – Available at: <https://e.lanbook.com/book/455726>. (In Russian)

4. Переяслов, А. Н. Проблемы создания технических средств поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях / А. Н. Переяслов, С. П. Тодосейчук, А. И. Запорожец // 25 лет – от идей до технологий : Сборник научно-технических трудов. – Москва, 2001. – С. 266–279.

Pereyaslov, A. N., Todoseychuk, S. P., Zaporozhets, A. I. [Problems of Creating Technical Means of Search for Victims in Emergency Situations]. *25 let – ot idey do tekhnologii: Sbornik nauchno-tekhnicheskikh trudov*. Moscow, 2001, pp. 266–279. (In Russian)

5. Запорожец, А. И. О методологическом подходе к оценке эффективности технических средств поиска пострадавших в чрезвычайных ситуациях / А. И. Запорожец, С. Н. Коробков, С. П. Тодосейчук // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – №1. – С. 94–99.

Zaporozhets, A. I., Korobkov, S. N., Todoseychuk, S. P. [On the methodological approach to assessing the effectiveness of technical means of searching for victims in emergency situations]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti*. 2006, no.1, pp. 94–99. (In Russian)

6. Литвин, А. Л. Методологические подходы к созданию перспективного комплекса инженерной разведки в целях инженерного обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций / А. Л. Литвин, В. А. Малышев, И. В. Треушков // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 4 (39). – С. 20–26.

Litvin, A. L., Malyshev, V. A., Treushkov, I. V. *Metodologicheskiye podkhody k sozdaniyu perspektivnogo kompleksa inzhenernoy razvedki v tselyakh inzhenernogo obespecheniya likvidatsii chrezvychaynykh situatsii* [Methodological approaches to the creation of a promising complex of engineering reconnaissance for the purpose of engineering support for the elimination of emergency situations]. *Nauchnyye i obrazovatelnyye problemy grazhdanskoy zashchity*; 2018, no. 4 (39), pp. 20–26. (In Russian)

7. Формирование системы показателей для оценки эффективности проведения аварийно-спасательных работ при разрушениях зданий на основе результатов натурного эксперимента / А. В. Рыбаков, Т. М. Хидирлясов, Е. В. Иванов, П. П. Петренко // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 3 (58). – С. 6–16.

Rybakov, A. V., Khidirlyasov, T. M., Ivanov, E. V., Petrenko, P. P. [Formation of a system of indicators for evaluation the effectiveness of emergency rescue operations during of destruction of buildings based on the results of field experiment]. *Nauchnyye i obrazovatelnyye problemy grazhdanskoy zashchity*. 2023, no. 3 (58), pp. 6–16. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Ал. В. Агарковым

Дата поступления рукописи 04.06.2025

Дата опубликования 19.06.2025

Aleksey Vyacheslavovich Veselov, Cand. of Military Sci., Senior Lecturer; e-mail: Alexey-1987@mail.ru

Roman Mikhaylovich Davydov, Cadet; e-mail: roma2003101@yandex.ru

The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia

141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya st., 1A. Phone: +7 (913) 466-68-87

Alexander Viktorovich Kuzmin, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: avkuzmin16@gmail.com

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI»

420111, Kazan, Tolstoy st., 15. Phone: +7 (909) 311-57-22

ON THE QUESTION OF ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF TECHNICAL MEANS FOR SEARCHING VICTIMS

Objective. Improving the efficiency of technical means for searching for victims in emergency situations associated with the destruction of buildings and structures.

Methods. A comprehensive research method is applied, including the analysis of literary sources, a detailed review of modern technical search tools, including acoustic, thermal imaging and radar systems used in emergency situations.

Results. The use of a complex indicator allows the introduction into practice of conducting a multi-criteria and systematic analysis of the effectiveness of technical means used to search for and detect victims in emergency situations associated with large-scale destruction of buildings and structures.

Scientific novelty. The methodology allows you to systematize the technical characteristics that require optimization in the technical characteristics of search equipment.

Practical value. The presented practical recommendations can be useful from the point of view of ensuring high readiness of emergency services to perform tasks as intended.

Keywords: *search and rescue operations; victim search devices; efficiency; acoustic devices; optical devices; radar devices; model of efficiency of technical means of victim search.*

For citation: Veselov A.V., Davydov R.M., Kuzmin A.V. On the issue of assessing the effectiveness of technical means for searching for victims. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 2 (62), pp. 101-106. EDN MXEZSQ

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 не решенных 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, недопустимо их включать в рисунок.

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 (от 5 до 15 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; обозначают цифрами в квадратных скобках. Порядок изложения элементов библиографического описания на русском языке определен требованиями ГОСТ Р 7.0.100-2018. Состав 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 на публикацию.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Небрежно оформленные авторские рукописи, или рукописи, которые не соответствуют вышеизложенным требованиям, не рассматриваются.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2025, № 2 (62)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л. В. Барзий

Редактор О. К. Межова

Учредитель и издатель

*Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»*

**Поступившие в редакцию авторские рукописи
проходят рецензирование**

**Ответственность за использование сведений, не подлежащих
открытой публикации, несут авторы опубликованных материалов**

Подписано в печать 19.06.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать лазерная. Усл. печ. л. 12,8. Тираж 20 экз. Заказ № 3

ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России»
ул. Артема, 157, Донецк, 283048
Телефоны: +7 (856) 332-78-01; 332-78-60
e-mail: respirator@80mchs.gov.ru
URL: <http://respirator.dnmchs.ru>