



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»

№ 3 (62)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2025

Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2025. – № 3 (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: Федеральное государственное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России».

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

Подписано к печати 15.09.2025 по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 9 от 04.09.2025).

Дата выхода в свет 19.09.2025.

Распространяется бесплатно.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NII «RESPIRATOR»

No. 3 (62)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2025

Scientific bulletin of the NII «Respirator». – Donetsk, 2025. – No. 3 (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.

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

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

Editorial board:

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

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

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

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

Approved for printing 15.09.2025 according to the reference of the Academic council of FSI «NII «Respirator» EMERCOM of Russia» (Protocol No. 9 dated 04.09.2025).

Release date: 19.09.2025.

Distributed free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ**I. Пожарная безопасность**

**Агарков Ал. В., Политучий Д. А.,
Балта Д. Ф., Буряк Д. С.**

Огнетушитель с раздельным
хранением воды и пенообразователя
для тушения пожаров в шахтах

Борисенко Д. И.

Теоретические основы акустической
диагностики очагов пожара
в угольных пластах

Алексеев С. Г.

Оценка взрывоопасности горючих
газов и легковоспламеняющихся
жидкостей

Лебедева В. В., Храпоненко О. В.

Влияние времени водонасыщения
на кратность вспучивания
огнезащитного покрытия
строительных конструкций

II. Безопасность труда

**Кириян А. П., Мамаев В. В.,
Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С.**

Особенности экономного
кислородопитания респиратора

**Захарова В. В., Подвигина Е. В.,
Подвигин К. А., Горохова Т. Ю.**

Прогнозирование динамики изменения
объема зоны с нормативными
микроклиматическими условиями
в горной выработке нефтяной шахты

Лебедева В. В.

Быстротвердеющий материал
для возведения околострековых полос

Мавроди А. В., Ивахненко А. В.

Повышение безопасности работников
поверхностных комплексов шахт
при подземных пожарах

TABLE OF CONTENTS**I. Fire safety**

**Agarkov A. V., Polituchiy D. A.,
Balta D. F., Buryak D. S.**

7 Fire extinguisher with separate
storage of water and foaming agent
for extinguishing fires in mines

Borisenko D. I.

15 Theoretical foundations of acoustic
diagnostics of ignition sources
in coal beads

Alexeev S. G.

22 Evaluation of explosion hazard
of combustible gases and
flammable liquids

Lebedeva V. V., Khraponenko O. V.

33 Influence of water saturation
time on the swelling ratio
of fire-retardant coating
of building structures

II. Occupational safety

**Kiryan A. P., Mamayev V. V.,
Zborshchik L. A., Pletenetskiy R. S.**

40 Features of economical oxygen
supply of a respirator

**Zakharova V. V., Podvigina E. V.,
Podvigin K. A., Gorokhova T. Yu.**

48 Predicting the dynamics of the volume
change of the zone with standard
microclimatic conditions in a mine
working of an oil shaft

Lebedeva V. V.

59 Fast-hardening material
for constructing near-mine strips

Mavrodi A. V., Ivakhnenko A. V.

66 Improving personnel safety
at surface mine complexes during
of underground fires

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Кирьян А. П.

Методы и технические средства
экстренного охлаждения пострадавших
горнорабочих и спасателей при высоких
температурах в горных выработках шахт

**Колеров Д. А., Щетка В. Ф.,
Шупенко А. М.**

Систематика чрезвычайных ситуаций,
обусловленных военными конфликтами

Кузнецова М. А., Зарипова С. Н.

Обоснование рационального варианта
комплектования штатов территориальных
подразделений Государственного
пожарного надзора

Гарелина С. А., Латышенко К. П.

Модульный аналитико-
экспериментальный метод
прогнозирования загрязнения
воздушной среды в замкнутых объёмах

III. Safety in emergency situations

Kiryan A. P.

Methods and technical means
for emergency cooling of injured
miners and rescuers at high temperatures
in mine workings

**Kolero D. A., Shchetka V. F.,
Shupenko A. M.**

Systematics of emergency situations
caused by military conflicts

Kuznetsova M. A., Zaripova S. N.

Substantiation of the rational staffing
approach for territorial divisions
of the State Fire Supervision

Garelina S. A., Latyshenko K. P.

Modular analytical
and experimental method
for forecasting air pollution
in enclosed spaces

73

80

89

97

I. Пожарная безопасность

УДК 614.845.5

*Александр Владиславович Агарков, канд. техн. наук, зам. нач. института;
e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru*

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

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

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

ОГНЕТУШИТЕЛЬ С РАЗДЕЛЬНЫМ ХРАНЕНИЕМ ВОДЫ И ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ШАХТАХ

Цель. Обосновать параметры и разработать конструкцию переносного воздушно-пенного огнетушителя с раздельным хранением воды и пенообразователя в качестве первичного средства пожаротушения в угольных шахтах, что позволит увеличить срок его эксплуатации без технического обслуживания (перезарядки) до 5–10 лет.

Методы. Использован комплексный метод исследования, включающий анализ научных источников, проведение теоретических и экспериментальных исследований с обработкой результатов при использовании пакетов прикладных компьютерных программ.

Результаты. Установлено, что основными конструктивными параметрами, определяющими эффективность работы огнетушителя, являются диаметры дозирующего отверстия баллона высокого давления, из которого газ поступает в корпус огнетушителя и сопло пеногенератора, а также объем свободного пространства в корпусе над пенообразующим раствором.

Научная новизна. Предложена конструкция и обоснованы параметры переносного воздушно-пенного шахтного огнетушителя для тушения пожаров классов А и В. В отличие от существующих аналогов, в предлагаемом огнетушителе предусмотрено раздельное хранение воды и пенообразователя, что позволяет увеличить интервал между его техническими обслуживаниями.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют существенно снизить эксплуатационные расходы при обеспечении безопасности труда и противопожарной защиты в угольных шахтах, а также получить существенный финансово-экономический эффект, увеличив срок службы огнетушителей, не снижая уровня эффективности огнетушащего вещества и изделия в целом.

Ключевые слова: угольная шахта; горная выработка; подземные пожары экзогенного происхождения; огнетушитель с раздельным хранением воды и пенообразователя; воздушно-механическая пена, конструктивные параметры.

Для цитирования: Агарков Ал. В., Политучий Д. А., Балта Д. Ф., Буряк Д. С. Огнетушитель с раздельным хранением воды и пенообразователя для тушения пожаров в шахтах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 7–14. EDN QIYRVI

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Угольная промышленность – одна из ключевых отраслей экономики России. Однако, несмотря на принимаемые меры по совершенствованию промышленной безопасности, уровень подземных пожаров в общем количестве аварий в отрасли достаточно высокий [1].

Согласно анализу данных Федерального государственного унитарного предприятия «Военизированная горноспасательная часть» МЧС России, за 13-летний период произошло 603 аварии, из них 288 подземных пожаров, а также пожаров на поверхностном комплексе шахт (в среднем – 22 пожара в год).

По частоте возникновения пожары в угольных шахтах составляют 45 % всех подземных аварий. Наиболее часто происходят экзогенные пожары.

Для оперативной ликвидации возникающих очагов горения все подземные горные выработки и поверхностный комплекс шахт обеспечиваются огнетушащими средствами. Самые распространенные средства тушения подземных и поверхностных пожаров в начальный период их возникновения – переносные огнетушители массой до 20 кг.

В настоящее время используемые переносные воздушно-пенные шахтные огнетушители подлежат ежегодной проверке их состояния и технического обслуживания, включающего замену огнетушащего вещества¹. На обслуживание данного типа огнетушителей ежегодно затрачиваются значительные средства предприятий – в среднем до 1 000 руб. на каждый огнетушитель. Принимая во внимание данный недостаток, актуальным направлением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в настоящее время является обоснование параметров и разработка переносного воздушно-пенного шахтного огнетушителя для тушения пожаров классов А и В на поверхностных и подземных объектах, конструкция которого позволит снизить эксплуатационные расходы (срок службы концентрированного пенообразователя, в зависимости от его марки, составляет от 5 до 10 лет) и получить существенный финансово-экономический эффект, увеличив срок службы огнетушителей, не снижая эффективности огнетушащего вещества и изделия в целом.

В отличие от существующих аналогов [2], в предлагаемом огнетушителе должно быть предусмотрено отдельное хранение воды и пенообразователя, что позволит увеличить срок его эксплуатации без технического обслуживания (перезарядки) до 5–10 лет.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ способов тушения экзогенных пожаров в условиях угольных шахт Донбасса и Кузбасса позволил установить, что воздушно-механическая пена – одно из эффективных и универсальных огнетушащих веществ [3, 4], которое отличается следующими свойствами:

- повышенным коэффициентом полезного использования воды, позволяющим получать из единицы ее объема 100–500 л и более объемов пены;
- устойчивостью – длительным сохранением своей структуры и объема;
- способностью перемещаться по поверхности горючего материала под собственным весом или за счет энергии воздушного потока;
- эффективным охлаждением [2].

Впервые в нашей стране воздушно-механическая пена была применена на Донбассе для тушения пожара на шахте им. Ф. Кона в 1960 году. Исследователи пришли к выводу, что воздушно-механическая пена снижает химическую активность угля, охлаждает породы на пути движения, предотвращает приток свежего воздуха к очагу возгорания [5, 6].

Цель исследования – обосновать параметры и разработать конструкцию переносного воздушно-пенного огнетушителя с отдельным хранением воды и пенообразователя в качестве первичного средства пожаротушения в угольных

¹ ГОСТ Р 51057-2001. Государственный стандарт Российской Федерации. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Издание официальное. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 45 с.

шахтах, что позволит увеличить срок его эксплуатации без технического обслуживания (перезарядки) до 5–10 лет.

Результаты исследований. Конструктивно разрабатываемый огнетушитель должен состоять из следующих основных частей: корпуса, устройства запорно-пускового, баллона со сжатым воздухом, сифона с емкостью для хранения концентрированного пенообразователя, а при работе – для выдачи огнетушащего вещества, рукава гибкого с пеногенератором, устройства для фиксации от самопроизвольного срабатывания, подставки для придания устойчивости корпусу.

Огнетушители, в которых для получения и выброса пены используются сжатые газы и, в частности, огнетушители с раздельным хранением сжатого газа и огнетушащего состава, выполняются в виде корпуса с водным раствором пенообразователя и сообщающегося с ним баллона со сжатым до $(150–200) \cdot 10^5$ Па газом. Для приведения огнетушителя в действие газ из баллона выпускается в корпус, в пространство над водным раствором пенообразователя, и последний под действием возникшего в этом пространстве избыточного давления подается на сетку пеногенератора. Основными конструктивными параметрами, определяющими эффективность работы огнетушителя, в таком случае являются диаметры дозирующего отверстия баллона, из которого газ поступает в корпус и сопло пеногенератора, а также объем свободного пространства в корпусе над водным раствором пенообразователя. Так, значительный диаметр дозирующего отверстия, малые диаметр сопла и объем свободного пространства обуславливают интенсивное нарастание давления в корпусе и большую величину его абсолютного значения, которое может превысить допустимый предел. Малый диаметр дозирующего отверстия, большие диаметр сопла и объем свободного пространства приведут к медленному нарастанию давления в корпусе, незначительной величине его абсолютного значения и, как следствие, малой дальности выброса струи, неудовлетворительному процессу пенообразования.

Для рассмотрения взаимосвязи физических процессов, происходящих при работе огнетушителя, представим объем баллона V_1 , давление газа в баллоне P_1 , массу этого газа m_1 и площадь сечения дозирующего отверстия баллона S_1 , а объем пространства в корпусе над водным раствором пенообразователя V_2 , давление газа в этом пространстве P_2 , массу газа m_2 , плотность водного раствора пенообразователя $\rho_{\text{ж}}$ и площадь сечения сопла пеногенератора S_2 . Схема воздушно-пенного огнетушителя представлена на рис. 1.

Работу огнетушителя можно представить в виде двух последовательных этапов:

- первый этап – подача газа из баллона в корпус огнетушителя;
- второй этап – вытеснение огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя.

Для описания **первого этапа** необходимо найти установившееся значение давления после выпуска газа из баллона

$$P_0 V_1 = P(V_1 + V_2),$$

где V_1 , V_2 – объем баллона и газовой полости корпуса огнетушителя соответственно, м^3 ;

P_0 , P – давление зарядки баллона и установившееся, МПа.

$$\frac{dP_1}{d\tau} = kP_1 \frac{1}{m_1} \frac{dm_1}{d\tau}, \quad (2)$$

где m_1 – масса газа в полости баллона, кг.

Поскольку объем газа V_1 в баллоне постоянный, то уравнение (2) в правой части имеет только один член.

Уравнение, связывающее давления P_1 , P_2 является уравнением истечения газа из баллона в газовую полость корпуса огнетушителя (уравнение Сен-Венана и Ванцеля).

$$\frac{dm_1}{d\tau} = -M_1 S_1 P_1 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT} (P_s^{\frac{2}{k}} - P_s^{\frac{k+1}{k}})}, \quad (3)$$

где $M_1 = 0,62$ – коэффициент расхода;

S_1 – площадь сечения дозирующего отверстия баллона, м²;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура газа в баллоне, К.

Равенство (3) справедливо при дозвуковом истечении газа, т. е. при

$$P_s = \frac{P_2}{P_1} > 0,528.$$

Уравнение истечения водного раствора пенообразователя из огнетушителя найдем из выражения

$$Q = M_2 S_2 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_a)}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (4)$$

где Q – объемный расход водного раствора пенообразователя, м³/с;

S_2 – площадь сечения сопла пеногенератора, м²;

P_a – атмосферное давление, МПа;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность водного раствора пенообразователя, кг/м³;

M_2 – коэффициент расхода.

Плотность $\rho_{\text{ж}}$ находим по формуле (поскольку это смесь)

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{в}} + m_{\text{п}}}{V_{\text{в}} + V_{\text{п}}} = \frac{\rho_{\text{в}} V_{\text{в}} + \rho_{\text{п}} V_{\text{п}}}{V_{\text{в}} + V_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{в}}$, $m_{\text{п}}$ – массы воды и пенообразователя в корпусе огнетушителя, кг;

$\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{п}}$ – плотности воды и пенообразователя в корпусе огнетушителя, кг/м³;

$V_{\text{в}}$, $V_{\text{п}}$ – объемы воды и пенообразователя в корпусе огнетушителя, м³.

Формулу (4) перепишем в виде

$$\frac{dV_2}{d\tau} = M_2 S_2 \sqrt{\frac{2(P - P_a)}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (6)$$

Формула (6) отображает то, что газ замещает ровно такой объем жидкости, который истек из сопла пеногенератора в единицу времени.

Уравнение объемов для газа и огнетушащего вещества в корпусе огнетушителя запишем в виде формулы

$$V_k = V_2 + \frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}, \quad (7)$$

где V_k – объем корпуса огнетушителя без объема баллона, м^3 .

Уравнения (1) – (3), (6), (7) запишем в виде системы

$$\begin{cases} \frac{dP_2}{d\tau} = kP_2 \left(\frac{1}{m_2} \frac{dm_2}{d\tau} - \frac{1}{V_2} \frac{dV_2}{d\tau} \right) \\ \frac{dP_1}{d\tau} = kP_1 \frac{1}{m_1} \frac{dm_1}{d\tau} \\ \frac{dm_1}{d\tau} = -M_1 S_1 P_1 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT} \left(P_s^{\frac{2}{k}} - P_s^{\frac{k+1}{k}} \right)} \\ \frac{dV_2}{d\tau} = M_2 S_2 \sqrt{\frac{2(P - P_a)}{\rho_{\text{ж}}}} \\ V_k = V_2 + \frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \end{cases} \quad (8)$$

Система уравнений (8) замкнута относительно искомых функций m_1, m_2, P_1, P_2, V_2 .

Начальные условия:

$$P_1(0) = P_2(0) = P_0 \frac{V_1}{(V_1 + V_2)}; m_1(0) = m_{01}; m_2(0) = m_{02}; V_2(0) = 0,15V_k.$$

Полученная система является нелинейной и не поддается аналитическому решению. Ее решение было реализовано на персональном компьютере с применением метода Рунге-Кутты. На рис. 2 представлены графики изменения давления P_1 и P_2 во времени.

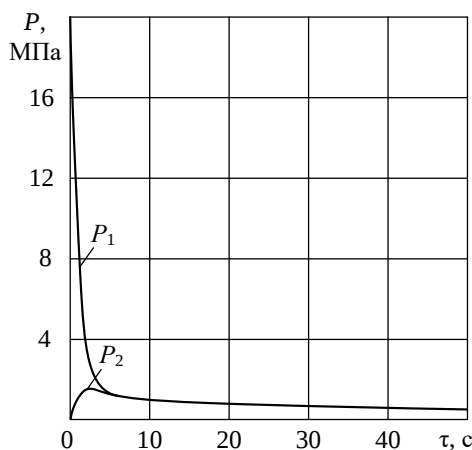


Рис. 2. Графики изменения давления P_1 и P_2 во времени

Разработанная математическая модель неустановившегося процесса истечения из корпуса огнетушителя с использованием аккумулированного давления газа может быть использована для расчета конструктивных параметров огнетушителей, работающих в описанном выше режиме.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Испытания экспериментальных образцов огнетушителя (трех единиц, за основу были взяты усредненные данные) показали надежность и эффективность предлагаемого изделия. Параметры изделия соответствуют приведенным выше результатам исследований. Огнетушитель конструктивно прост, технологичен в изготовлении и удобен в эксплуатации.

Внедрение данного огнетушителя позволит повысить уровень противопожарной защиты поверхностных и подземных объектов, а также достичь снижения эксплуатационных расходов на техническое обслуживание воздушно-пенных шахтных огнетушителей.

Список литературы / References

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

Fedorenko, Ye. I., Kobylkin, S. S. *Problema podzemnykh pozharov i ikh tushenie na bolshikh glubinakh v ugolnykh shakhtakh* [Problem of underground fires and fire extinguishing at the deep depth of coal mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2011, no. 8, pp. 197-207. (In Russian)

2. Левина, И. В. Особенности применения воздушно-механической пены для тушения пожаров / И. В. Левина, Н. С. Кицаева // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Саратов. – 2018. – С. 371–374.

Levina, I. V., Kicaeva, N. S. *Osobennosti primeneniya vozdushno-mekhanicheskoy peny dlya tusheniya pozharov* [Features of the use of air-mechanical foam for extinguishing fires]. *Innovacii v prirodoobustroytve i zashchite v chrezvychajnykh situatsiyah: materialy IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Saratov, 2018, pp. 371-374. (In Russian)

3. Булгаков, Ю. Ф. Экспериментальные исследования параметров заполнения воздушно-механической пеной тупиковой горной выработки / Ю. Ф. Булгаков, В. В. Мельникова, Е. В. Курбацкий // Проблемы горного дела: сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ. – 2021. – С. 250–254.

Bulgakov, Yu. F., Melnikova, V. V., Kurbackij, E. V. *Eksperimentalnye issledovaniya parametrov zapolneniya vozdushno-mekhanicheskoy penoj tupikovej gornoj vyrabotki* [Experimental studies of the parameters of filling a dead-end mine working with air-mechanical foam]. *Problemy gornogo dela: sbornik nauchnyh trudov II Mezhdunarodnogo Foruma studentov, aspirantov i molodyh uchenyh-gornikov, posvyashchennogo 100-letiyu DonNTU*. Donetsk: DonNTU, 2021, pp. 250-254. (In Russian)

4. Заверюха, В. В. Средства и способы тушения пожаров в тупиковых горных выработках / В. В. Заверюха // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 138–145.

Zaveryuha, V. V. *Sredstva i sposoby tusheniya pozharov v tupikovykh gornyx vyrabotkakh* [Means and methods of extinguishing fires in dead-end mine workings]. *Innovacionnye perspektivy Donbassa: materialy 5-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Donetsk: DonNTU, 2019, pp. 138-145. (In Russian)

5. Пашковский, П. С. Совершенствование конструкции закачных ручных огнетушителей / П. С. Пашковский // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 4 (55). – С. 15–24.

Pashkovskiy, P. S. *Sovershenstvovanie konstrukcii zakachnyh ruchnyh ognetushitelej* [Improving the design of self-priming hand-held fire extinguishers]. *Nauchnyj vestnik NIIGD «Respirator»*, 2018, no. 4 (55), pp. 15-24. (In Russian)

6. Балта, Д. Ф. Повышение эффективности переносного огнетушителя / Д. Ф. Балта // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2015. – Вып. 52. – С. 148–152.

Balta, D. F. *Povyshenie effektivnosti perenosnogo ognetushitelya* [Improving the efficiency of a portable fire extinguisher]. *Nauchnyj vestnik NIIGD «Respirator»*, 2015, no. 52, pp. 148-152. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 08.08.2025

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

Dmitry Alekseevich Polituchy, Head of Department; e-mail: poletuchi@mail.ru

Daria Fyodorovna Balta, Senior Researcher; e-mail: balta_darya@mail.ru

Dmitry Sergeevich Buryak, Senior Researcher; e-mail: buryak_ds@mail.ru

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

FIRE EXTINGUISHER WITH SEPARATE STORAGE OF WATER AND FOAM CONCENTRATE FOR EXTINGUISHING FIRES IN MINES

Purpose. To substantiate the parameters and develop a design for a portable air-foam fire extinguisher with separate storage of water and foaming agent as a primary means of fire extinguishing in coal mines, which will improve the level of fire protection at mining enterprises.

Methods. A comprehensive research method was used, including the analysis of scientific sources, conducting theoretical and experimental studies with processing of results using application software packages.

Results. The main design parameters that determine the efficiency of the fire extinguisher are the diameters of the metering hole of the cylinder, through which the gas enters the body and nozzle of the foam generator, as well as the volume of free space in the body above the foam-forming solution.

Scientific novelty. The design is proposed and the parameters of a portable air-foam mine fire extinguisher for extinguishing fires classes A and B are substantiated. Unlike existing analogues, the proposed fire extinguisher provides for separate storage of water and foaming agent, which allows increasing the interval between its maintenance.

Practical value. The results of the research make it possible to significantly reduce operating costs when ensuring occupational safety and fire protection in coal mines, as well as to obtain a significant financial and economic effect by increasing the service life of fire extinguishers without reducing the efficiency of the fire extinguishing agent and the product as a whole.

Keywords: coal mine; mine workings; underground fires of exogenous origin; fire extinguisher with separate storage of water and foaming agent; air-mechanical foam; constructive parameters.

For citation: Agarkov A. V., Polituchiy D. A., Balta D. F., Buryak D. S. Fire extinguisher with separate storage of water and foaming agent for extinguishing fires in mines. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 7-14. EDN QIYRVI

УДК 622.822.2:681.88

*Дмитрий Иванович Борисенко, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: dima-luxinshi@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1. Тел.: +7(926)800-52-05*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ОЧАГОВ ПОЖАРА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ**

Цель. Теоретическое обоснование обязательности существования информационных признаков диагностируемого события, в частности, процессов самопроизвольного выделения теплоты в угле.

Методы. Анализ понятия «потеря энергии» с точки зрения термодинамики; изучение механизмов акустического излучения в условиях самонагрева и горения угля; обобщение и формулировка принципа акустической диагностики очагов пожара в угольных пластах.

Результаты. На основе базовых законов термодинамики показана обязательность существования информационных признаков процессов, связанных с выделением теплоты, в частности – самонагрева и горения угля для диагностики очагов пожара в угольных пластах.

Научная новизна. Впервые сформулирован принцип диагностики процессов самопроизвольного выделения теплоты, в частности очагов пожара в угольных пластах, на основе рассмотрения «потери энергии» при её трансформации из одной формы в другую в качестве информационного признака; раскрытия механизмов формирования акустического излучения при самонагревании и горении угля.

Практическая значимость. Сформулированный принцип позволяет разрабатывать способы диагностики процессов, связанных с выделением теплоты, в частности, процессов самонагрева и горения различных сред, оптимальным образом для конкретных условий.

Ключевые слова: акустическая диагностика; очаги; самонагревание; пожар; угольные пласты.

Для цитирования: Борисенко Д. И. Теоретические основы акустической диагностики очагов пожара в угольных пластах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 15–21. – EDN VIQCVQ

Постановка проблемы. На данный момент отсутствует теоретическое обоснование акустической диагностики очагов пожаров в угольных пластах.

В частности, не рассматриваются совокупно различные механизмы генерации акустических импульсов при горении, а главное – наблюдаемые явления не связываются с фундаментальными законами природы. А следовательно, не возникает возможности системной разработки соответствующих технических решений, в частности, оптимальных способов акустической диагностики очагов пожаров в угольных пластах для конкретных, очень разнообразных условий.

Цель работы. Теоретическое обоснование обязательности существования информационных признаков диагностируемого события, в частности, процессов нагрева (в том числе самопроизвольного) и горения угля.

Анализ последних исследований. В последние годы наблюдается рост интереса к акустической диагностике пожаров в угольных пластах, причём, как у нас в стране, так и за рубежом [1–6]. Однако, возникновение акустического поля при процессах самонагрева и горения угля воспринимается как данность и исследуются лишь эмпирические связи различных характеристик (в том числе с использованием искусственного интеллекта [7]).

Результаты исследований. Для создания теоретической основы акустической диагностики использовали фундаментальные законы естествознания – два начала

термодинамики. Первый закон термодинамики гласит, что энергия сохраняется (не исчезает), переходя из одной формы в другую (химическую, тепловую, механическую и т.п.) [8, с. 30]. Второй закон термодинамики гласит, что энергия не может полностью перейти из одной формы в другую – обязательно имеют место «потери» в техническом смысле [8, с. 58–60].

Одним из наиболее часто используемых в технике понятий является коэффициент полезного действия:

$$\eta = (E_{\text{пол}} / E_{\text{затр}}) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где η – коэффициент полезного действия, %;

$E_{\text{пол}}$ – полезная энергия, Дж;

$E_{\text{затр}}$ – затраченная энергия, Дж.

Законы природы устроены так, что всегда

$$E_{\text{пол}} < E_{\text{затр}}, \text{ соответственно } \eta < 1. \quad (2)$$

Здесь проявляется терминологический нюанс: что считать «полезным» при явно вредном процессе неконтролируемого саморазогревания? Если подходить чисто формально, то с термодинамических позиций можно считать, что $E_{\text{пол}}$ – выделившаяся в процессе саморазогревания теплота (соответственно $E_{\text{затр}}$ – изменение теплоты сгорания участвующего в этом процессе вещества).

Величину « $E_{\text{затр}} - E_{\text{пол}}$ » (в относительном виде « $1 - \eta$ ») принято называть «потерями», в силу (2) всегда $1 - \eta > 0$, и в задачи инженеров входит её минимизация. Происхождение термина «потери» вопросов не вызывает, всё достаточно очевидно и логично: энергия, которая могла бы принести пользу, эту пользу не приносит, «теряется». Но ведь в природе ничего не теряется, и тем более в природе понятие «пользы» (полезности) если вообще и применимо, то его смысл не совпадёт с тем, что подразумевается в технике.

При любом процессе, даже при выделении теплоты (будь то горение или самонагревание), не вся выделяющаяся (подводимая) энергия переходит в теплоту – по базовым фундаментальным законам обязаны иметь место «потери»: различные явления, на которые тратится исходная энергия. Но это не означает, что, в конечном счёте, в результате цепи преобразований из одной формы в другую, вся начальная энергия не перейдёт в теплоту.

Применительно к рассматриваемой ситуации – эндотермическим процессам в угольных пластах, должны иметь место явления нетеплового характера, на которые затрачивается тепловая энергия. Уголь является многокомпонентной средой, содержащей различные структурные элементы, в том числе и с сегнетоэлектрическими свойствами [9, с. 100]. При нагреве угля его структурные элементы расширяются и возникает трение, реализуется пьезоэффект и электрическое поле. Это значит, что не вся химическая энергия угля переходит в теплоту. Отметим также, что возникающее в результате пьезоэффекта электрическое поле порождает магнитное поле – возникает электромагнитное излучение, которое распространяется в окружающую среду, и его, вообще говоря, можно зарегистрировать [10] и получить информацию о порождающих его причинах.

То есть при формальном рассмотрении процесса самонагревания угля с термодинамической точки зрения получается, что часть химической энергии

угля, в технике относящаяся к «потерям» (являющаяся не теплотой, а работой расширения), порождает явление, сопровождающееся излучением, по регистрации которого можно получить информацию о процессе нагрева угля. Иными словами, пользу из «потерь» извлечь всё-таки можно – они несут информацию. Как эту информацию зарегистрировать и интерпретировать – вопрос следующий.

Каких-либо ограничений относительно информационных признаков, строго говоря, нет, и можно опираться на те виды излучения и изменение соответствующих полей, которые удобнее регистрировать в каждой конкретной ситуации. Известны способы диагностики пожаров в угольных пластах (и соответственно их самонагревания) по регистрации индикаторных газов [11], температуры [12], влажности [13], электромагнитного¹ и радиоактивного [14, стр.155] излучений. Однако в рамках настоящей работы мы рассматриваем акустическую диагностику.

Если ситуацию с нагреваемым (разогревающимся) углём рассмотреть подробнее, то увидим, что нетепловых явлений, но обусловленных нагревом, в нём происходит гораздо больше.

В результате нагрева и вызванного этим удаления влаги изменяются адгезия и когезия – происходит сушка угольного вещества. Компоненты угольного вещества плавятся и сублимируются, в результате чего связь между структурными элементами также ослабевает. Заметим, что при невысоких средних значениях в локальных зонах интенсивность колебаний молекул может соответствовать значениям температуры, на порядки превышающим средние значения. Высыхая, влага изменяет положение в поровом пространстве угля – в зоне контакта мениска капельной фазы и стенки возникают капиллярные силы, значение которых тем выше, чем меньше диаметр канала, данное явление также приводит к дезинтеграции угольного вещества. Уголь является многокомпонентной средой и его структурные элементы характеризуются различными значениями зависящих от температуры теплофизических свойств, главным образом теплоёмкости, теплопроводности и термического расширения. Поэтому при нагреве они деформируются неравномерно, из-за чего на их границах возникают механические напряжения, которые при продолжении нагрева превышают критические значения и образуются микроразрывы. В свою очередь коэффициенты термического расширения твёрдого угольного вещества и воды также различаются и при нагреве вода, зажата в замкнутых порах разрывает уголь. Если в замкнутой поре, где содержится влага, достаточно пространства для расширения воды, то вследствие замкнутости объёма давление в нём повышается, и испаряющаяся вода разрывает свой «сосуд». Такая же ситуация наблюдается и при наполнении пор выходящими летучими компонентами. На образующихся свободных поверхностях скапливаются высвобождающиеся при разрыве химических связей заряженные частицы, из-за чего между этими поверхностями возникают кулоновские силы, способствующие дезинтеграции угольного вещества. Кроме этого, при нагреве интенсифицируются химические

¹ Патент РФ RU 2514017C1. Способ оценки эндогенной пожароопасности при подземной разработке угольных пластов : 2013102323/03А : заявл. 17.01.2013 : опубл. 27.04.2014 / Шлапаков, П. А., Ерастов, А. Ю., Сороковых, С. В., Рыков, А. М.

реакции (главным образом, окисление), в результате которых атомы углерода покидают угольную матрицу, что тоже её ослабляет.

Все эти эффекты накладываются друг на друга, и при продолжении нагрева это приводит к образованию в угле трещин, кромки которых совершают колебательные движения. А поскольку колебания в конденсированной среде сопровождаются появлением акустических (упругих) волн, то при нагреве угля возникает акустическое поле. Регистрируя это поле, можно диагностировать порождающую его причину – нагрев угля [1].

Таким образом, возникновение акустического поля обусловлено характерными событиями – образованием трещин. Принципиально, что по регистрируемому излучению можно запеленговать и источник возникающего поля – «характерную зону» – локальную, маленькую по размерам по сравнению с областью протекания процесса, часть пространства, в которой реализуется характерное событие. Отметим, что характерными зонами на мезо- (и микромасштабе) можно принимать непосредственно отдельные трещины и микротрещины, а на макромасштабе – весь очаг пожара (очаг самонагрева) – его окисляющуюся кромку.

Итак, обобщим: энергия, выделяющаяся в процессе нагрева угольного пласта (в т.ч. при самонагревании и горении) расходуется на множество явлений различной природы, в том числе таких, в результате которых в горном массиве возникает (или изменяется) доступное для инструментального контроля акустическое поле, по проявлениям которого можно установить факт нагрева, его интенсивность и пространственно-временное положение границы его очагов.

Сформулируем суть подхода, который поможет нам создавать технические решения в области диагностики процесса самонагрева различных сред, склонных к этому явлению.

Затрачиваемая при протекании процесса, обусловленного подводом или выделением теплоты, энергия расходуется на множество одновременно имеющих место явлений, в том числе «побочных», расходование энергии на которые в технике принято относить к «потерям». Вследствие этих явлений в характерных зонах – локальных, маленьких по размерам по сравнению с областью протекания процесса, частях пространства – происходят характерные события. По наблюдаемым признакам таких событий можно получать информацию об исходном процессе. Причём наблюдаемые характерные события и их признаки можно выбирать из условий удобства регистрации в каждом конкретном случае.

Если подойти к вопросу с позиций фундаментальных законов, то они выполняются для различных ситуаций. В этом проявляется один из принципов природоподобия: природа скупа на способы, но изобилует их всевозможными реализациями.

Поскольку, как отмечалось выше, в рамках настоящей работы рассматривается акустическая диагностика, то приведенный принцип формулируется одной фразой. Процесс самонагрева угля сопровождается явлениями, в результате которых происходят изменения акустического поля, несущие информацию об исходном процессе.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Характерное акустическое излучение возникает при трещинообразовании в угле, вызванном различными явлениями, порождаемыми его самонагреванием и горением. При горении угля часть выделяющейся энергии расходуется на различные

явления, в результате которых в угле протекает процесс трещинообразования, сопровождающийся возникновением акустического излучения, несущего информацию о процессе горения, причём, на разных масштабах источники излучения реализуются в ограниченных пространственно-временных зонах.

Впервые на основе фундаментальных законов термодинамики показана обязательность существования информационных признаков процесса нагрева угля. Часть энергии, в том числе и той, которую в технике принято относить к «потерям», расходуется на явления, сопровождающиеся информационными признаками, по которым можно диагностировать процесс нагрева и горения.

Впервые предложена формулировка принципа, позволяющего разрабатывать технические решения в области диагностики процессов, обусловленных трансформацией энергии. Информация о диагностируемом процессе содержится в характерных признаках (например, сигнальных излучениях или их изменении), генерируемых характерными событиями, возникающими в характерных зонах – локальных, маленьких по размерам по сравнению с областью протекания процесса, частях пространства, непосредственно в которых реализуются характерные события – вследствие различных явлений, порождаемых диагностируемым процессом.

Фундаментальные закономерности природы проявляются в различных ситуациях, поэтому дальнейшими перспективами в данном направлении являются распространение сформулированного принципа на иные области и разработка соответствующих технических решений.

Список литературы / References

1. Борисенко, Д. И. Акустический способ диагностики очагов пожаров в угольных пластах / Д. И. Борисенко // Уголь. – 2013. – № 9 (1050). – С. 44–45. – EDN SYTNPF.

Borisenko, D. I. *Akusticheskiy sposob diagnostiki ochagov pozharov v ugolnykh plastakh* [Acoustic Method of Diagnostics of Coal Bed Fire Seats]. *Ugol*, 2013, no. 9(1050), pp. 44–45. (In Russian)

2. Fa-qiang Su, Ken-ichi Itakura, Gotta Deguchi, Koutarou Ohga. Monitoring of coal fracturing in underground coal gasification by acoustic emission techniques. *Applied Energy*, 189 (2017), 142–156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.082>. (In English)

3. Rakesh Kumar Mishra, P N S Roy, Virendra Kumar Singh, Jai Krishna Pandey. Detection and delineation of coal mine fire in Jharia coal field, India using geophysical approach: A case study. *Journal of Earth System Science*, 127(8) (2018). Available at: <https://doi.org/10.1007/s12040-018-1010-8>. (In English)

4. Lucica Anghelescu, Bogdan Marian Diaconu. Advances in Detection and Monitoring of Coal Spontaneous Combustion: Techniques, Challenges, and Future Directions. *Fire*, 7(10) (2024), 354. Available at: <https://doi.org/10.3390/fire7100354>. (In English)

5. Коршунов, Г. И. Актуальные методы определения очагов самовозгорания на угольных шахтах/ Г. И. Коршунов, Н. А. Мироненкова, А. А. Полешчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_169.

Korshunov, G. I., Mironenkova, N. A., Poleshchuk, A. A. [The topical methods of detecting spontaneous combustion sources in coal mines]. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 5, pp.169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_169. (In Russian)

6. Kong Biao, Zhong Jianhui, Lu Wei, et al. Progress in the study of acoustic affects and precursor characteristics during spontaneous combustion of coal [J]. Coal Science and Technology, 53(2) (2025), 209-219. (In English)

7. Jun Guo, Haoyu Shang, Guobin Cai, Yongfei Jin, Kaixuan Wang, Shuai Li. Early Detection of Coal Spontaneous Combustion by Complex Acoustic Waves in a Concealed Fire Source. ACS Omega, 8 (19) (2023). Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00199>. (In English)

8. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика [Электронный ресурс] : учебник для вузов/ В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – URL: <https://djvu.online/file/xMWmmLh4BRben?ysclid=mcnidep81m254870813> (дата обращения: 16.04.2025)

Kirillin, V. A., Sychev, V. V., Sheindlin, A. E. *Tekhnicheskaja termodinamika (Elektronnyj resurs): uchebnik dlja vuzov* [Technical thermodynamics (Electronic resource): textbook for universities]. M.: Publishing House MEI, 2016. Title from the title. the screen. Available at: <https://djvu.online/file/xMWmmLh4BRben?ysclid=mcnidep81m254870813> (accessed 04.16.2025). (In Russian)

9. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород: Учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик / 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 359 с.

Rzhevsky, V. V., Novik, G. Ya. *Osnovy fiziki gornyx porod: uchebnik dlja vuzov* [Fundamentals of rock physics: A textbook for universities]. 4th ed., revised. and add. M. : Nedra, 1984, 359 p. (In Russian)

10. Измерительная система синхронной регистрации сигналов ЭМИ и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах/ А. Г. Вострецов, Г. И. Кулаков, А. А. Бизяев, Г. Е. Яковицкая // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 204–210. DOI: 10.15372/FTPRPI20170622.

Vostretsov, A. G., Kulakov, G. I., Bizyaev, A. A., Yakovitskaya, G. E. *Izmeritel'naya sistema sinkhronnoy registracii signalov EMI i mekhanicheskikh parametrov deformirovaniya obrazcov gornyx porod v laboratornykh eksperimentakh* [Measuring system for synchronous recording of EMR signals and mechanical parameters of deformation of rock samples in laboratory experiments]. Physico-technical problems of mining, 2017, no. 6, pp. 204-210 DOI: 10.15372/FTPRPI20170622. (In Russian)

11. Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения / В. Г. Игишев, П. А. Шлапаков, С. А. Хаймин, С. А. Син // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – №4. – С. 55–59.

Igishev, V. G., Shlapakov, P. A., Khaimin, S. A., Sin, S. A. *Vydelenie indikatornykh požarnykh gazov pri okislenii uglya na stadiyakh samonagrevaniya i besplamennogo goreniya* [Release of indicator fire gases during coal oxidation at the stages of self-heating and flameless burning]. Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal industry, 2015, no. 4, pp. 55-59. (In Russian)

12. Yi Xu, Hongdong Fana, Libo Dang. Monitoring coal seam fires in Xinjiang using comprehensive thermal infrared and time series InSAR detection. International Journal of Remote Sensing. 42 (2021), 2220-2245 <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1823045>. (in English)

13. Mishra P. K., Subhash Kumar, Prabhat Kumar Mandal. Application of sensors for detection of underground coal mine fire: a review. (International Conference) CETAF C BESU Shibpur, Kolkata. 19 (2013), 201-213. (In English)

14. Опыт применения геофизической съёмки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагревания на угольных складах и выбора способа их тушения / А. Ю. Ерастов [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 152–156.

Erastov, A. Yu., Potapov, P. V., Shlapakov, P. A., Schenev, A. V., Li, K. Kh., Titov, E. N., Chupin, A. N. *Opyt primeneniya geofizicheskoy semki i teplovizionnogo kontrolya dlya vyyavleniya ochagov samonagrevaniya na ugolnykh skladakh i vybora sposoba ikh tusheniya* [Experience in using geophysical surveying and thermal imaging control to identify self-heating foci in coal depots and choosing a method for extinguishing them]. Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal industry, 2012, no. 2, pp. 152-156. (In Russian)

Рекомендовано к публикации Курчатовским комплексом
перспективной атомной энергетики
НИЦ «Курчатовский институт» 22.05.2025

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 20.06.2025

Dmitry Ivanovich Borisenko, *Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: dima-luxinzhi@mail.ru*
National Research Centre «Kurchatov Institute»
123182, Moscow, Akademika Kurchatova pl., 1. Phone: +7 (926) 800-52-05

THEORETICAL FOUNDATIONS OF ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF IGNITION SOURCES IN COAL BEADS

Objective. Theoretical substantiation of the mandatory of the existence of information signs of the diagnosed event, in particular, the processes of spontaneous heat generation in coal.

Methods. Comprehension of the fundamental laws of nature, in particular the concept of «energy loss»; consideration of the mechanisms of acoustic radiation during self-heating and coal combustion; generalization and formulation of the principle of acoustic diagnostics of fire sources in coal beads.

Results. Based on the basic laws of nature, the mandatory of the existence of information signs of processes related to the release of heat, in particular, self-heating and coal burning for the diagnosis of fire foci in coal seams, is shown.

Scientific novelty. For the first time, the principle of diagnosing the processes of spontaneous heat generation, in particular, fire foci in coal seams, was formulated based on the consideration of «energy losses» during its transformation from one form to another as an informational feature; for the first time, more than ten mechanisms of acoustic radiation occurrence during self-heating and self-combustion of coal are given in one work.

Practical value. The formulated principle makes it possible to develop methods for diagnosing processes related to heat generation, in particular, the processes of self-heating and combustion of various media, in an optimal way for specific conditions.

Keywords: *acoustic diagnostics; foci; self-heating; fire; coal beads.*

For citation: Borisenko D. I. Theoretical foundations of acoustic diagnostics of ignition sources in coal beads. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 15-21. EDN VIQCVQ

УДК 614.841.242:[621.6.028+620.263]

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

**ОЦЕНКА ВЗРЫВООПАСНОСТИ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ
И ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ**

Цель. Разработка общего рейтинга взрывопожароопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей по минимальному безопасному удельному объему помещений.

Методы. Аналитические методы исследования на основе методик СП 12.13130.2009 и СП 364.1311500.2018.

Результаты. Составлен рейтинг взрывопожароопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей по минимальному безопасному удельному объему помещений. Предложена справочная таблица для упрощения процедуры проверки отнесения производственных и складских помещений к взрывопожароопасным категориям А или Б.

Научная новизна. Применение минимального безопасного удельного объема помещений для ранжирования взрывоопасных свойств горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей.

Практическая значимость. Разработана справочная таблица минимального безопасного удельного объема помещений для работников проектных организаций и инспекторов надзорных органов, что позволяет оперативно выполнить проверку отнесения производственных и складских помещений к категориям А или Б по взрывопожароопасности.

Ключевые слова: взрыв; пожар; минимальный безопасный удельный объем; горючий газ; легковоспламеняющаяся жидкость.

Для цитирования: Алексеев С. Г. Оценка взрывоопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 22–32. – EDN ETNXUE

Постановка проблемы. Взрывы горючих газов (далее – ГГ) и паров легковоспламеняющихся жидкостей (далее – ЛВЖ) нежелательный спутник человеческой жизнедеятельности, поэтому данная проблема является актуальной, и до сих пор она изучается многими исследователями из разных стран [1–8]. В промышленности доля взрывов газопаровоздушных смесей (далее – ГПВС) по разным оценкам составляет примерно от 40 до 65 % от всех техногенных аварий, связанных со взрывами [9–12].

При проектировании новых или реконструкции старых зданий, сооружений, строений и помещений производственного и складского назначения класса Ф5, на которых обращаются ГГ и/или ЛВЖ, возникает потребность в проверке на их отнесение к взрывопожароопасной категории по СП 12.13130.2009¹ «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности». В случае применения нескольких видов ГГ и/или ЛВЖ, возникает проблема в выборе наиболее неблагоприятного расчетного варианта аварии, и как следствие из этого определение наиболее взрывоопасных ЛВЖ и ГГ.

На основании вышесказанного следует, что разработка общего рейтинга взрывоопасности ГГ и ЛВЖ является актуальной задачей.

¹ СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности [Электронный ресурс]: (утв. Приказ МЧС РФ от 25.03.2009 № 182 (ред. от 09.12.2010)). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

Анализ последних исследований. В предыдущих исследованиях показано, что выбор наиболее взрывоопасной ЛВЖ далеко непростая задача. Для ее решения нами использован обобщенный параметр – минимальный безопасный удельный объем (ΔV), под которым понимается объем помещения, отнесенный к аварийному разливу 1 л или 1 кг ЛВЖ, при котором создается избыточное давление взрыва паровоздушной смеси 5 кПа [11–13].

Уравнения (1) и (2) для расчета ΔV для ЛВЖ получены путем преобразования формулы (А.4) из СП 12.13130.2009 [11–13].

$$\left\{ \Delta P = \frac{m \Delta H_{\text{гор}} P_o Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{в}} C_p T_o K_n} \right. \text{ (А.4)} \left. \right\} \Rightarrow 5 = \frac{m \Delta H_{\text{гор}} P_o \times 0,3}{0,8 \times \Delta V \rho_{\text{в}} C_p T_o \times 3} \Rightarrow \Delta V = \frac{m \Delta H_{\text{гор}} P_o}{40 \rho_{\text{в}} C_p T_o}; \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{m \Delta H_{\text{гор}} P_o}{40400 \rho_{\text{в}} T_o}, \quad (2)$$

где ΔP – избыточное давление взрыва, $\Delta P = 5$ кПа;

m – масса испарившейся жидкости при разлитии 1 л ЛВЖ в течение 3600 с, кг;

$\Delta H_{\text{гор}}$ – теплота сгорания, Дж/кг;

P_o – начальное давление, $P_o = 101$ кПа;

Z – коэффициент участия горючих паров во взрыве, $Z = 0,3$;

$V_{\text{св}}$ – свободный объем помещения, м³;

C_p – теплоемкость воздуха, $C_p = 1010$ Дж/(кг×К);

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха при рабочей температуре, кг/м³;

T_o – рабочая температура, К;

K_n – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения,

$K_n = 3$; ΔV – минимальный безопасный удельный объем, м³.

В СП 364.1311500.2018² приведено уравнение (3) для оценки взрывопожароопасности помещений при утечке газообразного или жидкого топлива из автотранспортного средства. Анализ п. 6.11 данных Сводов правил показывает, что при разработке нормативного документа использована идея оценки взрывоопасности по безопасным объемам помещений [11–13] при разрешенных в СП 12.13130.2009 допущениях: $C_p = 1010$ Дж/(кг×К), $t_p = (T_o - 273) = 61$ °С, $P_o = 101$ кПа³. Как показывает нижеприведенный расчет в знаменателе формулы (3) из СП 364.1311500.2018 допущена опечатка – указано 5,58 вместо 5,30. При выводе уравнения (3а) учтено, что $\Delta H_{\text{гор}}$ и H_T – это теплота сгорания горючего вещества в Дж/кг и МДж/кг соответственно.

$$V_{\text{доп}} = \frac{100 m H_T Z}{5,58}; \quad (3)$$

$$\text{(А.4)} \Rightarrow 5 = \frac{m \Delta H_T \times 10^6 \times 101 \times Z}{V_{\text{доп}} \times 1,0572 \times 1010 \times 334 \times 3} \Rightarrow V_{\text{доп}} = \frac{100 m \Delta H_T Z}{5,296572} \approx \frac{100 m \Delta H_T Z}{5,30}; \quad (3a)$$

² СП 364.1311500.2018 Свод правил. Здания и сооружения для обслуживания автомобилей. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: (утв. Приказ МЧС РФ от 10.04.2018 № 154, ред. от 24.05.2023). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

³ Плотность воздуха ($\rho_{\text{в}}$) рассчитана при 61 °С по СП 12.13130.2009.

где $V_{\text{доп}}$ – допустимый объем, м³;

H_{T} – теплота сгорания ГГ или ЛВЖ, МДж/кг;

Z – коэффициент участия ГГ или паров ЛВЖ во взрыве;

m – масса ГГ или ЛВЖ, кг.

Учитывая, что $V_{\text{доп}}$ – это допустимый свободный объем помещения, поэтому взаимосвязь между параметрами ΔV и $V_{\text{доп}}$ описывается линейной зависимостью:

$$\Delta V = \frac{V_{\text{доп}}}{0,8} = 1,25V_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где ΔV и $V_{\text{доп}}$ – минимальный безопасный удельный и допустимые объемы помещения, м³.

В настоящее время идея допустимых (безопасных) объемов помещения с ЛВЖ применена для сравнительного анализа с подходом определения взрывопожароопасных помещений по СНиП II-М.2.72⁴ [14].

Ранее по параметру ΔV был составлен рейтинг взрывоопасности ЛВЖ для основных растворителей при температурах от 20 до 70 °С [13], который взят за основу при составлении общего рейтинга взрывоопасности ГГ и ЛВЖ.

Цель работы. Разработка общего рейтинга взрывопожароопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей по минимальному безопасному удельному объему помещений.

Метод исследования. Для определения минимального безопасного удельного объема (ΔV) из уравнения (А.4) выведена универсальная формула для ГГ и ЛВЖ (5) при условии, что начальное давление P_0 равно 101 кПа согласно п. А.2.1 СП 12.13130.2009, а масса горючего вещества составляет 1 кг.

$$\Delta V = 8,333 \times 10^3 \frac{H_{\text{T}}Z}{\rho_{\text{в}}T_0}. \quad (5)$$

В качестве объектов исследования выбраны ГГ и ЛВЖ из Пособия по применению СП 12.13130.2009 [15].

Результаты исследования. В табл. 1 приведен общий рейтинг взрывопожароопасности ГГ и ЛВЖ в расчете на 1 кг горючего вещества в газопаровоздушном облаке. Из анализа этих данных следует, что повышение рабочей температуры (T_0) приводит к незначительному увеличению минимального безопасного удельного объема помещения при расчете на 1 кг ГГ, поэтому применение уравнения (3а) вместо формулы (5) можно считать приемлемым шагом при проверке отнесения помещения к категориям по взрывопожарной опасности А или Б по СП 12.13130.2009.

Однако практическое применение табл. 1 в случае рассмотрения аварийной ситуации, связанной с разлитием ЛВЖ, не сильно облегчает труд проектировщика или инспектора надзорного органа МЧС России, поскольку требует расчета массы паров ЛВЖ. В данной ситуации более удобно пользоваться табл. 2, которая составлена на утечку 1 л ГГ и разлитие 1 л ЛВЖ.

⁴ СНиП II-М.2-72. Производственные здания промышленных предприятий. Нормы проектирования. Строительные нормы и правила. Часть II, раздел М, глава 2" (утв. Госстроем СССР 03.04.1972). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

Таблица 1

Рейтинг взрывоопасности на 1 кг горючего вещества

ГТ	$\Delta V, \text{ м}^3$						$\frac{V_{\text{доп}}}{0,8}$
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	
Водород	2827,50	2827,67	2827,82	2827,97	2828,11	2828,23	2826,44
Этан	618,31	618,35	618,38	618,41	618,44	618,47	618,08
Метан	589,84	589,88	589,91	589,94	589,97	590,00	589,62
Ацетилен	589,43	589,47	589,50	589,53	589,56	589,58	589,21
Этилен	554,31	554,34	554,38	554,40	554,43	554,46	554,10
Пропан	546,82	546,85	546,88	546,91	546,94	546,96	546,62
Изобутилен	541,81	541,84	541,87	541,90	541,92	541,95	541,60
н-Бутан	539,27	539,30	539,33	539,36	539,39	539,41	539,07
Пропилен	537,99	538,02	538,05	538,07	538,10	538,12	537,78
Изобутан	537,68	537,71	537,74	537,77	537,79	537,82	537,48
2-Бутен	537,63	537,66	537,69	537,72	537,75	537,77	537,43
1-Бутен	534,60	534,63	534,66	534,69	534,71	534,74	534,40
1,3-Бутадиен	525,82	525,85	525,88	525,91	525,93	525,96	525,63
м-Ксилол	373,94	373,97	373,99	374,01	374,02	374,04	373,79
Кумол	330,30	330,32	330,34	330,35	330,37	330,38	330,16
Оксид этилена	326,73	326,75	326,76	326,78	326,80	326,81	326,60
Пентан	321,00	321,02	321,04	321,06	321,07	321,09	320,87
Изопентан	320,22	320,24	320,26	320,27	320,29	320,30	320,09
Гексан	319,27	319,29	319,31	319,32	319,34	319,35	319,14
Амилен	318,65	318,67	318,68	318,70	318,72	318,73	318,52
Гептан	317,95	317,97	317,99	318,01	318,02	318,04	317,82
Октан	317,02	317,04	317,06	317,07	317,09	317,10	316,89
Нонан	316,29	316,31	316,33	316,34	316,36	316,37	316,16
2,2,4-Триметилпентан	316,03	316,05	316,06	316,08	316,10	316,11	315,90
Декан	315,71	315,73	315,75	315,76	315,78	315,79	315,58
Бензин Б-70	312,11	312,13	312,15	312,17	312,18	312,20	311,99
Уайт-спирит	311,21	311,23	311,24	311,26	311,27	311,29	311,08
Стирол	310,66	310,67	310,69	310,71	310,72	310,74	310,53
Циклогексан	310,27	310,29	310,30	310,32	310,33	310,35	310,14
Керосин КО-20, КО-22, КО-25	309,27	309,29	309,30	309,32	309,33	309,35	309,14
Бензин АИ-93 летний, зимний	308,91	308,93	308,94	308,96	308,97	308,99	308,78
ДТ зимнее	308,55	308,56	308,58	308,60	308,61	308,63	308,42
ДТ летнее	307,34	307,35	307,37	307,39	307,40	307,42	307,21

ГГ	$\Delta V, \text{м}^3$						$\frac{V_{\text{доп}}}{0,8}$
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	
Растворитель Р-5	305,46	305,48	305,50	305,51	305,53	305,54	305,33
Растворитель Р-12	305,46	305,48	305,50	305,51	305,53	305,54	305,33
Ксилол смесь изомеров	305,46	305,48	305,50	305,51	305,53	305,54	305,33
Этилбензол	292,50	292,52	292,53	292,55	292,56	292,58	292,38
о-Ксилол	291,75	291,77	291,78	291,80	291,81	291,83	291,63
п-Ксилол	291,68	291,70	291,70	291,71	291,73	291,75	291,56
Толуол	289,76	289,78	289,79	289,81	289,82	289,84	289,64
Растворитель Р-4	289,76	289,78	289,79	289,81	289,82	289,84	289,64
Бензол	287,21	287,23	287,25	287,26	287,27	287,29	287,09
Гексанол	280,21	280,23	280,24	280,26	280,27	280,28	280,10
Бутанол	260,52	260,54	260,55	260,56	260,58	260,59	260,41
Растворитель М	260,08	260,10	260,11	260,12	260,14	260,15	259,97
Изобутанол	260,08	260,10	260,11	260,12	260,14	260,15	259,97
4-Метилпиридин	259,79	259,81	259,82	259,83	259,85	259,86	259,68
Пиридин	252,53	252,54	252,56	252,57	252,58	252,59	252,42
Диэтиламин	246,87	246,88	246,89	246,91	246,92	246,92	246,76
Тетрагидрофуран	245,83	245,85	245,86	245,87	245,88	245,90	245,73
Пропанол	243,53	243,55	243,56	243,57	243,58	243,60	243,43
Диэтиловый эфир	241,71	241,72	241,73	241,75	241,76	241,77	241,61
Изопропанол	241,65	241,66	241,68	241,69	241,70	241,71	241,55
Метилпропилкетон	239,81	239,82	239,84	239,85	239,86	239,88	239,71
Дивиниловый эфир	230,83	230,84	230,85	230,86	230,88	230,89	230,73
Хлорэтан	228,77	228,78	228,79	228,80	228,81	228,82	228,68
Формальдегид	224,22	224,24	224,25	224,26	224,27	224,28	224,14
Ацетон	221,98	221,99	222,00	222,01	222,03	222,04	221,89
Аммиак	219,25	219,26	219,27	219,28	219,29	219,30	219,16
Винилхлорид	218,20	218,21	218,22	218,23	218,24	218,25	218,11
Этанол	216,33	216,34	216,35	216,37	216,38	216,39	216,24
Амилацетат	211,50	211,51	211,52	211,53	211,54	211,55	211,41
в-Бутилацетат	200,18	200,19	200,20	200,21	200,22	200,23	200,09
Бутилацетат	200,18	200,19	200,20	200,21	200,22	200,23	200,09
Хлорбензол	193,35	193,36	193,37	193,38	193,39	193,40	193,27
Ацетальдегид	191,62	191,63	191,64	191,65	191,66	191,67	191,54
Этилцеллозольв	186,74	186,75	186,76	186,77	186,78	186,79	186,67
1,4-Диоксан	175,64	175,65	175,66	175,67	175,68	175,69	175,57

ГГ	$\Delta V, \text{ м}^3$						$\frac{V_{\text{доп}}}{0,8}$
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	
ДМФА	173,22	173,23	173,23	173,24	173,25	173,26	173,14
Метанол	168,74	168,75	168,76	168,77	168,78	168,79	168,67
Этилацетат	166,96	166,97	166,98	166,99	166,99	167,00	166,89
Угарный газ	119,20	119,20	119,21	119,22	119,22	119,23	119,15
Гидразин	102,21	102,22	102,22	102,23	102,23	102,24	102,17
Сероуглерод	99,24	99,24	99,25	99,26	99,26	99,26	99,20
Уксусная кислота	92,71	92,71	92,72	92,72	92,73	92,73	92,67
Сероводород	86,68	86,68	86,69	86,69	86,69	86,70	86,64
1,2-Дихлорэтан	76,96	76,97	76,97	76,98	76,98	76,98	76,93

Таблица 2

Минимальный безопасный удельный объем помещения
при утечке 1 л горючего газа или разлитии 1 л ЛВЖ

ГГ	$\Delta V, \text{ м}^3$					
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Амилацетат	4,88	8,89	15,46	25,81	41,57	64,78
Амилен	202,98	202,99	203,00	203,01	203,02	203,03
Аммиак	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13
Ацетальдегид	150,11	150,12	150,13	150,14	150,15	150,15
Ацетилен	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54
Ацетон	175,54	175,55	175,56	175,57	175,58	175,59
Бензин авиационный Б-70	124,07	178,15	232,55	232,56	232,57	232,59
Бензин АИ-93 летний, зимний	227,36	227,37	227,38	227,39	227,40	227,42
Бензол	91,55	145,38	222,78	250,98	250,99	251,00
Бутанол	5,45	10,56	19,63	35,14	60,80	101,93
1,3-Бутадиен	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1,01
н-Бутан	1,30	1,26	1,22	1,18	1,15	1,11
1-Бутен	1,25	1,21	1,17	1,13	1,10	1,06
2-Бутен	1,25	1,21	1,17	1,14	1,10	1,07
Бутилацетат	8,59	15,68	27,23	45,28	72,44	111,99
в-Бутилацетат	17,43	30,04	49,78	79,64	123,37	174,52
Винилхлорид	0,57	0,55	0,53	0,51	0,50	0,48
Водород	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20
Гексан	209,06	209,07	209,08	209,09	209,10	209,11

ГГ	$\Delta V, \text{м}^3$					
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Гексанол	0,64	1,51	3,31	6,84	13,30	24,55
Гептан	53,76	88,53	140,24	214,62	217,46	217,47
Гидразин	2,94	5,36	9,37	15,75	25,56	40,17
Декан	2,21	4,25	7,78	13,64	22,98	37,38
Дивиниловый эфир	178,20	178,21	178,22	178,23	178,24	178,24
1,4-Диоксан	24,24	39,75	63,01	96,85	144,82	181,49
1,2-Дихлорэтан	22,81	36,35	56,16	84,36	96,46	96,46
Диэтиламин	175,27	175,29	175,29	175,30	175,31	175,32
Диэтиловый эфир	172,46	172,47	172,48	172,49	172,49	172,50
ДМФА	1,93	3,66	6,59	11,34	18,75	29,92
ДТ зимнее	3,32	5,90	9,99	16,20	25,32	38,28
ДТ летнее	0,95	1,81	3,24	5,55	9,09	14,35
Изобутан	1,30	1,26	1,22	1,18	1,14	1,11
Изобутанол	9,72	18,57	33,91	59,44	100,43	164,16
Изобутилен	1,26	1,22	1,18	1,15	1,11	1,08
Изопентан	198,41	198,42	198,43	198,44	198,45	198,46
Изопропанол	29,71	54,27	94,86	159,37	189,59	189,60
Керосин КО-20	2,31	4,12	7,00	11,37	17,80	26,93
Керосин КО-22	3,28	6,05	10,60	17,77	28,67	44,65
Керосин КО-25	2,08	3,72	6,31	10,25	16,04	24,27
м-Ксилол	11,39	20,42	35,00	57,58	91,37	140,37
о-Ксилол	7,19	12,93	22,25	36,80	58,74	90,81
п-Ксилол	9,54	16,91	28,72	46,91	74,03	113,24
Ксилол смесь изомеров	12,27	21,58	36,35	58,91	92,26	140,08
Кумол	5,75	10,72	18,99	32,20	52,47	82,56
Метан	1,26	1,22	1,18	1,15	1,11	1,08
Метанол	43,90	73,96	120,13	132,80	132,81	132,82
4-Метилпиридин	5,08	9,33	16,36	27,51	44,55	69,79
Метилпропилкетон	32,63	52,97	83,37	127,59	190,34	194,03
Метилэтилкетон	179,22	179,23	179,24	179,25	179,26	179,27
Нонан	5,79	10,78	19,12	32,45	52,98	83,51
Оксид этилена	0,60	0,58	0,56	0,54	0,53	0,51

ГГ	$\Delta V, \text{м}^3$					
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Октан	17,03	30,00	50,54	81,80	127,79	193,42
Пентан	199,47	199,48	199,50	199,51	199,52	199,52
Пиридин	15,70	27,83	47,01	76,10	118,64	178,90
Пропан	1,00	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86
Пропанол	13,40	25,54	46,37	80,62	134,83	195,12
Пропилен	0,94	0,91	0,88	0,85	0,83	0,80
Растворитель М	47,19	82,62	139,48	213,56	213,57	213,58
Растворитель Р-12	25,30	43,08	70,41	111,00	169,42	251,18
Растворитель Р-4	110,88	172,36	246,03	246,05	246,06	246,07
Растворитель Р-5	129,30	199,89	257,84	257,85	257,86	257,88
Сероводород	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10
Сероуглерод	123,61	125,05	125,06	125,06	125,07	125,07
Стирол	7,72	13,41	22,46	36,46	57,46	88,20
Тетрагидрофуран	129,93	201,49	218,57	218,58	218,59	218,60
Толуол	28,27	47,63	77,06	120,26	181,77	251,26
2,2,4-Триметилпентан	62,62	101,19	157,61	217,37	217,38	217,39
Уайт-спирит	5,04	8,96	15,34	25,42	40,85	63,86
Угарный газ	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
Уксусная кислота	4,05	7,07	11,87	19,28	30,36	46,50
Формальдегид	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24
Хлорбензол	11,57	20,18	33,90	55,05	86,69	132,76
Хлорэтан	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,52
Циклогексан	105,91	166,32	239,86	239,88	239,89	239,90
Этан	0,77	0,75	0,72	0,70	0,68	0,66
Этанол	30,52	54,27	92,75	153,01	169,86	169,86
Этилацетат	55,54	90,32	141,44	150,34	150,34	150,35
Этилбензол	10,49	18,47	31,17	50,68	79,68	121,54
Этилен	0,65	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55
Этилцеллозольв	3,23	6,01	10,74	18,51	30,88	50,00

Применение критерия ΔV для категорирования помещений класса Ф5 можно продемонстрировать на примере складского помещения в городе Донецке объемом 500 м³, в котором хранятся 20-литровые бутылки с ацетоном, бензолом, гексаном

и 1,4-диоксаном. В качестве расчетной аварийной ситуации выбрано падение и разбитие 20-литровой бутылки с ЛВЖ.

Решение:

1. По СП 131.13330.2020⁵ находим, что средняя максимальная температура в складском помещении города Донецка составляет 39 °С.

2. Методом линейной корреляции определим значения ΔV при 39 °С. Из табл. 3 видно, что наиболее опасной ЛВЖ для нашего случая является бензол.

Таблица 3

Значения показателя ΔV для заданных параметров

Температура, °С	$\Delta V, \text{м}^3$			
	Ацетон	Бензол	Гексан	1,4-Диоксан
30	175,55	145,38	209,07	39,75
40	175,56	222,78	209,08	63,01
39	175,56	215,04	209,08	60,68

3. При разлинии 1 л бензола минимальный безопасный удельный объем помещения составляет 215,04 м³. Следовательно, в случае разлиния 20 литров бензола безопасный объем помещения $V_{\text{без}} = 215,04 \times 20 = 3924 \text{ м}^3$. Поскольку объем помещения (500 м³) меньше $V_{\text{без}}$, то помещение склада согласно п. 5.1 СП 12.13130.2009 относится к категории А (повышенная взрывопожароопасность).

Выводы. Общий рейтинг взрывопожароопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей дает наглядное представление об их опасности.

Разработанные справочные таблицы по минимальному безопасному удельному объему помещений существенно сокращают процедуру проверки отнесения производственных и складских помещений к категориям А или Б по взрывопожароопасности.

Список литературы / References

1. Luo, Z., Wu, G., Cheng, F., Wang, T. The Effect of Favorable Conditions within Chemical Process Units on Vapour Cloud Explosion Overpressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 96 (2025): 105617. DOI: 10.1016/j.jlp.2025.105617. (In English)

2. Исследование динамических характеристик взрыва газа, направленное на повышение безопасности при эксплуатации сооружений / С. В. Саркисов [и др.] // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2024. – № 2 (30). – С. 369–384. EDN OFBAIO

Sarkisov, S. V., Ruzmanov, M. D., Sazhin, K. A., Petrov, D. K. *Issledovanie dinamicheskikh harakteristik vzryva gaza, napravlennoe na povyshenie bezopasnosti pri ekspluatatsii sooruzhenij* [Investigation of the dynamic characteristics of a gas explosion aimed at improving safety during the operation of facilities]. *Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovaniy*, 2024, no. 2 (30), pp. 369-384. EDN OFBAIO (In Russian)

⁵ СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология. СНиП 23-01-99* [Электронный ресурс]: (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 24.12.2020 № 859/пр, ред. от 30.06.2023). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

3. Gong, H., Liang, H., Zhang, Q. Explosion Hazard of Propane/Air Mixture in Tank Under Transient High Temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 149 (2024): 14925-14942. DOI: 10.1007/s10973-024-13817-x. (In English)
4. Shi, J., Li, J., Li, Y. et al. Numerical Investigation of Hydrogen Vapor Cloud Explosion from a Conceptual Offshore Hydrogen Production Platform. *Journal of Safety and Sustainability*. 1 (2024): 189-201. DOI: 10.1016/j.jsasus.2024.11.004. (In English)
5. Su, X., Qin, L., Liao, Z. et al. Numerical Simulation and Risk Assessment of Toluene Tank Leakage in Petrochemical Industries, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 31 (2024): 62745-62760. DOI: 10.1007/s11356-024-35340-0. (In English)
6. Тюрин, А. П. Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки / А. П. Тюрин, И. М. Янников // Безопасность техногенных и природных систем. – 2023. – Т. 7. № 2. – С. 17–26. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26.
7. Tyurin, A. P., Yannikov, I. M. *Razrabotka podhoda dlya ocenki posledstvij vzryvov toplivno-vozdushnyh smesey s uchetom osobennostey zastroyki* [Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features]. *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnih system*, 2023, Vol. 7, no. 2, pp. 17-26. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26. (In Russian)
8. Комаров, А. А. Анализ последствий взрывной аварии на территории промышленного предприятия / А. А. Комаров, Р. Р. Шангараев // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 11. – С. 70–77. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-11-70-77.
9. Komarov, A. A., Shangaraev R. R. *Analiz posledstvij vzryvnoj аварии na territorii promyshlennogo predpriyatiya* [Analysis of the Consequences of an Explosive Accident on the Territory of an Industrial Enterprise]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2023, no. 11, pp. 70-77. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-11-70-77. (In Russian)
10. Shi, Y., Xie, C., Li, Z. et al. A quantitative correlation of evaluating the flame speed for the BST method in vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 73 (2021): 104622. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104622. (In English)
11. Бесчастнов, М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М. В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
12. Beschastnov, M. V. *Promyshlennyye vzryvy. Ocenka i preduprezhdenie* [Industrial explosions. Assessment and Prevention]. М: Khimiya, 1991, 432 p. (In Russian)
13. Акинин, Н. И. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах / Н. И. Акинин, Н. Н. Булхов, В. А. Гериш // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 10. – С. 53–55. EDN: OFXBDD.
14. Akinin, N. I., Bulhov, N. N., Gerish, V. A. *Statisticheskij analiz prichin аварий i travmatizma na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah* [The Statistical Analysis of Reasons of Accident and Industrial Injuries on Dangerous Industrial Objects]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 53-55. EDN: OFXBDD. (In Russian)
15. Alexeev, S. G., Gur'ev, E. S., Poluyan L. V. et al. Predicting Vapor cloud explosion in enclosed spaces. *Coke and Chemistry*, 60 (2017): 366-374. DOI: 10.3103/S1068364X17090022. (In English)
16. Alexeev, S. G., Poluyan, L. V., Gur'ev, E. S. et al. Methods of predicting vapor cloud explosions in enclosed spaces. *Coke and Chemistry*, 61 (2018): 312-317. DOI: 10.3103/S1068364X18080021. (In English)
17. Рейтинг взрывоопасности легковоспламеняющихся жидкостей / С. Г. Алексеев, А. В. Пищальников, А. В. Калач // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы. Научный электронный журнал. – 2014. – № 2. – С. 38–44. – EDN STAHYB

Alekseev, S. G., Pishchal'nikov, A. V., Kalach, A. V. *Reiting vzryvoopasnosti legkovosplameniayushchikhsia zhidkostei* [Rating of Explosion Hazard of Flammable Liquids]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby. Nauchnyi elektronnyi zhurnal*, 2014, no. 2, pp. 38-44. EDN STAHYB (In Russian)

14. Гаджиев, Г. Г. Подходы к определению допустимых объемов ЛВЖ при хранении в пожароопасных помещениях / Г. Г. Гаджиев, А. Я. Васин, Т. Б. Игамбердиев // Химическая промышленность сегодня. – 2025. – № 2. – С. 15–22. EDN OZAJMT

Gadzhiev, G.G., Vasin, A.Ya., Igamberdiev, T.B. *Podhody k opredeleniyu dopustimyh obyemov LVZh pri hranenii v pozharoopasnykh pomeshcheniyah* [Approaches to Determining Permissible Volumes of Flammable Liquids when Stored in Fire-Hazardous Premises]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2025, no. 2, pp. 15-22. EDN OZAJMT (In Russian)

15. Пособие по применению СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» / И. М. Смолин [и др.]. – М. : ВНИИПО, 2014. – 147 с.

Smolin, I. M., Poletaev, N. L., Gordienko, D. M., Shebeko, Yu. N., Smirnov, E. V. *Posobie po primeneniiu SP 12.13130.2009 «Opredelenie kategorii pomeshchenii, zdanii i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoi i pozharnoi opasnosti»* [A manual for the Use of SP 12.13130.2009 «Determination of Categories of Rooms, Buildings and External Installations on Explosion and Fire Hazard». Moscow: VNIPO, 2014, 147 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В. В. Лебедевой
Дата поступления рукописи 19.06.2025

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

EVALUATION OF EXPLOSION HAZARD OF COMBUSTIBLE GASES AND FLAMMABLE LIQUIDS

Objective. To perform a comparative analyses of the explosion and fire hazard of combustible gases and flammable liquids by using the minimum safe specific volume of a room.

Methods. Analytical research methods based on SP 12.13130.2009 and SP 64.1311500.2018.

Results. The rating of explosion and fire hazard of combustible gases and flammable liquids is compiled by using the minimum safe specific volume of a room. The look-up table are proposed to simplify the procedures for checking of explosion categories determination for production and warehouse premises.

Scientific novelty. The use of the minimum safe specific volume of premises for the ranking of the explosive properties of combustible gases and flammable liquids.

Practical significance. The reference table with the data of a minimum safe specific volume of premises has been compiled for employees of design companies and inspectors of supervisory authorities.

Key words: explosion; fire; minimum safe specific volume; combustible gas; flammable liquid.

For citation: Alexeev S. G. Evaluation of explosion hazard of combustible gases and flammable liquids. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 22-32. EDN ETNXUE

УДК [614.841.332:699.812.3]:620.193.23

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

Олег Владимирович Храпоненко, ст. науч. сотр.; e-mail: o.hraponenko@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-55

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ НА КРАТНОСТЬ ВСПУЧИВАНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. Экспериментальная оценка устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию воды путем установления зависимости изменения кратности вспучивания от времени водонасыщения.

Методы. Гравиметрический метод определения массовой доли воды; измерение толщины вспученного слоя и начальной толщины сухого слоя покрытия.

Результаты. Экспериментально исследована кинетика поглощения воды образцами огнезащитного покрытия вспучивающегося типа на основе акриловой дисперсии при водонасыщении в течение 1, 3, 5 и 7 суток в статических условиях эксперимента. Выполнена оценка устойчивости огнезащитного покрытия к гидролитической деструкции по количественным критериям – содержанию воды при насыщении и кратности вспучивания покрытия.

Научная новизна. Зависимости, характеризующие изменение содержания воды и кратности вспучивания от времени водонасыщения образцов разработанного огнезащитного покрытия на основе акриловой дисперсии получены впервые.

Практическая значимость. Показано, что при разработке рецептуры и оптимизации свойств огнезащитных покрытий, исследуемые параметры можно использовать в качестве количественных критериев при оценке изменения огнестойкости покрытий после длительного контакта с водой.

Ключевые слова: *массовая доля воды; изменение кратности вспучивания от водонасыщения; огнезащитное покрытие на основе акриловой дисперсии; огнезащита строительных конструкций; кинетика поглощения воды, период водонасыщения образцов.*

Для цитирования: *Лебедева В. В., Храпоненко О. В. Влияние времени водонасыщения на кратность вспучивания огнезащитного покрытия строительных конструкций // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 33–39. EDN PXYWXV*

Постановка проблемы. В период эксплуатации огнезащитных покрытий под воздействием различного рода внешних и внутренних факторов постепенно происходит их старение. Под термином «старение» следует понимать химические, физические, физико-химические процессы, происходящие в композиционном материале огнезащитных покрытий, которые приводят к изменению как механических, химических, электрических, оптических, так и огнезащитных свойств покрытий. Старение и дальнейшее разрушение огнезащитных покрытий происходит намного быстрее в условиях открытой атмосферы, чем в закрытых помещениях, что обусловлено воздействием на материал покрытия солнечного света, кислорода, озона и воды. Проблема изменения основных свойств огнезащитных покрытий под влиянием эксплуатационно-климатических факторов становится особенно актуальной для огнезащищенных конструкций и изделий на стратегических объектах транспортной, химической, ракетно-космической, авиационной, атомной и других отраслей [1, 2].

Анализ последних исследований. В работе [3] отмечается, что вследствие процессов окислительной и гидролитической деструкции скорость разрушения огнезащитных покрытий в атмосферных условиях примерно в 50 раз больше,

чем в помещении. Вода, как физически агрессивная среда, вызывает обратимые процессы в полимерных пленках огнезащитного покрытия, которые приводят к набуханию, появлению вздутий и пузырей на поверхности покрытия и, как следствие, к снижению или полной потере его огнезащитной эффективности [4]. В настоящее время, в основном, изучены химические процессы, связанные с термоокислительной деструкцией огнезащитных покрытий [5, 6]. Исходя из актуальности рассматриваемой научной задачи считаем целесообразным проведение экспериментальной оценки устойчивости огнезащитного покрытия вспучивающегося типа к гидролитической деструкции.

Цель исследования – оценка устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию воды путем установления зависимостей изменения кратности вспучивания покрытия от времени выдержки в водной среде.

Методика эксперимента. Объектом исследования выбрано огнезащитное покрытие вспучивающегося типа, рецептура которого разработана ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России». В качестве связующего вещества использована акриловая дисперсия, выбор которой обусловлен возможностью отверждения покрытия без необходимости смешивания с химически активным компонентом – отвердителем. Это условие позволило обеспечить равномерное отверждение покрытия в виде тонкой пленки при нанесении. Кроме того, водорастворимые огнезащитные средства, не содержащие токсичных органических растворителей, считаются экологически чистыми и пожаровзрывобезопасными.

Для получения покрытия состав тонким слоем выливали на подложку из алюминиевой фольги диаметром 45 ± 1 мм. После отверждения образцы взвешивали с точностью $\pm 0,1$ мг на электронных весах Adventurer™ (ОНАУС, Швейцария). За итоговый результат принимали среднее арифметическое трех параллельных измерений массы каждого образца. В среднем толщина экспериментальных образцов в отвержденном виде составила 0,9 мм, что соответствует требованиям к тонкослойным огнезащитным покрытиям вспучивающегося типа (не более 3 мм), согласно СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты».

Содержание воды при насыщении образцов определяли гравиметрическим методом. Сущность метода заключается в определении массы воды, поглощенной в условиях полного погружения экспериментальных образцов в воду при контролируемых условиях – в течение установленного периода времени и определенной температуре водонасыщения. Следует отметить, что на сорбционные процессы влияет температурный фактор [7], поэтому в ходе экспериментальных исследований температура окружающего воздуха в лабораторном помещении была фиксированной (23 ± 2) °С.

Предварительно взвешенные образцы отдельно помещали в прозрачные емкости с водой по ГОСТ Р 51232-98 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества». Экспериментальный период времени водонасыщения испытуемых образцов составил ряд – 1, 3, 5 и 7 суток и был выбран, исходя из способности связующего растворяться в воде.

В процессе выдержки образцов в воде периодически проводили контроль за наличием отслаивания, набухания, вспучивания и других признаков нарушения целостности покрытия. По истечении заданного промежутка времени испытуемые образцы извлекали из воды, удаляли воду с поверхности с помощью

фильтровальной бумаги, высушивали при естественных условиях и взвешивали с точностью $\pm 0,1$ мг.

Массовую долю поглощенной воды W_τ , %, за определенное время выдержки τ , сутки, определяли расчетным путем относительно массы испытуемого образца после окончательного просушивания, по формуле:

$$W_\tau = \frac{m_\tau - m_0}{m_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где m_τ – масса испытуемого образца после выдержки в воде, г;

m_0 – масса испытуемого образца после выдержки в воде и окончательного просушивания, г.

Полученные экспериментальные результаты сравнивали с показателями контрольных образцов, которые не подвергались воздействию воды.

Сравнительную оценку степени изменения огнестойкости огнезащитного покрытия до и после водонасыщения проводили по количественному критерию – кратности вспучивания. Для этого контрольные образцы, а также образцы после выдержки в воде и высушенные до постоянной массы, нагревали в муфельной печи в течение 2 мин при температуре 600 °С, которая поддерживалась в печи автоматически.

Исходную толщину образца и высоту вспученного слоя покрытия после нагрева измеряли штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм. Кратность вспучивания покрытия рассчитывали по формуле:

$$\delta = \frac{h}{h_0}, \quad (2)$$

где δ – кратность вспучивания, 1;

h – толщина вспученного слоя покрытия, мм;

h_0 – исходная толщина покрытия, мм.

Результаты исследований. После насыщения экспериментальных образцов в течение 1, 3, 5 и 7 суток в емкостях с водой наблюдалось появление продуктов вымывания (экстракции) без видимых признаков нарушения целостности покрытия.

Интенсивность процесса водонасыщения образцов оценивали с помощью кинетической кривой (рис. 1), построенной по формуле (1) на основании экспериментальных и расчетных данных.

Зависимость W от τ образцов положительно аппроксимирована линейным уравнением с довольно высоким значением коэффициента корреляции ($r = 0,99$). При насыщении образцов водой в течение 1, 3, 5 и 7 суток диапазон изменения W составил 23,4...31,3 % без достижения равновесного состояния. В данном исследовании такой характер водонасыщения можно объяснить процессами, сопровождающими диффузию на поверхности композиционного материала покрытия с частичным вымыванием водорастворимых компонентов.

На основании результатов экспериментальных исследований установлена и проанализирована зависимость между кратностью вспучивания δ и временем водонасыщения образцов (рис. 2). Кратность вспучивания отрицательно коррелирует со временем водонасыщения образцов при $r = -0,95$ (см. рис. 2).

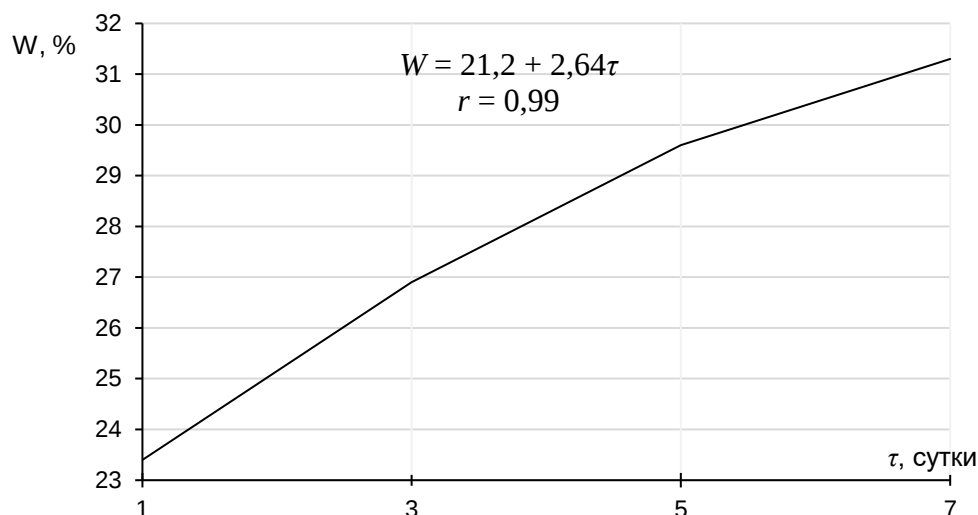


Рис. 1. Зависимость изменения содержания воды от времени насыщения образцов

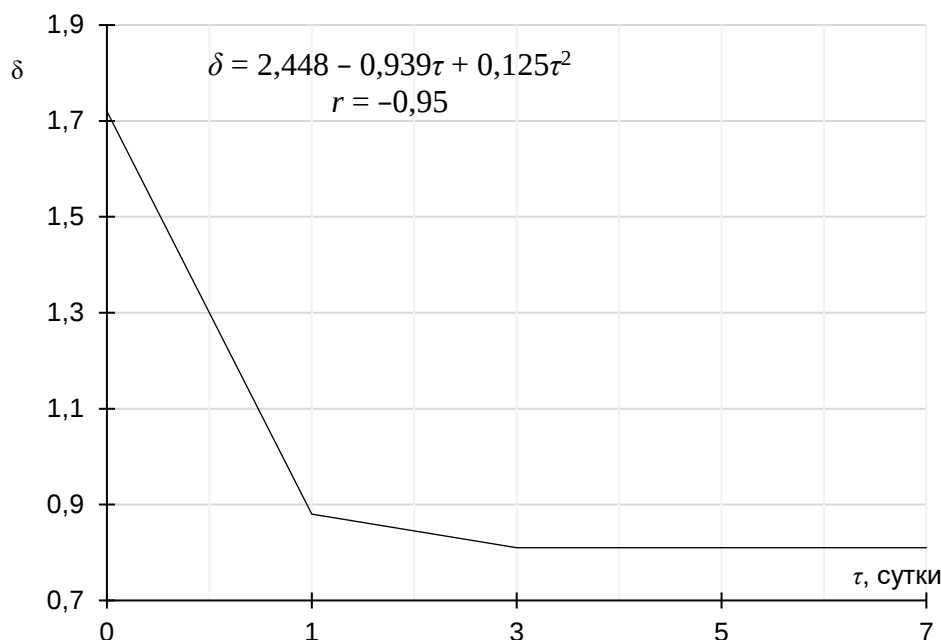


Рис. 2. Зависимость изменения кратности вспучивания покрытия от времени водонасыщения

Наиболее интенсивное снижение δ (с 1,72 до 0,88 единиц) наблюдалось для образцов в начальный период времени, соответствующему суточной выдержке в воде. С увеличением τ от 1 до 3 суток, после того как покрытие пропиталось водой, снижение δ существенно замедлилось и кривая зависимости (см. рис. 2) постепенно вышла на участок с практически постоянными значениями $\delta \sim 0,81$. По сравнению с исходным значением δ для образцов покрытия, насыщенных водой в течение 3, 5 и 7 суток, δ одинаково снизилась на 53 %.

Возможной причиной снижения кратности вспучивания с увеличением периода водонасыщения образцов является уплотнение структуры материала огнезащитного покрытия. Такие структурные изменения в материале покрытия можно объяснить вымыванием водорастворимых антипиренов в водной среде, что приводит

к дисбалансу рецептуры и нарушению ожидаемых химических реакций, активируемых при воздействии высокой температуры.

Для более наглядного представления динамики процесса изменения кратности вспучивания от времени водонасыщения образцов построена гистограмма, показывающая скорость изменения кратности вспучивания v_δ покрытия за каждый экспериментальный период насыщения в воде (рис. 3).

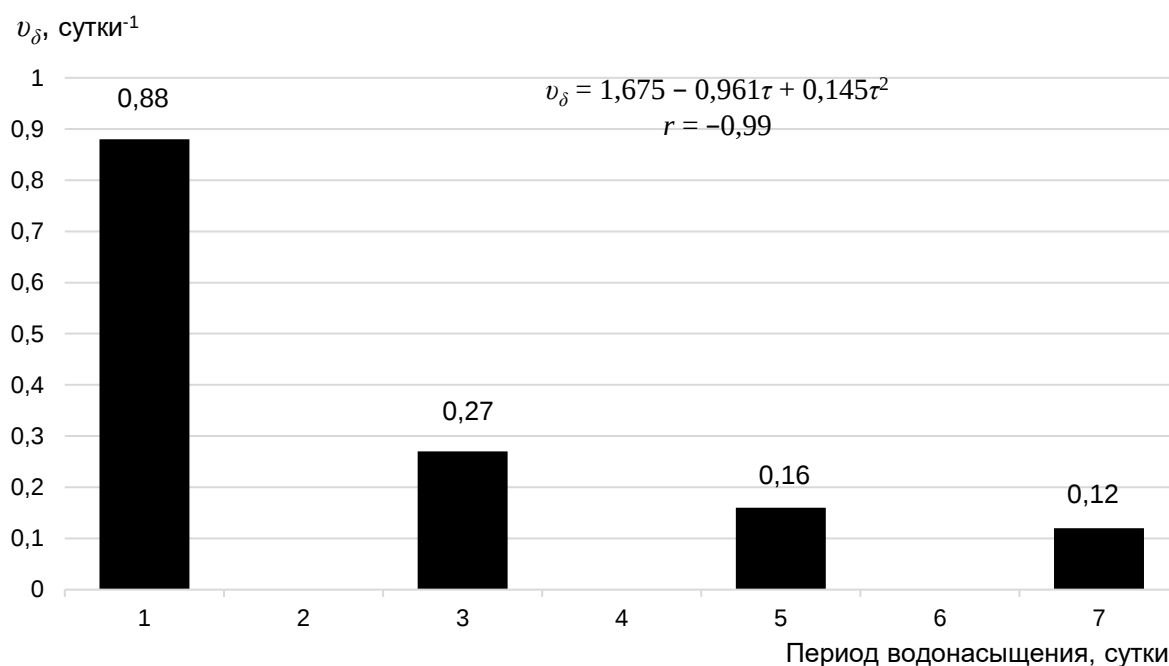


Рис. 3. Изменение кратности вспучивания покрытия от степени водонасыщения образцов

Таким образом, в условиях водонасыщения процессы, протекающие в матрице материала огнезащитного покрытия на основе акриловой дисперсии, приводят к существенному изменению кратности вспучивания, что, в свою очередь, свидетельствует о снижении огнестойкости покрытия в результате прямого контакта с водой.

Выводы. Установлено, что между кратностью вспучивания огнезащитного покрытия и временем водонасыщения существует обратная корреляционная зависимость.

Экспериментально подтверждено, что:

- устойчивость покрытия к воздействию внешних факторов определяет его огнезащитные свойства,
- огнезащитные свойства могут быть утрачены со временем полностью или частично без изменений внешнего вида покрытия.

Поэтому при контроле состояния применяемого огнезащитного покрытия в условиях длительной эксплуатации одного визуального метода недостаточно для объективной оценки степени сохранения его огнезащитной эффективности.

Список литературы / References

1. Гаращенко, А. Н. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) / А. Н. Гаращенко, А. А. Берлин, А. А. Кульков // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28, № 2. – С. 9–30.

Garashchenko, A. N., Berlin, A. A., Kulkov, A. A. *Sposoby i sredstva obespecheniya trebuyemykh pokazateley pozharobezопасности konstruktсий iz polimernykh kompozitov (obzor)* [Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures]. Fire and Explosion Safety. 2019; no. 28 (2), pp. 9-30. (In Russian)

2. Гаращенко, А. Н. Влияние срока эксплуатации на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и огнестойкость конструкций / А. Н. Гаращенко, А. А. Кульков, В. Л. Страхов // Авиационные материалы и технологии. – 2022. – № 2(67). – С. 97–110.

Garashchenko, A. N., Kulkov, A. A., Strakhov, V. L. *Vliyaniye sroka ekspluatatsii na ogneshchitnuyu effektivnost vspuchivayushchikhsya pokrytiy i ognestoykost konstruktсий* [The effect of the service life on the flameretardant efficiency of the bulging coatings and the fire resistance of structures]. Aviation materials and technologies, 2022, no. 2 (67), pp. 97-110. (In Russian)

3. Разработка методов испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации / М. А. Комарова, И. А. Гришин, М. В. Шалабин, Н. О. Мельников // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – № 1. – С. 21–34.

Komarova, M. A., Grishin, I. A., Shalabin, M. V., Melnikov, N. O. *Razrabotka metodov ispytaniy ogneshchitnykh pokrytiy stalnykh stroitelnykh konstruktсий v protsesse ekspluatatsii* [Development of test methods for fire-retardant coatings of steel engineering structures during operation]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2024; no. 40 (1), pp. 21-34. (In Russian)

4. Якупов, И. Ф. Методы по определению влияния эксплуатационных факторов на огнезащитную эффективность покрытий для металлических конструкций / И. Ф. Якупов // Вестник науки и образования. – 2021. – № 16-2 (119). – С. 28–32.

Yakupov, I. F. *Metody po opredeleniyu vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na ogneshchitnuyu effektivnost pokrytiy dlya metallicheskiy konstruktсий* [Methods for determining the influence of operational factors on the flame-retardant effectiveness of coatings for metal structures]. Bulletin of Science and Education, 2021, no. 16-2(119), pp. 28-32. (In Russian)

5. Сапожник, Д. И. Оценка эксплуатационных свойств защитных покрытий для строительных конструкционных материалов / Д. И. Сапожник, Л. Б. Демидчук, Р. И. Амирова // Вестник Российского университета кооперации. – 2015. – № 4 (22). – С. 63–68.

Sapozhnik, D. I., Demidchuk, L. B., Amirova, R. I. *Otsenka ekspluatatsionnykh svoystv zashchitnykh pokrytiy dlya stroitelnykh konstruktсионnykh materialov* [Assessment of operating abilities of protective coating for structural materials used in construction]. Bulletin of the Russian University of Cooperation; 2015, no. 4 (22), pp. 63-68 (In Russian)

6. Беззапонная, О. В. Исследование окислительно-деструктивных процессов, протекающих в огнезащитных составах интумесцентного типа с течением времени, методом термического анализа / О. В. Беззапонная // Техносферная безопасность. – 2018. – № 3. – С. 66–71.

Bezzaponnaya, O. V. *Issledovaniye okislitelno-destruktivnykh protsessov, protekayushchikh v ogneshchitnykh sostavakh intumestsentnogo tipa s techeniyem vremeni, metodom termicheskogo analiza* [Study of oxidation-destructive processes occurring in intumescent fire-retardant compositions over time using thermal analysis]. Technosphere safety; 2018, no. 3, pp. 66-71. (In Russian)

7. Супрун, В. А. Математическое обоснование эффективности действия смеси природных минеральных сорбентов для очистки маломинерализованных дренажных вод в

зависимости от температуры / В. А. Супрун, М. А. Ширяева // Экология и водное хозяйство. – 2020. – № 4 (07). – С. 1–11.

Suprun, V. A., Shiryayeva, M. A. *Matematicheskoye obosnovaniye effektivnosti deystviya smesi prirodnikh mineralnykh sorbentov dlya ochistki malomineralizovannykh drenazhnykh vod v zavisimosti ot temperatury* [Mathematical justification of the efficiency of a mixture of natural mineral sorbents for the purification of low-mineralized drainage waters depending on temperature]. Ecology and water management; 2020, no. 4 (07), pp. 1-11 (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 17.07.2025

Victoria Valentinovna Lebedeva, Cand. of Tech. Sci., Head of Department;

e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru

Oleg Vladimirovich Khraponenko, Senior Researcher; e-mail: o.khraponenko@80.mchs.gov.ru

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

283048, Donetsk, Artyoma St., 157, Phone: +7 (856) 252-78-55

INFLUENCE OF WATER SATURATION TIME ON THE SWELLING RATIO OF FIRE-RETARDANT COATING OF BUILDING STRUCTURES

Objective. Experimental evaluation of the water resistance of a fire-retardant coating by determining the relationship between swelling ratio change and water saturation time.

Methods. Gravimetric method for water content determination; measurement of expanded layer thickness and initial dry coating thickness; graphical method for data presentation.

Results. The water absorption kinetics of intumescent fire-retardant coating samples based on acrylic dispersion were experimentally investigated during water saturation for 1, 3, 5, and 7 days under static conditions. The resistance of the fire-retardant coating to hydrolytic degradation was evaluated using quantitative criteria – water content at saturation and coating swelling ratio.

Scientific novelty. The relationships characterizing the change in water content and swelling ratio with water saturation time of the developed fire-retardant coating samples based on acrylic dispersion were obtained for the first time.

Practical significance. It is shown that when developing the formulation and optimizing the properties of fire-retardant coatings, the studied parameters can be used as quantitative criteria for assessing changes in the fire resistance of coatings after prolonged contact with water.

Keywords: *water content; change in mass and swelling ratio with water saturation; acrylic dispersion-based fire-retardant coating; fire protection of building structures; water absorption kinetics, the period of water saturation of the samples.*

For citation: Lebedeva V. V., Khraponenko O. V. Influence of water saturation time on the swelling ratio of fire-retardant coating of building structures. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 33-39. EDN PXYWXV

II. Безопасность труда

УДК 622.867.32

*Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, начальник института;
e-mail: a.kiryan@igps.80.mchs.gov.ru*

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

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

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-45

ОСОБЕННОСТИ ЭКОНОМНОГО КИСЛОРОДОПИТАНИЯ РЕСПИРАТОРА

Цель. Определение путей совершенствования регенеративного респиратора со сжатым кислородом для его экономного кислородопитания.

Методы. Аналитические методы исследования кислородопитания регенеративного респиратора со сжатым кислородом.

Результаты. Предложены варианты кислородопитания регенеративного респиратора, обеспечивающие разные режимы работы.

Научная новизна. Обоснована система кислородопитания регенеративного респиратора с постоянной продувкой объемом 10 % от расходуемого кислорода.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке респиратора, имеющего большее время защитного действия.

Ключевые слова: *дыхательный аппарат; средства индивидуальной защиты органов дыхания; респиратор; сжатый кислород; кислородопитание.*

Для цитирования: Кирьян А.П., Мамаев В. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С. Особенности экономного кислородопитания респиратора // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 40–47. EDN OOUNKR

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Способы кислородопитания, применяющиеся во всех моделях респираторов, относительно просты, но в принципе несовершенны, так как они не осуществляют обратную связь подачи (расхода) кислорода с его объемной долей в дыхательном мешке. Системы с наличием такой обратной связи известны, весьма сложны и применение их в регенеративных респираторах нереально. Для человека, работающего в респираторе, дыхательный мешок аппарата по фактору концентрации в нем кислорода является своего рода «черным ящиком», так как объемная доля кислорода в мешке в зависимости от ряда причин изменяется в широких пределах. Гарантия того, что она не приблизится к опасному пределу (21 %) зависит от реализованного в респираторе способа кислородопитания, режима дыхания и соблюдения пользователем правил дыхания в респираторе [1, 2].

Следует отметить, что ГОСТ Р 12.4.253-2011 «СИЗОД. Автономные изолирующие дыхательные аппараты со сжатым и с химически связанным кислородом для горноспасателей. Общие технические условия» п. 5.1.1.3 регламентирует, что в аппаратах с номинальным временем защитного действия более 4 ч объемная доля кислорода не должна превышать 60 %.

Поэтому определение способа кислородопитания [3] для создания респиратора с содержанием кислорода в газовой дыхательной смеси, находящимся в регламентированном ГОСТом диапазоне – актуальная задача.

Анализ последних исследований и публикаций. Дальнейшее углубление горных выработок в России и увеличение длины маршрутов обуславливают необходимость поиска путей совершенствования используемых дыхательных аппаратов. Это связано также с расширением и усложнением оперативно-тактических задач, стоящих перед подразделениями пожарной охраны и подразделениями военизированных горноспасательных частей (ВГСЧ), а также условий их выполнения, интенсивности работ, проводимых при ликвидации аварий.

Согласно Уставу ВГСЧ, подразделения при проведении профилактических или аварийно-спасательных работ должны иметь в непригодной для дыхания среде изолирующие респираторы [4].

Основной тип используемого в ВГСЧ респиратора – Р-30, который по своим основным параметрам соответствует требованиям ГОСТ Р 12.4.253. Данный респиратор относится к аппаратам с комбинированной (постоянной и лёгочно-автоматической) подачей кислорода. Этот тип кислородопитания обеспечивает потребности респираторщика в необходимом кислороде при различных уровнях нагрузок и предотвращает возможное заазотирование.

Степень безопасности дыхания при комбинированном способе кислородопитания зависит от величины постоянной подачи кислорода. В респираторе РКК2 она равнялась 1,2 дм³/мин, что было недостаточно для безопасного уровня кислорода. Отсутствие заазотирования при многолетней эксплуатации данного типа респиратора было обусловлено малым объемом дыхательного мешка (около 3 дм³), что обеспечивало дополнительную продувку при тяжелых режимах работы, но уменьшало время защитного действия на 0,5–1 ч. В респираторах фирмы «Drägerwerk» принята постоянная подача кислорода 1,5 дм³/мин при нормальных условиях (НУ)^{1 2}.

Таким образом, увеличение постоянной подачи кислорода обеспечивает высокий уровень безопасности при эксплуатации аппарата, но снижает (пропорционально увеличению) время защитного действия изолирующего респиратора.

Цель исследования – определение путей совершенствования регенеративного респиратора со сжатым кислородом для его экономного кислородопитания.

Результаты исследований. Все известные способы кислородопитания основаны на продувке системы кислородом тем или иным устройством, что связано с уменьшением количества полезно используемого кислорода, то есть с потерей для дыхания определенной его части. В настоящее время в мировом респираторостроении применяется почти исключительно способ кислородопитания с постоянной подачей кислорода 1,2–1,7 дм³/мин, дополненной легочным автоматом. Такой способ кислородопитания среди разработчиков респираторов получил название «классического» или комбинированного, характеризуется

¹ Респиратор изолирующий регенеративный Drager PSS BG4 plus [Электронный ресурс].

URL: <https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/tehnika/gornospasatel'naya-tehnika/tehnicheskie-harakteristiki-novoy-gornospasatel'noy-tehniki/respirator-izoliruyushchiy-regenerativnyy-drager-pss-bg4-plus> (дата обращения: 02.07.2025)

² Дыхательный аппарат Drager PSS BG4+ [Электронный ресурс]. URL: <https://sbgaz.ru/catalog/sredstva-individualnoy-zashchity/dykhatelnye-apparaty/drager-pss-bg4.html> (дата обращения: 02.07.2025)

простотой и надежностью кислородоподающих и продувочных устройств, устойчивым содержанием кислорода в газовой дыхательной смеси и достаточно экономным расходом ее запаса. Безопасность работы в отношении заазотирования при таком способе кислородопитания обеспечивается не автоматически, а за счет естественного чередования периодов тяжелой и легкой работы (или отдыха).

Характеристика такого способа по уровню объемной доли кислорода в дыхательном мешке респиратора в зависимости от режима работы (рис. 1) построена расчетным путем [5].

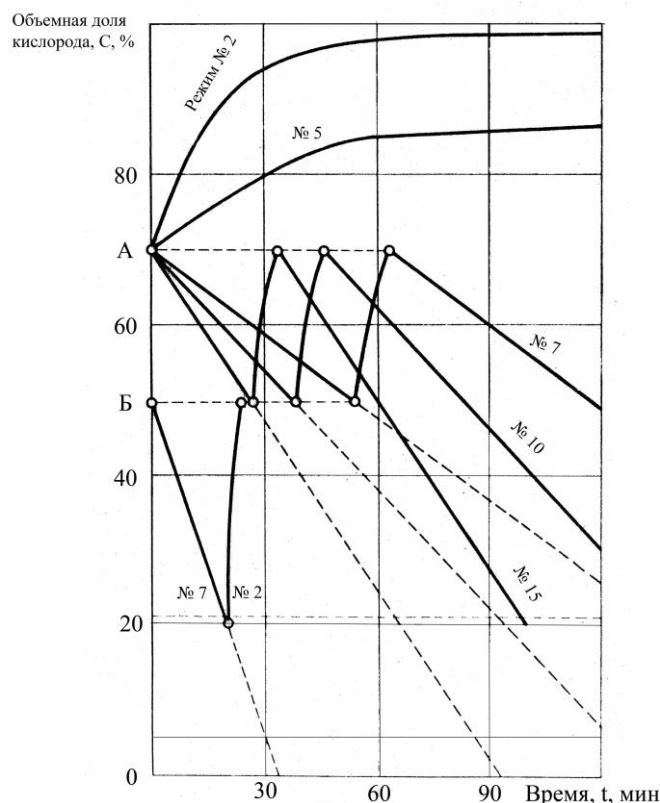


Рис. 1. Зависимость объемной доли кислорода в дыхательном мешке от режима работы респиратора с комбинированной его подачей

Следует отметить, что уровни физической нагрузки человека на практике определяются объемом минутной легочной вентиляции и выдыхаемого диоксида углерода. Для инженерных расчетов и оценки таких аппаратов принята дискретная система дыхательных режимов. Каждый из таких режимов имеет порядковый номер (от 1 до 15) и отличается от соседнего по главному параметру — выделению диоксида углерода — на $0,2 \text{ дм}^3/\text{мин}$ при стандартных условиях (СУ). Номер режима является условной величиной, он равен значению выделения диоксида углерода, умноженному на 5.

Серия кривых «А» (рис. 1) показывает изменение объемной доли кислорода во вдыхаемой газовой дыхательной смеси (далее — ГДС) во времени при непрерывной работе и начальной объемной доле кислорода, равной 70 %. Постоянная подача кислорода в данном случае принята равной $1,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$. Коэффициент незамечаемого горноспасателем подсоса окружающего воздуха

принят равным $K_n = 0,7 \cdot 10^{-3}$ и объемная доля кислорода в подсасываемом воздухе равна нулю (бескислородная аварийная среда). Из анализа графика видно, что в таких условиях объемная доля кислорода при режимах до № 5 включительно относительно исходного уровня не понижается. Начиная с режима № 7 и выше происходит снижение объемной доли кислорода, причем чем выше нагрузка, тем больше скорость снижения. Если же через определенное время горноспасатель сделает перерыв для отдыха (рабочий режим № 2), содержание кислорода в воздухе быстро восстанавливается.

В случае если подсосы воздуха увеличены в пять раз ($K_n = 3,5 \cdot 10^{-3}$), скорость снижения объемной доли кислорода значительно увеличивается, что показано на кривой «Б». Однако при последующем отдыхе и уменьшении подсосов до указанного выше уровня происходит быстрая нормализация концентрации кислорода во вдыхаемой ГДС. Следовательно, заазотирование респиратора с «классической» схемой кислородопитания и значением постоянной подачи кислорода $1,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$ хотя и возможно теоретически, однако маловероятно, поскольку работа горноспасателя при режимах № 7 и выше без передышки проблематична. Как известно, «классическая» схема с постоянной подачей кислорода $1,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$ использована в отечественных респираторах (Р-30, Р-34, Р-35). В респираторах фирмы «Дрегерверк» (BG160, BG172, BG174) постоянная подача кислорода принята $1,5 \text{ дм}^3/\text{мин}$.

Рассмотрим экономичность использования запаса кислорода в респираторах с «классической» схемой (таблица). В таблице приведены расчетные данные по времени защитного действия (ВЗД) и коэффициенту полезного использования запаса кислорода η такой схемы для дополнительных режимов №№ 2–15. На этих дополнительных режимах потребление кислорода и легочная вентиляция выше, чем на основных на 10–20 %, что создает дополнительный запас надежности в расчетах. Из таблицы видно, что при режимах № 2–4 коэффициент полезного потребления кислорода изменяется от 41 до 81 %.

Таблица

Характеристика экономичности расходования в респираторе условного запаса кислорода 400 дм^3 при непрерывной работе и коэффициенте подсоса $0,7 \cdot 10^{-3}$

Наименование		Номер дыхательного режима						
		2	3	4	5	7	10	15
Респиратор с комбинированным способом кислородопитания, постоянная подача $1,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$ (РУ)	ВЗД, мин	285	285	285	285*	210*	150*	106*
	η , %	41	61	81	100*	100*	100*	100*
«Идеальный» респиратор с продувкой, пропорциональной расходу кислорода	ВЗД, мин	636	432	324	261	189	139	96
	η , %	91,6	91,6	91,6	91,6	91,6	91,6	91,6
Респиратор с постоянной продувкой $0,15 \text{ дм}^3/\text{мин}$ (СУ)	ВЗД, мин	548	401	314	259	194	141	102
	η , %	79,0	85,0	88,6	90,9	93,6	95,9	97,5*

Примечание. * При непрерывной работе происходит заазотирование системы респиратора

Данные по ВЗД респиратора с комбинированным способом кислородопитания (линия 1) нанесены на номограмму (рис. 2).

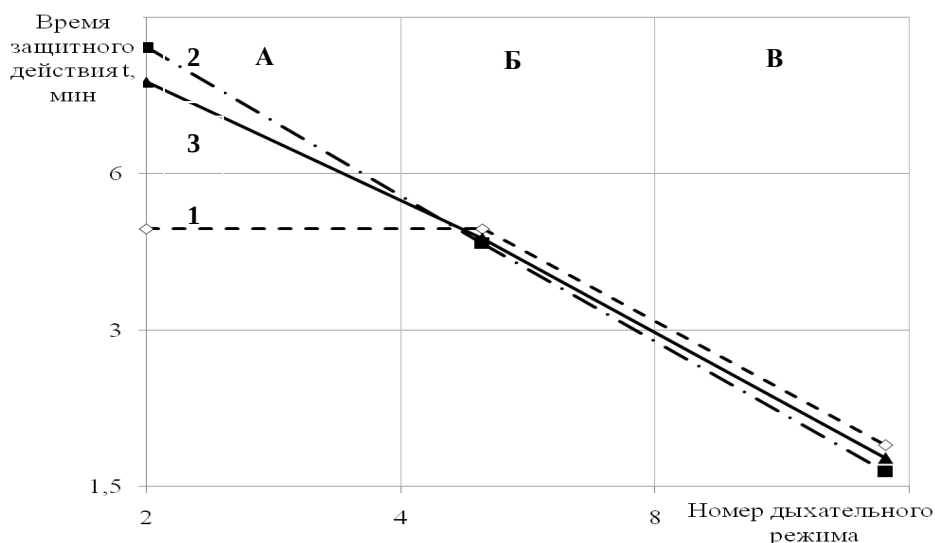


Рис. 2. Номограмма для определения ВЗД респиратора:

1 – с комбинированной подачей кислорода (доза 1,4 дм³/мин), 2 – с продувкой, пропорциональной расходу кислорода (10 %), 3 – с постоянной продувкой 0,15 дм³/мин

Проведенными ранее НИИ «Респиратор» исследованиями установлено, что при основном дыхательном режиме № 4, характерном для длительных горноспасательных работ, полезно используется 70 % запаса кислорода, а при отдыхе в шахте (основной режим № 2) – всего лишь 36 % запаса, т. е. более половины кислорода бесполезно удаляется в атмосферу. В то же время было определено, что на продувку с целью предотвращения заазотирования достаточно использовать 10 % запаса кислорода [5]. Следовательно, ВЗД респиратора в диапазоне дыхательных режимов № 2–4 могло быть значительно увеличено за счет экономии кислорода.

В зарубежном и отечественном респираторостроении неоднократно предпринимались попытки разработки способов кислородопитания с более экономным расходом сжатого кислорода, чем при «классической» схеме, и создавались на их базе модели респираторов. Один из таких способов предусматривает пропорциональную связь между продувкой, осуществляемой специальным насосом, и подачей кислорода (немецкий респиратор BG 170/400 и отечественный «Донбасс-2»).

Другой способ предусматривает пропорциональную связь между продувкой и легочной вентиляцией. В респираторе «Луганск-2» такая связь осуществлялась продувочным насосом, приводимым в действие стенкой дыхательного мешка типа сильфона, а в респираторе Р-16 продувка происходила через калиброванное отверстие в воздухопроводной системе, защищенное обратным клапаном.

Известно также, что указанные попытки ни у нас, ни за рубежом не привели к созданию таких моделей респираторов с экономным расходом кислорода, которые бы длительно выпускались промышленностью и эксплуатировались горноспасательной службой.

Показатели среднесменной нагрузки горноспасательных работ имеют большое значение для оценки и выбора способов кислородопитания и определения ВЗД респираторов. Анализ имеющейся информации позволил условно разделить весь диапазон среднесменных нагрузок на три зоны «А», «Б» и «В», охватывающие дыхательные режимы № 2–5, № 5–10 и № 10–15 соответственно (см. рис. 2).

В зоне «А» выполняется большинство профилактических горноспасательных работ. Зона «А» слева ограничена режимом № 2, соответствующим отдыху в шахте (в респираторе стоя), а справа – режимом № 5, который при расчете и испытании респираторов считается нагрузкой средней тяжести (с запасом). Практика показала, что средняя тяжесть горноспасательных работ характеризуется ориентировочно режимом № 4.

В зоне «Б» выполняются аварийно-спасательные работы, связанные либо со спасением людей, либо при которых от быстроты действий отделения прямо зависит успех ликвидации всей аварии или выполнения отдельного ответственного задания. Максимальная непрерывная нагрузка здесь – режим № 10 (тяжелая работа), в непрерывном темпе данный режим трудно выполним.

В зоне «В» непрерывная физическая нагрузка такой тяжести невозможна. В каждом из режимов от № 10 до № 15 можно работать лишь кратковременно, чередуя с периодами отдыха. В результате среднесменная нагрузка, характеризующаяся зоной «В», соответствует кратковременной (непрерывной нагрузке) какого-то режима из зоны «Б».

Резюмируя изложенное, нетрудно прийти к выводу, что для характеристики того или иного способа кислородопитания, в том числе для сравнения идеального (обеспечивает продувку от заазотирования в количестве 10 % от расходуемого кислорода при любом непрерывном дыхательном режиме) и «классического» способов важно знать длительность ВЗД, которое они обеспечивают именно в зоне «А». Из рис. 2 видно, что здесь линии «1» и «2» образуют треугольник преимуществ идеального способа. При наиболее характерной средней нагрузке (режим № 4) превышение ВЗД составляет 12 %, а при дальнейшем снижении нагрузки возрастает до 120 %. Вместе с тем, при идеальном способе кислородопитания ВЗД в зонах «Б» и «В» теоретически не уступает кислородопитанию при «классическом» способе. Это означает, что обычный 4-часовой респиратор (например, Р-30) при идеальном способе кислородопитания мог бы иметь фактическое ВЗД более 5 ч при реальных средних нагрузках горноспасателей и более 10 ч при отдыхе.

Можно предположить, что главное преимущество такого идеального респиратора по сравнению с привычными 4-часовыми аппаратами Р-30, Р-35 состоит в значительном резерве ВЗД на случай непредвиденных обстоятельств. Однако, если такие идеальные респираторы будут созданы, и они будут не менее надежными, чем существующие с «классической» схемой, и ими оснастить горноспасательную службу, это неизбежно приведет к принципиальным изменениям в тактике планирования и выполнения горноспасательных работ.

В настоящее время объем аварийно-спасательных работ для одного спуска отделения в загазованную среду планируют исходя из полной длительности аппаратосмены или ее части (4 ч, 3 ч, 2 ч), то есть в привязке ко времени (длительности работы). Конкретная мгновенная или суммарная нагрузка

для выполнения данной работы при выдаче задания или после возвращения отделения учитывается лишь во вторую очередь.

При наличии идеальных респираторов с обратно пропорциональной связью между среднесменной нагрузкой и ВЗД (то есть между нагрузкой и длительностью аппаратосмены) целесообразно планирование горноспасательных работ вести от потребной суммарной физической, энергетической, а значит и дыхательной нагрузки, которую необходимо затратить для выполнения конкретного задания. Лишь во вторую очередь должна учитываться получающаяся при этом фактическая длительность аппаратосмены в часах, которая может теперь колебаться, например, от 2 до 6 ч. В основе этого анализа находится тот факт, что суммарная возможная физическая нагрузка на горноспасателя, или его физиологическая возможность выполнить конкретную работу соответствует суммарному количеству кислорода, которое он может потребить из имеющегося в респираторе запаса. Время, в течение которого будет выполнена эта работа, может быть различным, а поэтому оно рассматривается во вторую очередь. Данные результаты исследований полностью относятся и к респиратору с химически связанным кислородом.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Рассмотрев существующие и возможные способы кислородопитания регенеративных респираторов, можно сделать вывод о сложности одновременно обеспечить высокий уровень безопасности и достаточную экономичность расходования кислорода. Теоретические исследования показывают, что применение в респираторе продувки объемом 10 % от расхода кислорода способно обеспечить значительное увеличение времени защитного действия данного аппарата.

Список литературы / References

1. Алибеков, А. А. Вопросы эффективности применения дыхательных аппаратов со сжатым кислородом в пожарно-спасательных подразделениях ГПС МЧС России / А. А. Алибеков // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года. – Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС, 2021. – С. 189–193. – EDN QZXUBA.

Alibekov, A. A. [Issues of efficiency of application of respiratory equipment with compressed oxygen in fire and rescue units of the state fire service of the Ministry of emergency situations of Russia]. Fire safety: modern challenges. Problems and solutions: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, St. Petersburg, April 22, 2021. Saint-Petersburg University of State fire Service of EMERCOM of Russia, 2021, pp. 189-193. EDN QZXUBA (In Russian)

2. Маслов, Ю. Н., Дымов, С. М., Кисляков, Р. А., Карпова, И. А. Тестовое оборудование для проверки дыхательных аппаратов с возможностью работы в режиме имитации дыхания // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2019. – № 10. – С. 247–249.

Maslov, Yu. N., Dymov, S. M., Kislyakov, R. A., Karpova, I. A. *Testovoye oborudovaniye dlya proverki dykhatel'nykh apparatov s vozmozhnost'yu raboty v rezhime imitatsii dykhaniya* [Test equipment for checking breathing apparatus with the ability to operate in the breathing simulation mode]. Fire safety: problems and prospects, vol. 1, no. 10, 2019, pp. 247-249. (In Russian)

3. Батырев, В. В. Основы индивидуальной защиты человека от опасных химических и радиоактивных веществ: Научно-методическое издание / В. В. Батырев, Г. А. Живулин. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской

обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2016. – 204 с. – ISBN 978-5-93970-144-0. – EDN VPAWNX.

Batyrev, V. V., Zhivulin G. A. [Fundamentals of individual human protection from hazardous chemical and radioactive substances: Scientific and methodological publication]. Moscow: VNII GOChS (FC), 2016, 204 p. ISBN 978-5-93970-144-0. EDN VPAWNX (In Russian)

4. Кисляков, Р. А. Анализ технических возможностей модернизации дыхательных аппаратов со сжатым кислородом для аварийно-спасательных служб / Р. А. Кисляков, Ю. Н. Маслов, В. И. Логинов // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 52–55. – EDN RZFIUJ.

Kislyakov, R. A., Maslov, Yu. N., Loginov, V. I. [Analysis of the technical capabilities for upgrading of compressed-air breathing apparatus for rescue and emergency services]. Fire Safety. 2014, no. 1, pp. 52-55. EDN RZFIUJ (In Russian)

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

Didenko, N. S. Regenerative respirators for mine rescue operations. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Nedra, 1990, 160 p. (In Russian)

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 07.07.2025*

Andrey Petrovich Kiryan, Cand. of Tech. Sci., Head of the Institute;

e-mail: a.kiryan@igps.80.mchs.gov.ru

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

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

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

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

283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 332-78-36

FEATURES OF ECONOMICAL OXYGEN SUPPLY OF A RESPIRATOR

Objective. Determination of ways to improve a regenerative respirator with compressed oxygen for its economical oxygen supply.

Methods. Analytical methods for studying oxygen supply of a regenerative respirator with compressed oxygen.

Results. Variants of oxygen supply for a regenerative respirator are proposed, providing different operating modes.

Scientific novelty. The oxygen supply system of a regenerative respirator with a constant purge of 10 % of the consumed oxygen has been substantiated.

Practical significance. The obtained research results can be used in the development of a respirator with a longer protective effect time.

Key words: *breathing apparatus; personal respiratory protective equipment; respirator; compressed oxygen; oxygen supply.*

For citation: Kiryan A. P., Mamayev V. V., Zborshchik L. A., Pletenetskiy R. S. Features of economical oxygen supply of a respirator. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 40-47. EDN OOUNKR

УДК [622.413.4:536.24]:001.891.572

Виктория Владимировна Захарова, ассистент; e-mail: viksuta@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. +7 (856) 301-07-09

Екатерина Викторовна Подвигина, научный руководитель Центра «Дом научной
коллаборации им. академика И. П. Бардина»; e-mail: evpodvigina@chsu.ru

Константин Александрович Подвигин, канд. техн. наук, доцент; e-mail: kapodvigin@chsu.ru

Татьяна Юрьевна Горохова, канд. техн. наук, доцент; e-mail: tiugorokhova@chsu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Череповецкий государственный университет»
162600, Череповец, пр-т Луначарского, 5. Тел. 8 (202) 55-65-97

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЗОНЫ С НОРМАТИВНЫМИ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ НЕФТЯНОЙ ШАХТЫ

Цель работы. Прогнозирование динамики изменения объема зоны с нормативными микроклиматическими условиями в горной выработке нефтяной шахты на основе математического моделирования смешения охлажденной воздушной струи, исходящей из воздухоохлаждающей установки с льдосоляными аккумуляторами холода, и попутного воздушного потока горной выработки, с учетом нестационарности работы аккумуляторов и источников тепловыделения.

Методы. Численные методы: CFD-моделирование; конечно-разностный метод; параметрические исследования влияния температуры льда, скорости потоков и износа изоляции на динамику изменения объема зоны с нормативными микроклиматическими условиями в горной выработке нефтяной шахты.

Результаты. Разработана математическая модель нестационарного теплообмена, прогнозирующая температуру воздушной струи на выходе из установки при уменьшении массы льдосоляной смеси (фазовом переходе) в аккумуляторах холода. Создана трехмерная модель турбулентного смешения охлажденной и нагретой (попутной) воздушных струй, выявляющая прямую зависимость эффективной зоны охлаждения от скорости истечения охлажденной струи, увеличение скорости обуславливает пропорциональное расширение фронта охлажденного потока воздуха. Обоснована прогнозная модель рабочей зоны с нормативной температурой, демонстрирующая зависимость ее объема от динамических параметров охлажденной струи: температуры, скорости и влагосодержания.

Научная новизна. Впервые предложена иерархичная математическая модель, интегрирующая: нестационарный теплообмен в установке с фазовыми переходами льда; 3D-турбулентное смешение струй с учетом плавучести и влагопереноса; пространственно-временной критерий зоны комфорта на основе индикаторной функции. Установлена детерминация динамики нормативных условий параметрами струи. Обоснована адекватность модели реальным процессам в шахтных выработках.

Практическая значимость. Результаты позволяют оптимизировать эксплуатацию шахтных установок воздушного охлаждения с льдосоляными аккумуляторами. Разработанные модели обеспечивают выбор критических параметров: оптимального диапазона скоростей истечения, интервалов замены энергоносителя при его деградации, а также режимов предварительного охлаждения льда для продления эффективной работы. Внедрение решений направлено на повышение безопасности горноремонтных работ в условиях экстремального микроклимата.

Ключевые слова: турбулентное смешение струй; охлаждение воздуха; аккумуляторы холода; математическая модель; нефтяные шахты.

Для цитирования: Захарова В. В., Подвигина Е. В., Подвигин К. А., Горохова Т. Ю. Прогнозирование динамики изменения объема зоны с нормативными микроклиматическими условиями в горной выработке нефтяной шахты // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 48–58. – EDN UNFVLE

Постановка проблемы. В глубоких нефтяных шахтах температура воздуха превышает нормативы из-за геотермального нагрева, оборудования и горячих жидкостей. Ключевая проблема – отсутствие моделей прогноза зоны комфорта при смешении струй, учитывающих нестационарное турбулентное смешение, переменные теплопритоки, влагоперенос и искажение свойств воздуха примесями, динамику параметров струи из-за плавления энергоносителя в льдосоляных аккумуляторах, что затрудняет оптимизацию установок.

Анализ последних исследований. В работе [1] разработана математическая модель теплообмена между воздушным потоком и льдосоляными аккумуляторами холода в теплообменных камерах установки. Однако в модели не учтено взаимодействие охлажденного воздуха, проистекающего из сопла установки, с нагретым вентиляционным потоком в горной выработке, что ограничивает точность прогнозирования процесса охлаждения и динамики изменения объема зоны с нормативными микроклиматическими условиями в нефтяной шахте.

Материалы исследования. Анализ систем кондиционирования шахтного воздуха подтвердил актуальность использования специального льда как энергоносителя для нормализации температуры в рабочих зонах при ремонтах в нефтяных шахтах. Для обоснования параметров установки (рис. 1) создана 3D-модель турбулентного смешения охлажденной и нагретой (попутной) воздушных струй.

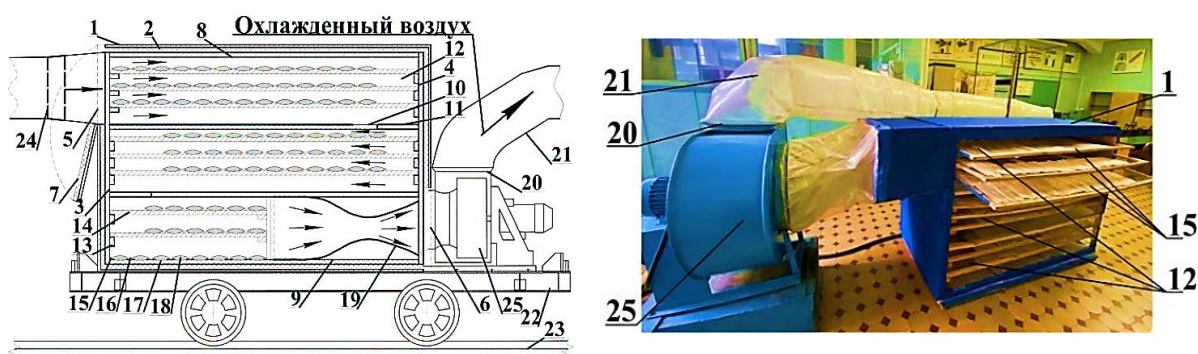


Рис. 1. Схема и внешний вид установки для охлаждения воздуха (расшифровка обозначений приведена в тексте)

Макет установки смонтирован на платформе шахтной вагонетки 22, которая перемещается по рельсовому пути 23. Для подготовки установки к работе открываются крышки 7 люков 5 и 6, встроенных в торцевые стенки 3 и 4 корпуса 1 с теплоизоляцией 2. Расход воздуха обеспечивает вентилятор 25, регулируемый шибером 24 или 20. Кожух вентилятора 25 теплоизолирован, чтобы избежать нагрева выходящего воздуха. Охлаждаемый воздух через входной люк 5 поступает в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на потоки, движущиеся вдоль верхней стенки 8 и полка 14 на направляющих 13, контактируя с аккумуляторами холода 15. Воздух, обтекая ячейки аккумуляторов холода с оболочкой из полиэтилена 17 и сварные швы 16, приобретает турбулентность, что вместе с большой площадью теплообмена и низкой температурой льдосоляной смеси 18 усиливает охлаждение. Затем воздух из камеры 12 через проемы 11 в воздухо непроницаемых перегородках 10 переходит в нижние камеры, где контактирует с аккумуляторами на полках и нижней стенке 9, продолжая охлаждаться. Охлажденный воздух направляется в выходное сопло 19 и через трубопровод 21 поступает в охлаждаемую зону.

В научном исследовании [1] описаны динамические параметры охлажденной струи на выходе из воздухоохлаждающей установки: температура $T_{\text{вых}}(t)$; скорость $v_{\text{вых}}(t)$; влагосодержание $\omega_{\text{вых}}(t)$. Эти величины являются граничными условиями для модели смешения струй в горной выработке.

Учет нестационарности (фазовые переходы льда, износ изоляции) критичен для прогнозирования динамики изменения объема зоны с нормативными микроклиматическими условиями в горной выработке.

Взаимодействие охлажденной струи с попутным потоком описывается системой уравнений:

1) Сохранение массы воздуха (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

где $\rho_v = \frac{P_{\text{атм}}}{R_v T}$ – плотность воздуха, зависящая от локальной температуры, кг/м³;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па;

R_v – удельная газовая постоянная воздуха, ≈ 287 Дж/кг·К;

T – абсолютная температура воздуха, К;

$\vec{v} = (u, v, w)$ – вектор скорости воздуха, м/с;

∇ – оператор дивергенции;

t – время, с.

2) Динамика турбулентного потока (уравнение импульса в приближении RANS):

$$\rho_v \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho_v \vec{g} \beta (T - T_{\text{поп}}) + \vec{S}_{\text{виб}} \quad (2)$$

где p – давление воздуха, Па;

μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$ – конвективное ускорение, м/с². Описывает изменение скорости вдоль траектории частицы жидкости (перенос импульса потоком); в декартовых координатах (x, y, z) ;

$\vec{g}$ – вектор ускорения свободного падения, м/с². В принятой правой декартовой системе координат ось Z направлена вертикально вверх: $\vec{g} = (0, 0, -g)$, где $g = 9,81$ м/с². Знак « $-$ » означает, что сила тяжести направлена противоположно положительному направлению оси Z вниз;

$\beta = \frac{1}{T_{\text{поп}}}$ – коэффициент термического расширения воздуха (стандартное приближение Обербека–Буссинеска для задач естественной конвекции), К⁻¹;

$T_{\text{поп}}$ – характерная температура попутного потока, К;

$T - T_{\text{поп}}$ – отклонение локальной температуры T от температуры попутного потока. Определяет знак и величину силы плавучести: если $T > T_{\text{поп}}$ (воздух теплее), плотность уменьшается, и сила плавучести направлена вверх $+Z$; если $T < T_{\text{поп}}$ (воздух холоднее), плотность увеличивается, и сила плавучести направлена вниз $-Z$;

$\vec{S}_{\text{виб}} = \rho_v \vec{a}_{\text{виб}}$ – источник импульса от вибраций моделирует воздействие вибраций горного оборудования, Н/м³ ($\vec{a}_{\text{виб}}$ – ускорение вибраций задается из экспериментальных данных или оценок для шахтного оборудования, м/с²);

$\rho_v \vec{g} \beta (T - T_{\text{поп}})$ – описывает силу плавучести, возникающую из-за разности плотностей охлажденной струи и попутного потока, Н.

3) Теплообмен с окружающей средой (уравнение энергии):

$$\rho_v c_{pv} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \lambda_v \nabla^2 T Q_{\text{виб}} + Q_{\text{пор}} \quad (3)$$

где c_{pv} – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/кг·К;

$\rho_v c_{pv}$ – объемная теплоемкость воздуха, Дж/м³·К;

$\frac{\partial T}{\partial t}$ – локальная производная температуры по времени, К/с;

$Q_{\text{виб}} = \mu_{\text{тр}} F_{\text{норм}} v_{\text{виб}}$ – тепловая мощность от вибраций, Вт/м³ [1];

$\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения при вибрационном контакте (безразмерный);

$F_{\text{норм}}$ – нормальная сила контакта, Н/м²;

$v_{\text{виб}}$ – скорость вибраций, м/с;

$Q_{\text{пор}} = \alpha_{\text{пор}} (T - T_{\text{пор}})$ – теплоприток от горного массива, Вт/м³;

$\alpha_{\text{пор}}$ – коэффициент теплоотдачи породы, 5,0 Вт/м³·К;

$T_{\text{пор}}$ – температура горного массива (породы), 323,15 К.

4) Перенос влаги и конденсация (уравнение влагопереноса):

$$\frac{\partial(\rho_v \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v \omega \vec{v}) = D_v \nabla^2 (\rho_v \omega) + \dot{m}_{\text{конд,ст}} \quad (4)$$

где $\frac{\partial(\rho_v \omega)}{\partial t}$ – локальное изменение парциальной плотности влаги, кг/м³·с;

ω – массовое влагосодержание, кг_{пара}/кг_{сух. возд.} (далее кг/кг);

$\rho_v \omega = \rho_{\text{п}}$ – парциальная плотность водяного пара, кг/м³;

$\nabla \cdot (\rho_v \omega \vec{v})$ – вектор плотности потока влаги, кг/м²·с;

D_v – коэффициент диффузии пара, 2,26 · 10⁻⁵ м²/с;

$\dot{m}_{\text{конд,ст}} = \beta_{\text{ст}} (\omega - \omega_{\text{нас,ст}})$ – коэффициент моделирует конденсацию пара на стенках выработки, что критично при высокой влажности (> 80 %), кг/м³·с;

$\beta_{\text{ст}}$ – коэффициент конденсации, характеризующий скорость фазового перехода, с⁻¹;

$\omega_{\text{нас,ст}}$ – влагосодержание насыщения при температуре стенки $T_{\text{ст}}$, кг/кг.

Рассчитывается как $\omega_{\text{нас,ст}} = \frac{0,622 \cdot p_{\text{нас}}(T_{\text{ст}})}{p_{\text{атм}} - p_{\text{нас}}(T_{\text{ст}})}$.

Граничные условия для данной системы уравнений смешения струй:

1) Вход охлажденной струи (область сопла установки):

$$\begin{cases} T = T_{\text{вых}}(t) \\ v_n = v_{\text{вых}}(t) \\ \omega_n = \omega_{\text{вых}}(t) \end{cases} \quad (5)$$

Параметры охлажденной струи в области сопла установки задают начальные условия для уравнений (1) – (4). Граничными условиями (5) определяются: температура (влияет на уравнение энергии (3) и силу плавучести, возникающую из-за разности плотностей охлажденной струи и попутного потока (2)); скорость (определяет конвективный перенос в (1), (3), (4)); влагосодержание (ключевой параметр для уравнения влагопереноса (4)). Динамика $T_{\text{вых}}(t)$, $v_{\text{вых}}(t)$, $\omega_{\text{вых}}(t)$ определена авторами [1] с учетом плавления льда $S_{k,i}(t)$, износа оболочки аккумуляторов холода $U(T, t)$ и тепловой мощности от вибраций горного оборудования $Q_{\text{виб}}$.

2) Вход попутного потока (начало рабочей зоны горной выработки). Характеристики попутного потока [2]:

$$\begin{cases} T_{\text{поп}} = 318 \text{ К} \\ v_{\text{поп}} = 1,0 \text{ м/с} \\ \omega_{\text{поп}} = 0,015 \text{ кг/кг} \end{cases}, \quad (6)$$

где $T_{\text{поп}}$ – измеренная температура в нефтяных шахтах [2];

$v_{\text{поп}}$ – измеренная скорость движения воздуха в буровых галереях в нефтяных шахтах;

$\omega_{\text{поп}}$ – влажность при $T_{\text{поп}} = 318 \text{ К}$, $\phi = 60 \%$.

Характеристики попутного потока формируют правую часть уравнения плавучести в (2) через $T_{\text{поп}}$, задают конвективный перенос тепла и влаги в (3), (4) и определяют начальное поле скоростей для (1), (2).

3) Граничные условия на стенках выработки:

$$\begin{cases} \vec{v} = 0 \\ -\lambda_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{пор}}(T_{\text{пор}} - T), \\ \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где $-\lambda_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial n}$ – плотность теплового потока за счёт теплопроводности воздуха, Вт/м².

Знак « $-$ » означает направление потока от стенки в воздух;

$\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·К;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ – градиент температуры по нормали n к стенке, К/м.

Граничными условиями (7) задаются: условие прилипания ($\vec{v} = 0$), исключающее конвективный перенос у стенки; преобладание диссипативного члена $\mu \nabla^2 \vec{v}$ в уравнении импульсов (2); учет силы плавучести $\rho_{\text{в}} \vec{g} \beta (T - T_{\text{поп}})$, инициирующей естественную конвекцию; кондуктивный теплоприток от породы $-\lambda_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\text{пор}}(T_{\text{пор}} - T)$; отсутствие влагообмена стенки – воздух в (4) $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$, моделирующее гидрофобное покрытие (конденсация отсутствует).

4) Выход из расчетной области:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \\ \frac{\partial \omega}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Граничными условиями на выходе обеспечивается стабильность решения уравнений (1) – (4) и физическая корректность течения (отсутствие обратных потоков, нарушающих сходимость уравнения (1)). Условия Неймана (нулевой градиент) применяются для исключения влияния границы на внутреннее течение и корректного описания турбулентного смешения. Граничные условия (7) – (8) обеспечивают физическую адекватность и вычислительную устойчивость системы (1) – (4).

На основе пространственно-временного распределения температуры $T(\vec{v}, t)$, скорости $\vec{v}(\vec{x}, t)$ и влагосодержания $\omega(\vec{x}, t)$, полученных из решения уравнений

(1) – (4), вводится индикаторная функция Ψ , которая идентифицирует точки выработки, удовлетворяющие нормативным микроклиматическим условиям (ГОСТ 12.1.005-88). Интегрирование Ψ по объему выработки дает целевую величину исследования: динамику объема зоны комфорта $V_{\text{комф}}(t)$, характеризующую эффективность системы охлаждения [3, 4].

Индикаторную функцию нормативных условий представим в виде:

$$\Psi(x, y, z, t) = \begin{cases} 1, \text{ если } \begin{cases} 291 \leq T(x, y, z, t) \leq 298 \\ 0,3 \leq \|\vec{v}\| \leq 1,5 \\ \omega(x, y, z, t) \leq \omega_{\text{порог}} \end{cases} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (9)$$

где $\Psi(x, y, z, t)$ – индикатор соблюдения нормативов (безразмерная);

$\|\vec{v}\| = \sqrt{u_{\text{в}}^2 + v_{\text{в}}^2 + w_{\text{в}}^2}$ – модуль скорости воздуха исключает сквозняки и застой (индексы «в» обозначают параметры воздуха), м/с;

$\omega(x, y, z, t) \leq \omega_{\text{порог}}$ – критерий влагосодержания, кг/кг.

$\omega_{\text{порог}} = \min(0,018; \omega_{\text{нас}}(T_{\text{стенки}}))$ – учет локальной конденсации на стенках горной выработки, кг/кг.

0,018 – максимально допустимое влагосодержание, соответствующее $\phi = 80\%$ при $T = 298\text{ К}$, кг/кг;

$\omega_{\text{нас}}(T_{\text{стенки}})$ – влагосодержание насыщения при температуре стенки горной выработки, кг/кг.

x, y, z – пространственные координаты, м;

t – время, с.

Параметры 291 К; 298 К; 0,3–1,5 м/с; 0,018 кг/кг – прямые требования ГОСТ 12.1.005-88 для категории работ Па (средней тяжести).

Объем зоны с нормативными условиями вычисляется путем интегрирования индикаторной функции по всему объему выработки:

$$V_{\text{комф}}(t) = \iiint \Psi(x, y, z, t) dV, \quad (10)$$

где $\iiint$ – тройной интеграл по объему горной выработки $V_{\text{выр}}$;

$dV = dx dy dz$ – элемент объема, учитывающий геометрию выработки (искривления, сужения и т. д.), м³.

Численная реализация на пространственной сетке (шаги $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5\text{ м}$):

$$V_{\text{комф}}(t_n) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} \Psi(x_i, y_j, z_k, t_n) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z, \quad (11)$$

где N_x, N_y, N_z – число ячеек по осям;

$t_n = n \cdot \Delta t$ – дискретное время ($\Delta t = 1\text{ с}$);

$\Psi(x_i, y_j, z_k, t_n)$ – значение функции в центре ячейки.

Результаты исследования изменения объема зоны с нормативными условиями в горной выработке нефтяной шахты $V_{\text{комф}}(t)$ позволяют перейти к анализу эффективности системы охлаждения. Далее, для выявления критических факторов, минимизирующих зону комфорта, и разработки рекомендаций по оптимизации работы воздухоохлаждающей установки проведем исследование влияния ключевых параметров (температуры льда, скорости попутного потока, деградации изоляции)

на $V_{\text{комф}}(t)$. Анализ включает параметрические исследования и поиск режимов, увеличивающих минимальный объем зоны $V_{\text{комф}}(t)$ в течение рабочей смены.

Параметрические исследования. Зависимость минимального объема от температуры льда будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{комф}}^{\text{мин}} = a + b \cdot (T_{\text{л,ном}} - T_{\text{л,0}}), \quad (12)$$

где $V_{\text{комф}}^{\text{мин}}$ – минимальный объем зоны комфорта, м³;

$T_{\text{л,0}}$ – начальная температура льда, К;

$T_{\text{л,ном}}$ – номинальная температура льда, 268 К;

a – минимальный объем при $T_{\text{л,0}} = T_{\text{л,ном}}$, 85 м³;

b – коэффициент влияния температуры, 1,8 м³/К.

Влияние скорости попутного потока будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{комф}}^{\text{мин}} = c - d \cdot v_{\text{поп}}, \quad (13)$$

где $v_{\text{поп}}$ – скорость попутного потока, м/с;

c – объем при $v_{\text{поп}} = 0$, 110 м³;

d – коэффициент влияния скорости попутного потока на минимальный объем зоны комфорта, 25 м²·с. Характеризует эффективность вытеснения холодной струи попутным потоком и геометрию выработки.

Критерии эффективности. Дискретная форма интегрального коэффициента стабильности будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{стаб}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \frac{V_{\text{комф}}(t_n)}{V_0}, \quad (14)$$

где $N = \frac{t_{\text{раб}}}{\Delta t}$ – число временных шагов;

Δt – шаг дискретизации, 1 с;

$t_n = n \cdot \Delta t$ – дискретное время.

Значение $K_{\text{стаб}} = 1,0$ обозначает идеальную стабильность ($V_{\text{комф}}^{\text{мин}} = V_0$ всю смену). Значение $K_{\text{стаб}} = 0$ обозначает полное отсутствие зоны комфорта. Типичный диапазон для нефтяных шахт $K_{\text{стаб}} = 0,65\text{--}0,92$ [4].

Уравнение, определяющее скорость струи, увеличивающее минимальный объем зоны с нормативным микроклиматом будет иметь следующий вид:

$$v_{\text{вых}}^* = v_0 + k_T \cdot (T_{\text{пор}} - T_{\text{пор,баз}}) + k_v \cdot (v_{\text{пор,баз}} - v_{\text{пор}}), \quad (15)$$

где $v_{\text{вых}}^*$ – оптимальная скорость охлажденной струи, 2,5...4,0 м/с;

v_0 – базовая скорость струи (константа), 3,0 м/с;

k_T – коэффициент температурной коррекции, 0,1 м/(с·К);

$T_{\text{пор}}$ – температура горного массива, 318...328 К;

$T_{\text{пор,баз}}$ – базовая температура породы (константа), 318 К;

k_v – безразмерный коэффициент коррекции скорости попутного потока, 0,3;

$v_{\text{пор,баз}}$ – базовая скорость попутного потока, 1,0 м/с;

$v_{\text{пор}}$ – фактическая скорость попутного потока, 0,5...2,0 м/с.

Используя уравнение распределения температуры (16), получим распределение температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине (рис. 2) [1]:

$$T(x) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \cdot e^{-k \cdot x}, \quad (16)$$

где $T(x)$ – температура воздуха на расстоянии x метров от входа в установку, К;

T_{∞} – асимптотическая температура, которой теоретически достигнет воздух при бесконечной длине установки, 265,4 К;

T_0 – начальная температура воздуха на входе в установку (при $x = 0$), 305 К;

$k = -\frac{1}{L} \ln \left(\frac{T(L) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right)$ – коэффициент охлаждения, характеризующий интенсивность теплообмена, $\approx 0,0794 \text{ м}^{-1}$;

L – полная длина установки, м;

x – расстояние от входа установки, м.

Для расчета динамики объема зоны комфорта последовательно применим формулы (9) – (11) для каждого временного шага. Результат расчета приведен на рис. 3.

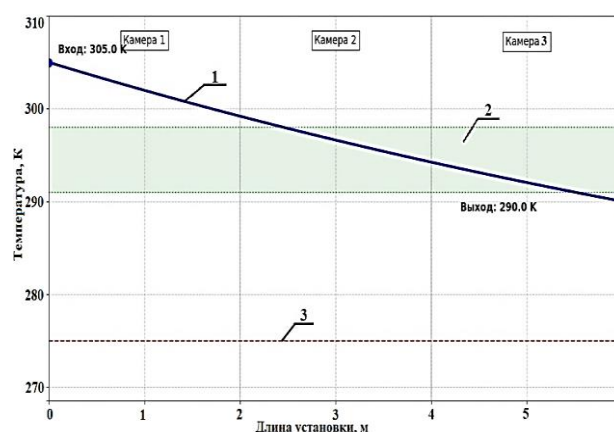


Рис. 2. Распределение температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине:

- 1 – температура воздуха;
- 2 – зона с нормативной температурой воздуха (зона комфорта);
- 3 – технологический предел (практически достижимый минимальный уровень охлаждения)

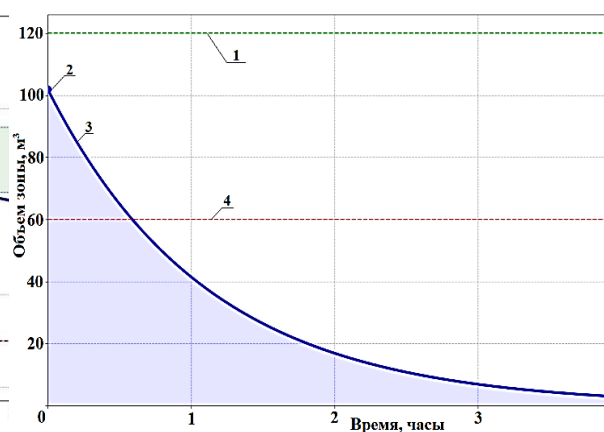


Рис. 3. Динамика объема зоны с нормативными условиями:

- 1 – теоретически возможный максимальный объем (120 м³);
- 2 – начальный объем составляет 102 м³ (85 % от теоретического максимума);
- 3 – фактический объем зоны;
- 4 – половина максимального объема (60 м³)

Как видно из графика (рис. 3), фактический начальный объем зоны с нормативными условиями меньше теоретического на 15 %. Причиной фактического снижения объема на 15 % является то, что индикаторная функция $\Psi(x_i, y_j, z_k, t_n)$ не равна 1 во всех ячейках при $t = 0$. Экспоненциальный спад объема зоны с нормативными условиями является следствием плавления льда, износа изоляции рис. 4а и внешних воздействий (теплопритоками от оборудования и нагрева от породы). Для расчета динамики уменьшения массы льдосоляной смеси были использованы результаты исследования [1].

Из рис. 4а видно, что в первый период работы установки 0...0,6 ч происходит интенсивное плавление льдосоляной смеси $m/m_0 = 1,0 \rightarrow 0,50$, это происходит

из-за максимального перепада температур между охлаждаемым воздухом и аккумуляторами холода $\Delta T \approx 45$ К. На втором этапе – 0,6...1,8 ч – происходит замедление плавления $m/m_0 = 0,50 \rightarrow 0,25$ из-за уменьшения площади теплообмена (диаметр льдосоляных цилиндров, из которых состоят аккумуляторы холода, с течением времени уменьшается). На третьем этапе – 1,8...4,0 ч – наблюдается стабилизация процесса $m/m_0 = 0,25 \rightarrow 0,05$.

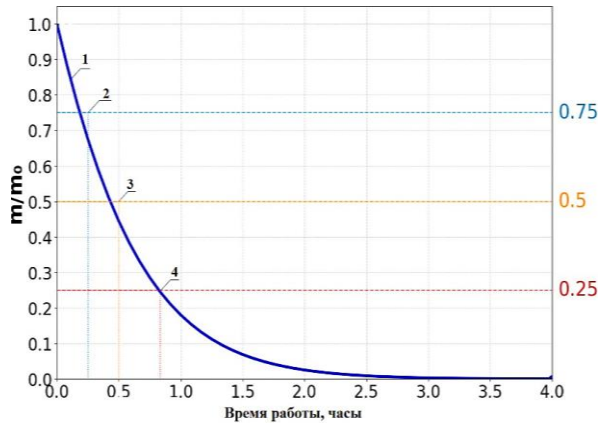


Рис. 4а. Динамика относительной массы льдосоляной смеси m/m_0 в аккумуляторах холода в течение рабочей смены $t = 4$ ч:

- 1 – отношение текущей массы льда к начальной массе (m/m_0);
- 2 – уровень 75 % от m_0 ;
- 3 – уровень 50 % от m_0 ;
- 4 – уровень 25 % от m_0

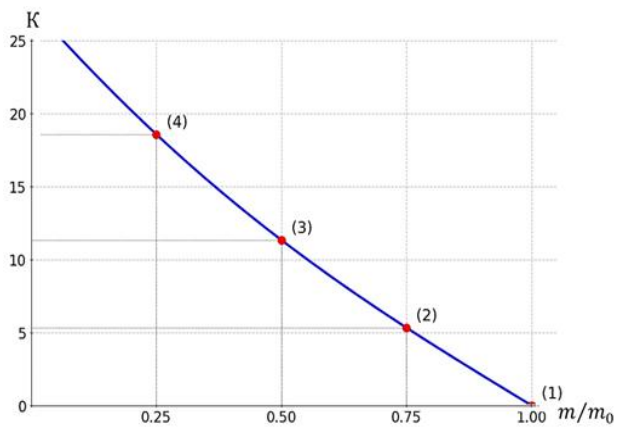


Рис. 4б. Зависимость прироста температуры воздуха ΔT от относительной массы льда m/m_0 при постоянном объемном расходе воздуха (m_0 – начальная масса льда 3000 кг):

- 1 – начальное состояние системы ($m/m_0 = 1$);
- 2 – ($m/m_0 = 0,75$);
- 3 – ($m/m_0 = 0,50$);
- 4 – ($m/m_0 = 0,25$)

Фазовый переход льдосоляной смеси ($\Delta H_{пл} = 300$ кДж/кг) обеспечивает начальное охлаждение воздуха до $T_{вых} \approx 290$ К. Уменьшение массы льдосоляной смеси на 50 % приводит к росту температуры на выходе из установки на 10...11 К. При достижении $m \leq 0,25m_0$ температура на выходе из установки повышается на 15...16 К (рис. 4б).

Используя выражение (17), определим зависимость прироста температуры воздуха ΔT от относительной массы льда m/m_0 при постоянном объемном расходе воздуха:

$$\Delta T = \frac{m_{\text{льда}} \cdot L}{m_{\text{возд}} \cdot c_p} (1 - e^{-k \cdot t}), \quad (17)$$

где $m_{\text{льда}} = \frac{d \cdot m_{\text{льда}}}{dt}$ – массовый расход расплавленного льда, кг/с;

L – удельная теплота плавления льдосоляной смеси, 334000 Дж/кг;

$m_{\text{возд}} = \rho_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}$ – массовый расход воздуха, кг/с;

$\rho_{\text{возд}} = \frac{p_{\text{атм}}}{R_B T_{\text{вх}}}$ – плотность воздуха, кг/м³;

$V_{\text{возд}}$ – объемный расход воздуха, 2 м³/с;

c_p – удельная теплоемкость воздуха, 1005 Дж/(кг·К);

$k = 0,15 \cdot (1 + 0,5 \cdot (m/m_0)^2)$ – коэффициент эффективности теплообмена, с⁻¹;

0,15 – базовая интенсивность;

$(1 + 0,5 \cdot (m/m_0)^2)$ – поправка на уменьшение площади теплообмена при таянии.

Объем зоны комфорта зависит от температуры выходящего из установки воздуха, и в начальный период работы установки $m > 0,75m_0$ составляет $V_{\text{комф}} \approx 102 \text{ м}^3$ (85 % от V_{max}). Во второй период работы установки $0,5m_0 < m < 0,75m_0$ $V_{\text{комф}} \downarrow 60 \text{ м}^3$ (50 % от V_{max}). В третий период $m < 0,25m_0$ – $V_{\text{комф}} < 30 \text{ м}^3$.

Скорость фазового перехода льда ($\partial s_{k,i}/\partial t$) является лимитирующим фактором микроклимата. При $m < 0,5m_0$ наблюдается нелинейное ухудшение параметров зоны комфорта, требующее коррекции режима работы по уравнению (15).

Выводы. Выполнено математическое моделирование процессов охлаждения и распространения воздушной струи в горных выработках. Получены аналитические зависимости динамики зоны комфорта от параметров истечения струи и массы льдосоляного энергоносителя. Доказано определяющее влияние динамики фазовых переходов льда на температурные характеристики струи и пространственно-временное распределение зоны с нормативными условиями труда.

Список литературы / References

1. Подвигин, К. А. Процессы теплообмена воздушной струи при контакте с нетающим льдом / К. А. Подвигин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2020. – Вып. 4 (24). – С. 56–61.

Podvigin, K.A. [Processes of heat exchange of an air jet upon contact with non-melting ice]. Bulletin of the Academy of Civil Protection. 2020, no. 4 (24), pp. 56-61. (In Russian)

2. Коробицына, М. А. Нормализация параметров микроклимата за счет снижения теплоступлений при транспортировке нефтесодержащей продукции в буровых галереях нефтяных шахт: специальность 05.26.01 «Охрана труда (в горной промышленности)»: дис. ... канд. техн. наук / Мария Александровна Коробицына. – Санкт-Петербург, 2019. – 91 с. Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Korobitsyna, M. A. [Normalization of microclimate parameters by reducing heat gains during transportation of oil-containing products in level galleries of oil mines : 05.26.01 “Occupational safety (in mining industry)” specialty : Candidate of Technical Sciences dissertation / Maria Alexandrovna Korobitsyna]. Saint Petersburg, 2019. 91 p. Place of thesis defence: Saint Petersburg Mining University. (In Russian)

3. Клюкин, Ю. А. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в уклонных блоках нефтяных шахт / Ю. А. Клюкин // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – 2017. – Вып. 15. – С. 305–310.

Klyukin, Yu. A. [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in inclined blocks of oil shafts]. Strategy and Processes of Geo-resource Development: Coll. Sci. Papers. 2017, no. 15, pp. 305-310. (In Russian)

4. Коноплев, Ю. П. Термошахтная разработка нефтяных месторождений / Ю. П. Коноплев. – Москва : Недра, 2006. – 288 с.

Konoplev, Yu. P. [Thermo-shaft development of oil fields]. Moscow, Nedra, 2006, 288 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук А. В. Маевроди
Дата поступления рукописи 19.06.2025

Victoria Vladimirovna Zakharova, Assistant; e-mail: viksuta@gmail.com
Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Donetsk national technical university»

283001, Donetsk, Artema St., 58. Phone: +7 (856) 301-07-09

Ekaterina Viktorovna Podvigina, Head of Research of Academician I. P. Bardin Center for Scientific Collaboration; e-mail: evpodvigina@chsu.ru

Konstantin Alexandrovich Podvigin, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor;
e-mail: kapodvigin@chsu.ru

Tatyana Yuryevna Gorokhova, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: tiugorokhova@chsu.ru
Cherepovets State University

162600, Cherepovets, Lunacharsky St., 5. Phone: 8 (202) 55-65-97

PREDICTING THE DYNAMICS OF THE VOLUME CHANGE OF THE ZONE WITH STANDARD MICROCLIMATIC CONDITIONS IN A MINE WORKING OF AN OIL SHAFT

Objective: to predict the dynamics of the volume change of the zone with standard microclimatic conditions in a mine working of an oil shaft based on mathematical modeling of the mixing of the cooled air jet exiting the air-cooling unit equipped with ice-salt cold accumulators and the concurrent airflow in the mine working, accounting for the non-stationary operation of the accumulators and heat sources.

Methods: Numerical methods: CFD modeling (ANSYS Fluent) for analyzing 3D-turbulent mixing of a cooled jet with a co-flow in a mine working; finite difference method for calculating unsteady heat transfer in the installation, including the dynamics of air temperature and moisture content during ice melting; parametric studies of the effects of ice temperature, flow velocities, and insulation degradation on the dynamics of the volume change of the zone with standard microclimatic conditions in the mine working of an oil shaft.

Results: a mathematical model of unsteady heat exchange was developed to predict the temperature of the air jet at the unit outlet during the reduction of the ice-salt mixture mass (phase transition) in the cold accumulators. A three-dimensional model of turbulent mixing of cooled and heated (concurrent) air jets was created, revealing a direct dependence of the effective cooling zone on the velocity of the cooled jet: increased velocity proportionally expands the front of the cooled air flow. A predictive model of the working zone with normative temperature was substantiated, demonstrating the dependence of its volume on the dynamic parameters of the cooled jet: temperature, velocity, and moisture content.

Scientific novelty: For the first time, a hierarchical mathematical model was proposed integrating: unsteady heat exchange in the unit with ice phase transitions; 3D-turbulent jet mixing considering buoyancy and moisture transfer; a spatiotemporal comfort zone criterion based on an indicator function. The dynamics of normative conditions were shown to be determined by the jet parameters. The adequacy of the model to real processes in mine workings was justified.

Practical significance: The results enable optimization of the operation of mine air-cooling units with ice-salt cold accumulators. The developed models provide selection of critical parameters: optimal velocity ranges of jet outflow, replacement intervals for the energy carrier upon degradation, and pre-cooling regimes of the ice to extend effective operation. Implementation of these solutions aims to enhance safety of mining repair works under extreme microclimatic conditions.

Keywords: *turbulent jet mixing; air cooling; cold accumulators; mathematical model; oil mines.*

For citation: Zakharova V. V., Podvigina E. V., Podvigin K. A., Gorokhova T. Yu. Predicting the dynamics of the volume change of the zone with standard microclimatic conditions in a mine working of an oil shaft. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 48-58. EDN UNFVLE

УДК 622.281:691.5

Виктория Валентиновна Лебедева, канд. техн. наук, 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) 252-78-55

БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ОКОЛОШТРЕКОВЫХ ПОЛОС

Цель. Разработка быстротвердеющего гипсоцементного материала с высокой ранней прочностью для возведения литых несущих околоштрековых полос в шахтах.

Методы. Экспериментальные исследования с использованием стандартных методов определения времени начала и конца схватывания гипсоцементной растворной смеси; предела прочности при сжатии отвержденного материала.

Результаты. Разработан компонентный состав гипсоцементного материала, обладающего необходимой ранней и конечной механической прочностью для возведения несущих околоштрековых полос гидромеханическим способом в шахтных условиях интенсивного роста нагрузок со стороны породного массива. Определены технологические параметры приготовления и перекачивания гипсоцементного раствора с применением разработанного материала, подтверждающие практическую возможность возведения литых несущих околоштрековых полос гидромеханическим способом в шахтах.

Научная новизна. Разработана рецептура быстротвердеющего гипсоцементного материала, отличающегося от известных минеральных смесей высокой ранней прочностью, а также преимуществами в геомеханическом и технологическом аспектах.

Практическая значимость. Прочностные характеристики разработанного гипсоцементного материала позволяют использовать его для возведения несущих околоштрековых полос, взрывоустойчивых перемычек, проведения крепежных и закладочных работ в шахтах, а также в качестве вяжущего для получения бетона при производстве цементных взрывоустойчивых панелей, мостовых сооружений и других объектов.

Ключевые слова: горная выработка; водотвердое соотношение; цементная смесь; механическая прочность на одноосное сжатие; время твердения.

Для цитирования: Лебедева В. В. Быстротвердеющий материал для возведения околоштрековых полос // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3(62). – С. 59–65. EDN POOLMG

Постановка проблемы. Переход угледобывающих лав на большие глубины приводит к усложнению горно-геологических условий, связанных с интенсивным проявлением горного давления, газоносностью угольных пластов и т.д. Промышленная безопасность ведения горных работ в таких сложных условиях зависит от способа сохранения устойчивости горных выработок позади очистных забоев, обрабатываемых обратным ходом. Ввиду увеличения глубины подземных разработок повысились требования к параметрам материалов для изготовления крепи горных выработок и технологии их применения в шахтах.

Традиционные способы охраны сопряжения лавы с подготовительной выработкой породных полос металлическими и деревянными кострами малоэффективны. К основным недостаткам таких способов можно отнести их значительную податливость и невысокую несущую способность, что не позволяет эффективно поддерживать зависающую за лавой консоль пород кровли и в сложных горно-геологических условиях не препятствует интенсивному нагружению крепи подготовительной выработки.

Вместо выкладки бутовых полос или деревянных костров для комплексного решения проблемы по поддержанию горных выработок вслед за лавами все шире используют технологию возведения литых несущих околострековых полос из материалов на основе минеральных вяжущих. Литые околострековые полосы, уменьшая конвергенцию в выемочных штреках, оказывают сильное опорное воздействие на породный массив.

Поэтому, чем быстрее нарастает до максимально возможной величины прочность на сжатие материала, на основе которого воздвигают околострековые полосы, тем эффективнее опорное воздействие они оказывают на породный массив [1].

К сожалению, двадцатилетний мировой опыт возведения несущих околострековых полос путем гидромеханической укладки строительных смесей [2] до сих пор не нашел широкого применения в угольной промышленности Донбасса. Этому способствовало отсутствие недорогих строительных смесей на основе материалов, не теряющих прочность в условиях агрессивных шахтных вод, а также производства специального малогабаритного оборудования для приготовления и перекачивания растворов типа агрегатов «Монолит» или комплекта оборудования ОПР-1.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время в практике угольной промышленности используют цементно-минеральный вяжущий материал «Tekblend» производства фирмы «Fosroc Poland»¹ [3] и цементно-минеральную смесь «БИ-крепь» [4]. Однако при использовании цементно-минерального вяжущего материала «Tekblend», представляющего собой мелкодисперсную строительную смесь, для возведения околострековой полосы требуется расход воды вдвое больше, чем для смесей из зернистых материалов.

Как известно, прочность на сжатие отвержденного материала существенно зависит от величины отношения массы воды для приготовления растворной смеси к массе сухого вещества – водотвердого соотношения (В/Т). Поэтому минерально-цементный вяжущий материал «Tekblend» не обеспечивает быстрое твердение как через 2...6 ч после затворения сухой смеси водой, так и после 24 ч, 3 сут, 7 сут, 28 сут твердения. Следовательно, применение материала «Tekblend» не позволит достичь высокой несущей способности литой околострековой полосы.

Намного эффективней для сооружения несущих околострековых полос является применение цементно-минеральной смеси «БИ-крепь», прочностные свойства которой существенно выше, чем у состава «Tekblend» [4]. К главному недостатку указанных цементно-минеральных материалов относится их недостаточная механическая прочность в конце срока твердения.

Цель исследования – создание быстротвердеющего гипсоцементного материала, обеспечивающего набор необходимой прочности и обладающего преимуществами в геомеханическом и технологическом аспектах по сравнению с существующими смесями для возведения литых несущих околострековых полос.

Результаты исследований. Возведение литой несущей околострековой полосы можно производить гидромеханическим способом путем закачивания раствора в мешки-опалубки, сшитые из водонепроницаемого материала (стеклопластика, полиэтилена и др.), имеющие сверху клапаны для заливки раствора и отвода воздуха.

¹ Описание цементной смеси «Текбленд» [Электронный ресурс].

URL https://www.minova.kz/uploads/files/0001_Цементная_смесь_Текбленд.pdf (дата обращения 28.06.2025)

Достоинство опалубочного способа укладки состоит в том, что строительный раствор, благодаря своей пластичности, равномерно заполняет все неровности почвы при отсутствии ограничений по всей высоте заливки.

Вместе с тем, подобная технология укладки предъявляет определенные требования как к свойствам исходной сухой смеси, так и к раствору. Время начала схватывания раствора должно наступать не позднее 15...20 мин с момента заливки его в накопительную опалубку, когда жидкая фаза при заливке обеспечивает свободное растекание раствора без избыточного давления на стенки мешка-опалубки в нижней его части. Реологическая консистенция раствора должна быть такой, чтобы он сохранял жидкое состояние и не расслаивался по фракциям в течение продолжительного времени, что обусловлено необходимостью транспортировки раствора по трубопроводу на значительные расстояния (до 36 м). Кроме этого, гипсоцементный материал уже через 2 ч и 6 ч твердения должен гарантировать достаточно высокую начальную (не менее 4...9 МПа) и конечную прочность (не менее 15 МПа через 7 сут твердения).

Для проведения экспериментальных исследований в качестве исходных компонентов сухой смеси, наиболее полно отвечающих установленным требованиям, взяты цемент (I) и гипсовое вяжущее (II), придающие высокую начальную скорость твердения раствора и прочность гипсоцементного материала, сохраняя при этом необходимую водостойкость [5]. Оценку кинетики набора прочности материала при сжатии проводили на серии образцов – балочек размерами 40 × 40 × 160 мм, изготовленных методом литья. Подготовленные экспериментальные образцы – балочки подвергали испытаниям на одноосное сжатие через 2 ч, 6 ч, 24 ч, 7 сут и 28 сут твердения.

Сроки схватывания и предел прочности при сжатии экспериментальных образцов определяли по стандартным методикам. Для трех исследуемых составов водотвердое соотношение составило 0,40 (см. табл.). Для сравнения в таблице приведены экспериментальные данные, полученные для цементно-минерального вяжущего материала «Tekblend» при различных значениях водотвердого соотношения.

Таблица

Результаты экспериментальных исследований свойств
гипсоцементных смесей и материала «Tekblend»

Состав, водотвердое соотношение (В/Т)	Рецептура, масс. %		Сроки схватывания, начало... конец, с	Предел прочности при сжатии, МПа				
	I	II		2 ч	6 ч	24 ч	168 ч (7 сут)	672 ч (28 сут)
Состав 1, В/Т = 0,40	10	90	400...675	4,7	5,0	5,8	11,2	11,4
Состав 2, В/Т = 0,40	20	80	510...1000	6,3	8,9	10,8	13,1	15,3
Состав 3, В/Т = 0,40	30	70	690...1080	8,8	11,3	13,6	15,1	20,0
Материал «Tekblend», В/Т = 2,00				1,1	–	3,6	5,4	6,2
Материал «Tekblend», В/Т = 1,39				2,4	–	6,3	9,8	11,0

Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует, что материал «Tekblend» при водотвердом соотношении 1,39 и 2,00 не обеспечивает быстрого набора прочности ни в начальный (через 2 ч) ни в последующий период твердения (через 24 ч, 7 сут и 28 сут). Увеличение процентного содержания цемента от 10 до 30 % в исследуемых гипсоцементных смесях приводит к увеличению предела прочности при сжатии от 4,7 МПа до 8,8 МПа через 2 ч твердения. При этом, для состава 3 через 28 сут твердения предел прочности при сжатии максимальный и составляет 20 МПа.

Увеличение массового содержания цемента в сухой смеси в 3 раза при постоянном значении водотвердого соотношения приводит к увеличению начальных сроков схватывания от 400 с (состав 1) до 690 с (состав 3) и конечных – от 675 с (состав 1) до 1080 с (состав 3). Подобные технологические и физико-механические параметры позволяют получить строительные растворы с реологическими характеристиками, способными обеспечить необходимую дальность их подачи и требуемую механическую прочность твердеющего материала в возводимом сооружении.

Поэтому для дальнейших экспериментальных исследований был выбран гипсоцементный состав 3, на основе которого были изготовлены образцы и исследована кинетика набора механической прочности при сжатии в диапазоне водотвердого соотношения 0,34...0,48 (рис. 1). Такой выбор диапазона водотвердого соотношения связан с техническими характеристиками насосного агрегата «Mono WT.820», который использовали при испытаниях.

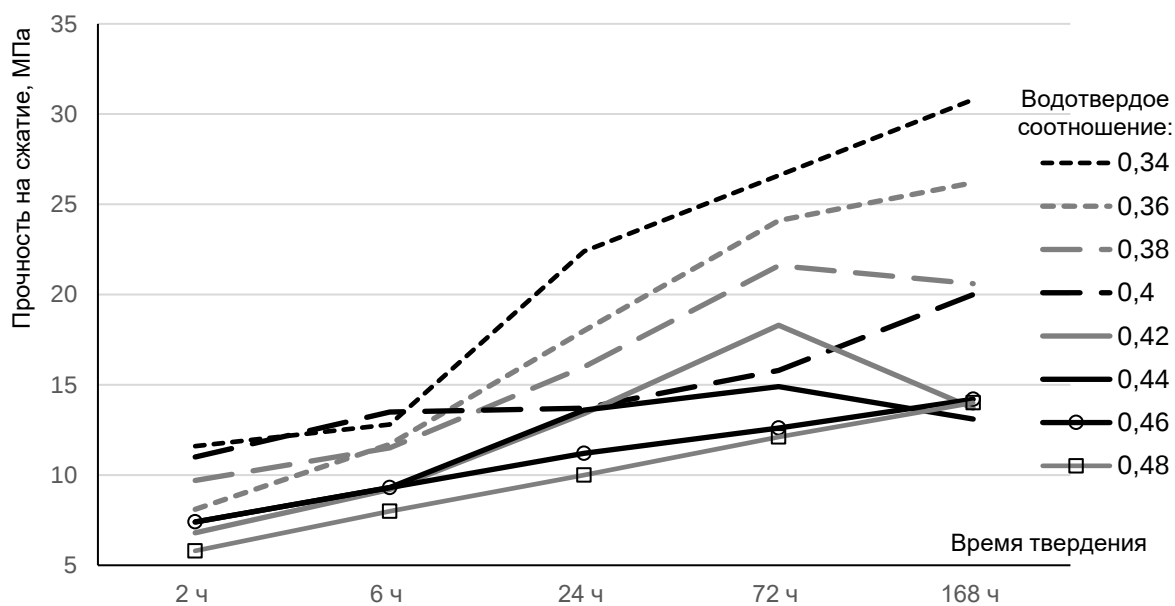


Рис. 1. Кинетика набора прочности на одноосное сжатие образцами (состав 3) при различном значении водотвердого соотношения

В течение 2...6 ч твердения материала наблюдается так называемый индукционный период, связанный с потерей прочности образцов. Результаты эксперимента подтвердили имеющиеся данные об особенностях формирования кристаллизационной структуры гипсоцементной системы в процессе твердения на стадии гидратации, сопровождающиеся деструктивными процессами в твердеющем камне [6].

Механическая прочность быстротвердеющего материала находится в обратно пропорциональной зависимости от водотвердого соотношения (см. рис. 2). Следовательно, для возведения высокопрочной полосы из быстротвердеющего материала целесообразно обеспечить минимальную подачу затворяемой воды при устойчивой работе установки. Экспериментально установлено, что 0,38 и 0,40 – наиболее рациональные значения водотвердого соотношения для разработанного гипсоцементного материала.

С целью апробации разработанного гипсоцементного материала для возведения несущих околоштрековых полос в условиях полигона, отработки способа контроля смешиваемости компонентов, технологии получения сухой смеси, технологических параметров процесса получения строительного раствора и технологии заполнения им мешков-опалубок были проведены испытания на поверхности шахты имени А. Ф. Засядько.

Сухую смесь, содержащую цемент и гипсовое вяжущее, готовили в циклическом режиме на бетонном смесителе гравитационного типа СБ-8-02 в количестве 4,5 т и расфасовывали в бумажные мешки по 25 кг. Для проведения испытаний использовали насосный агрегат «Mono WT.820» с присоединенным к его выпускному патрубку растворопроводом длиной 36 м.

Насосный агрегат «Mono WT.820», оборудованный электродвигателем с частотой вращения 1500 об/мин, имеет скорость подачи сухой смеси 37,5 кг/мин и обладает производительностью 1,86 м³/ч на разработанном составе сухой смеси. При выбранном экспериментальным путем значении водотвердого соотношения В/Т = 0,40 необходимое количество воды затворения составило 15,0·10⁻³ м³/мин. Подготовленный строительный раствор подавали в накопительный мешок-опалубку, изготовленный из полимерного водонепроницаемого материала и имеющий форму параллелепипеда. В ходе его заполнения плотность перекачиваемого раствора контролировали с помощью плотномера. Величина плотности раствора находилась в пределах 1850...1900 кг/м³.

Путем гидромеханической отливки был получен экспериментальный монолитный образец размером 1,10 × 0,75 × 0,75 м. Предел прочности при сжатии через 2 ч твердения материала составил 8,8 МПа; через 6 ч – 11,3 МПа; через 24 ч – 13,6 МПа; через 3 сут – 15,1 МПа; через 7 сут – 15,5 МПа (рис. 2).

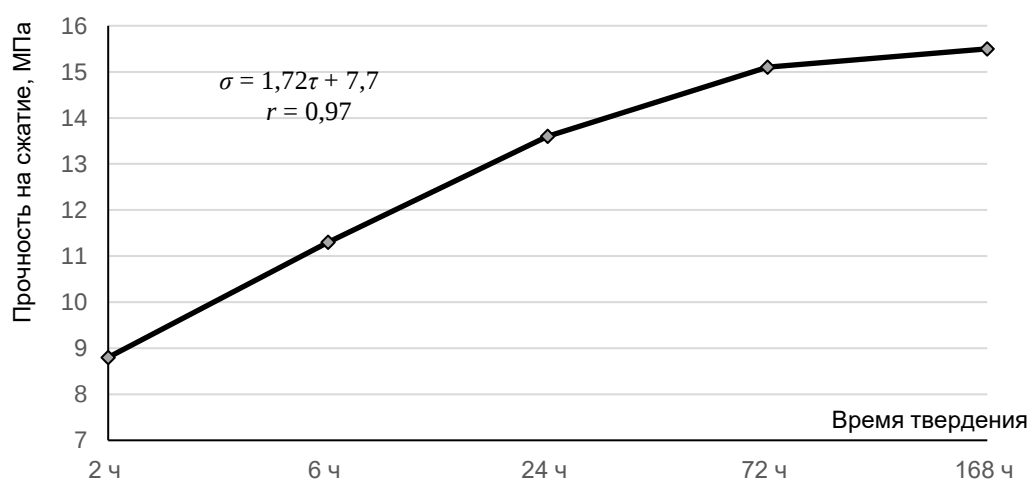


Рис. 2. Кинетика набора прочности на одноосное сжатие экспериментального образца при значении В/Т = 0,4

Выводы. Разработан быстротвердеющий гипсоцементный материал с высокой динамикой достижения ранней прочности без усадочных деформаций. Благодаря этим свойствам материал пригоден для формирования литых несущих конструкций в околоштрековых зонах, строительства взрывоустойчивых перемычек, а также для крепежных и закладочных работ в шахтах, где критически важно предотвратить вытекание раствора из опалубки и требуется максимально быстрый набор прочности.

Прочностные характеристики разработанного гипсоцементного материала позволяют использовать его в качестве быстротвердеющего вяжущего для получения бетона при производстве цементных бронированных взрывоустойчивых панелей, мостовых сооружений и других монолитных ответственных объектов.

Список литературы / References

1. Игнатов, Е. В. Состояние и основные задачи развития длинностолбовой системы разработки на угольных шахтах Кузбасса: краткий обзор / Е. В. Игнатов // Техника и технология горного дела. – 2019. – №4. – С. 30–49.

Ignatov, E. V. [The state and main tasks of development of the longwall mining system on the coal mines of Kuzbass: a brief review]. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2019, no. 4(7), pp. 30-49. (In Russian)

2. Майоров, А. Е. Технология инъекционной изоляции пластовых выработок угольных шахт / А. Е. Майоров, Д. П. Кулик, И. Л. Абрамов // Горная промышленность. – 2023. – № S2. – С. 47–52.

Majorov, A. E., Kulik, D. P., Abramov, I. L. [Technology of injection isolation of coal mine workings]. *Mining Industry Journal*, 2023, no. S2, pp. 47-52. (In Russian)

3. Нурғалиев, Е. И. Технологические схемы возведения изоляционных сооружений горных выработок угольных шахт / Е. И. Нурғалиев, А. Е. Майоров // Уголь. – 2018. – № 11. – С. 10–17.

Nurgaliev, E. I., Mayorov, A. E. [Technological scheme of construction of monolithic isolating constructions at mining excavations of coal mines]. *Ugol*, 2018, no. 11, pp. 10-17. (In Russian)

4. Пештибай Г. И. Обоснование параметров взрывоустойчивых перемычек угольных шахт из материала на основе цементного вяжущего : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Пештибай Георгий Иванович. – Донецк, 2022. – 193 с. Место защиты: ФГКУ «НИИ «Респиратор» МСЧ России».

Peftibay, G. I. *Obosnovaniye parametrov vzryvoustoychivyykh peremychek ugol'nykh shakht iz materiala na osnove tsementnogo vyazhushchego* [Justification of the parameters of explosion-proof bulkheads of coal mines made of cement binder-based material : 05.26.03 «Fire and industrial safety (by industry)» specialty : Candidate of Technical Sciences dissertation / Peftibay Georgy Ivanovich]. Donetsk, 2022, 193 p. Place of thesis defense: Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia». (In Russian)

5. Беляева, Л. С. Минерально-цементная смесь для возведения несущих околоштрековых полос / Л. С. Беляева, В. В. Лебедева // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2009. – № 1 (46). – С. 121–124.

Belyayeva, L. S., Lebedeva, V. V. [Mineral and cement mixture for erection of bearing rib-side packs]. *Scientific bulletin of the NIIGD «Respirator»*, 2009, no. 1 (46), pp. 121-124. (In Russian)

6. Еленова, А. А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня : специальность 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов» : диссертация на соискание ученой степени дис. ... канд. техн. наук : / Еленова Аурика Алмазовна. – Москва, 2017. – 164 с. Место защиты: Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева.

Yelenova, A. A. *Razrabotka kompleksnoy dobavki dlya uskorennoy tverdeniya tsementnogo kamnya* [Development of a complex additive for accelerated hardening of cement stone : 05.17.11 «Technology of silicate and refractory non-metallic materials» specialty : Candidate of Technical Sciences dissertation / Yelenova Aurika Almazovna]. Moscow, 2017, 164 p. Place of thesis defense: D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Г. И. Пейфтибаем
Дата поступления рукописи 05.06.2025

Victoria Valentinovna Lebedeva, Cand. of Tech. Sci., 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) 252-78-55

FAST-HARDENING MATERIAL FOR CONSTRUCTING NEAR-MINE STRIPS

Objective. Development of a fast-hardening gypsum-cement material with high early strength for the construction of cast bearing near-track strips in mines.

Methods. Experimental studies using standard methods for determining the start and end times of setting of a gypsum-cement mortar mixture; the compressive strength of the cured material.

Results. The component composition of the gypsum-cement material, which has the necessary early and final mechanical strength for the construction of bearing near-track bands by the hydro-mechanical method in the mine conditions of intensive growth of loads from the rock mass, has been developed. The technological parameters of the preparation and pumping of the gypsum-cement mortar using the developed material have been determined, confirming the practical possibility of constructing cast bearing near-track bands by the hydro-mechanical method in mines.

Scientific novelty. A formula has been developed for a fast-hardening gypsum cement material that differs from known mineral mixtures in its high early strength, as well as advantages in geomechanical and technological aspects.

Practical significance. The strength characteristics of the developed gypsum-cement material allow it to be used for the construction of load-bearing near-mine strips, explosion-resistant lintels, and for fastening and filling operations in mines, as well as for use as a binder for producing concrete in the production of cement explosion-resistant panels, bridges, and other structures.

Keywords: *mine working; water-solid ratio; cement mixture; mechanical strength in uniaxial compression; curing time.*

For citation: Lebedeva V. V. Fast-hardening material for constructing near-mine strips. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 59-65. EDN POOLMG

УДК [622.452:622.861]:[331.45:622.012.2]

Александр Викторович Мавроди, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru

Андрей Викторович Ивахненко, мл. науч. сотр.; e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-34

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТНИКОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ШАХТ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРАХ

Цель. Обосновать меры по обеспечению безопасности работников поверхностных комплексов шахт от воздействия опасных газов, проникающих в здания и сооружения при подземных пожарах.

Методика. Использованы информационно-аналитические исследования, анализ и обобщение современных информационных источников, анализ аварийности на угледобывающих предприятиях, опыт ликвидации военизированными горноспасательными формированиями подземных и поверхностных пожаров.

Результаты. Установлено влияние реверсирования вентиляционной струи на динамику распространения пожарных газов через переходной тоннель в здания и сооружения поверхностного комплекса шахты.

Научная новизна. Получены математические зависимости определения объема пожарных газов, проникающих в здания и сооружения поверхностного комплекса шахты при подземных пожарах, зависящие от величины потери депрессии надшахтного здания и расхода воздуха в нем.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют предварительно выполнить моделирование аварийного вентиляционного режима шахты при пожаре с учетом утечек воздуха в зданиях и сооружениях поверхностного комплекса и разработать комплекс мер безопасности по недопущению распространения опасных газов для работников предприятия, обслуживающих данные поверхностные комплексы.

Ключевые слова: проветривание, реверсирование, пожарные газы, поверхностный комплекс, меры безопасности, горноспасательная служба.

Для цитирования: Мавроди А. В., Ивахненко А. В. Повышение безопасности работников поверхностных комплексов шахт при подземных пожарах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 66–72. – EDN XRMPRD

Постановка проблемы. Подземные пожары в шахтах представляет собой одну из самых сложных и опасных задач, с которыми сталкиваются горнодобывающие предприятия. Такие аварии приводят к серьезным социальным, экономическим и экологическим последствиям, ставя под угрозу жизнь и здоровье людей [1, 2].

На каждом горном предприятии для безопасного спасания людей и эффективного ведения аварийно-спасательных работ заранее разрабатывают план ликвидации аварии [3, 4]. В данном документе отражены основные действия по предупреждению и ликвидации аварии, порядок оповещения и эвакуации персонала, а также распределение обязанностей между работниками предприятия и аварийно-спасательными формированиями.

Одним из способов предотвращения массового распространения опасных газов по шахте является общешахтное реверсирование вентиляционной струи. Такой режим проветривания применяют при пожарах в надшахтных зданиях, воздухоподающих стволах, околоствольных дворах и выработках шахты предварительно смоделировав данный режим проветривания на электронной (компьютерной) модели топологии вентиляционной сети шахты [5–7].

Эффективность использования вентиляционных маневров в аварийных ситуациях неоднократно подтверждалась в ходе ведения горноспасательных работ [3, 5].

Однако при развитии подземного пожара существует риск самопроизвольного опрокидывания вентиляционной струи от воздействия тепловой депрессией, что может привести к изменению направления свежей вентиляционной струи в воздухоподающем стволе на противоположное [2, 6]. Это может вызвать попадание пожарных газов в здания и сооружения, расположенные на поверхности, тем самым представляя потенциальную угрозу для жизни и здоровья персонала, обслуживающего данные комплексы.

Анализ последних исследований и публикаций. Применение аварийного вентиляционного режима в шахте требует четких и обоснованных решений, основанных на тщательном анализе текущей ситуации и возможных последствиях. Главным условием включения выработки в зону реверсирования является обеспечение безопасности людей, работающих и застигнутых в шахте аварией. Подобные инциденты произошли на шахтах им. А. А. Скочинского, им. Ю. А. Гагарина, «Партизанская» и других. Работники, занимающиеся обслуживанием производственных помещений, машинисты башенных копров, стволовые сигналисты получили среднюю степень отравления пожарными газами. Им приходилось выполнять свои обязанности по подъему и спуску людей, материалов и оборудования, используя горноспасательную кислородно-дыхательную аппаратуру [3].

Известно, что на глубоких шахтах Донбасса (более 1000 м) направление естественной тяги совпадает с работой ВГП и способствует увеличению подачи воздуха в шахту. Но при переходе на реверсивный режим проветривания, естественная тяга действует в противоположном направлении работы вентилятора, тем самым снижая расход воздуха [3, 5].

В соответствии с требованиями правил безопасности в угольных шахтах, практическая проверка эффективности реверсирования вентиляционной струи должна осуществляться дважды в год – в летний и зимний периоды. При этом перевод вентиляторной установки из стандартного режима в реверсивный не должно занимать более 10 минут, а объем воздуха в горных выработках шахты должен составлять не менее 60 % от установленной нормы нормальной работы вентиляторной установки.

В ходе анализа нормативной документации, регламентирующей требования безопасности горных предприятий при их проектировании, а также организацию горноспасательных работ на поверхностных комплексах шахт, установлено, что недостаточно раскрыты проблемы загазовывания поверхностных зданий и сооружений при изменении направления вентиляционной струи, а также не предусмотрены соответствующие меры безопасности для персонала, обслуживающего данные комплексы.

Цель данной работы – обосновать меры по обеспечению безопасности работников поверхностных комплексов шахт от воздействия опасных газов, проникающих в здания и сооружения при подземных пожарах.

Результаты исследований. При возникновении подземного пожара в шахте особое внимание необходимо уделить воздухоподающим стволам. Надшахтное здание воздухоподающего ствола предназначено для подачи больших объемов

воздуха в шахту с целью обеспечения безопасности трудящихся работников под землей.

В тех случаях, когда шахтные стволы с поступающей и исходящей вентиляционными струями связаны между собой, действие тепловой депрессии пожара в реверсивном режиме может привести к опрокидыванию потоков воздуха.

При подземном пожаре опасные газы могут проникать в поверхностные здания и сооружения следующим образом:

- непосредственно из ствола, если здание примыкает к нему (надшахтное здание, копер);
- через подземные переходные тоннели или поверхностные галереи, соединяющие воздухоподающие стволы с административно-бытовыми комбинатами (АБК);
- влияние погодных условий на поверхности.

Здание АБК с подземным переходным туннелем и надшахтное здание с копром можно рассматривать как две параллельные ветви (рис. 1), которые начинаются от выхода из воздухоподающего ствола и заканчиваются окружающей атмосферой. Распределение воздуха между этими параллельными ветвями при реверсировании вентиляционной струи обратно пропорционально их аэродинамическим сопротивлениям, при этом депрессии в ветвях остаются равными.

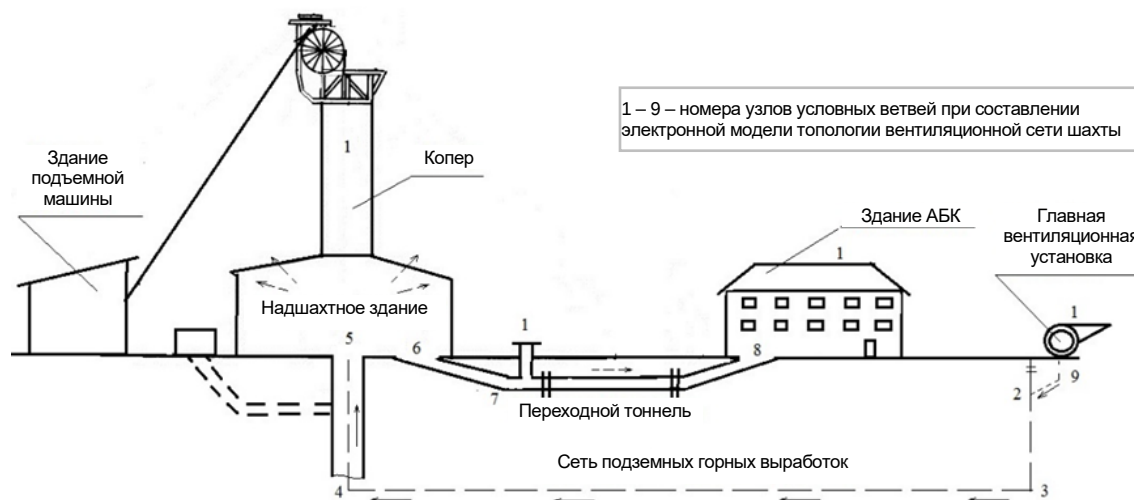


Рис. 1. Направление движения вентиляционной струи в зданиях и сооружениях поверхностного комплекса при реверсировании

Размещение на промплощадке одного воздухоподающего ствола, соединенного с одним переходным тоннелем, является наиболее распространенным вариантом для шахт Донбасса. Поскольку в параллельном соединении депрессия воздуха в ветвях остается равной, тогда:

$$h_{н.з.} = h_{т}, \quad (1)$$

где $h_{н.з.}$ – потери депрессии в надшахтном здании, даПа;

$h_{т}$ – потери депрессии в подземном переходном тоннеле и здании АБК, даПа.

Подставив вместо значения депрессии воздуха произведение аэродинамического сопротивления ветви и расхода воздуха, получим:

$$R_{н.з.} Q_{н.з.}^2 = R_T Q_T^2, \quad (2)$$

где $R_{н.з.}$ – общее аэродинамическое сопротивление надшахтного здания, кп;

$Q_{н.з.}$ – расход воздуха в надшахтном здании, м³/с;

R_T – общее аэродинамическое сопротивление подземного переходного тоннеля и здания административно-бытового комбината, кп;

Q_T – расход воздуха в подземном переходном тоннеле и здании АБК, м³/с;

На основании формулы (2) объем воздуха, проходящий через переходной подземный тоннель и поступающий в здание АБК, определяем по формуле:

$$Q_T = Q_{н.з.} \sqrt{\frac{R_{н.з.}}{R_T}}, \quad (3)$$

Множитель $\sqrt{\frac{R_{н.з.}}{R_T}}$ характеризует соотношение расходов воздуха по рассматриваемым направлениям и может использоваться при расчетах с учетом установленного соотношения расходов воздуха, полученных в процессе реверсирования вентиляционной струи или даже при обычной эксплуатации шахты.

Зная распределение воздуха между рассматриваемыми направлениями (ветвями) и его соотношение в нормальном режиме проветривания можно определить искомое значение Q_T в реверсивном режиме, при условии, что основные параметры ветвей остаются неизменными. Наиболее достоверно значения параметров Q_T и $Q_{н.з.}$ можно определить непосредственным замером при проведении планового реверсирования.

В случае, если в надшахтном здании при реверсировании пожарные газы свободно выходят в атмосферу, тогда потерю депрессии $h_{н.з.}$ можно принять как потерю давления на местное сопротивление по формуле:

$$h_{н.з.} = \xi \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления надшахтного здания относительно ствола;

v – скорость вентиляционной струи в стволе, м/с;

γ – плотность воздуха, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Учитывая соотношение сечений между надшахтным зданием и стволом, а также используя коэффициент местного сопротивления (ξ), можно определить объем поступающего воздуха в здание АБК

$$Q_T = \sqrt{\frac{h_{н.з.}}{R_T}}, \quad (5)$$

Для примера, на рис. 2 представлена динамика поступления пожарных газов в здание АБК через переходной тоннель, зависящая от изменения потери депрессии надшахтного здания.

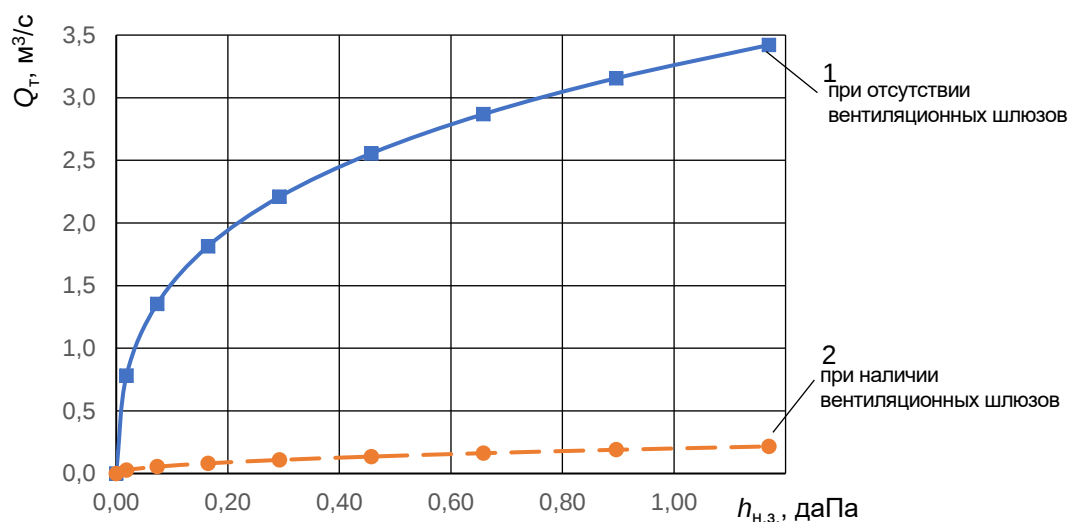


Рис. 2. Динамика поступления пожарных газов через переходной тоннель в надшахтное здание

Кривая 1 показывает объем поступающих пожарных газов в поверхностные здания при отсутствии в подземном переходном тоннеле вентиляционных шлюзов, а кривая 2 — при наличии вентиляционных шлюзов с аэродинамическим сопротивлением 25 кПа. График иллюстрирует снижение поступления пожарных газов в АБК, что свидетельствует о значительном влиянии сопротивления тоннеля на объем воздуха, проходящего через него.

При наличии нескольких воздухоподающих стволов на промплощадке необходимо учитывать расположение очага пожара в горных выработках шахты, особенно если он находится в околоствольном дворе или в одном из стволов. В такой ситуации под воздействием тепловой депрессии, вызванной пожаром в одном из стволов при реверсировании вентиляционной струи, может произойти изменение направления движения воздуха, что приведет к накоплению газа во всех надшахтных зданиях.

Анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что основными причинами проникновения продуктов горения в переходной тоннель АБК являются:

- высокое сопротивление надшахтного здания, через которое проходит реверсивная струя;
- плохая герметизация дверей (шлюзов), отделяющих АБК от ствола;
- действие тепловой депрессии, сформировавшейся в стволе.

Предотвратить попадание пожарных газов в поверхностные здания шахт при длительном реверсировании можно следующими способами:

- снижением сопротивления надшахтного здания после реверсирования;
- герметизацией переходных тоннелей или поверхностных галерей;
- созданием дополнительных путей выхода продуктов горения в атмосферу;
- созданием подпора в отдельных помещениях.

Исследования и практический опыт свидетельствуют о том, что при качественной герметизации дверей шлюза, размещенных в тоннеле, уровень угарного газа в АБК останется в пределах санитарных норм.

Для исключения проникновения пожарных газов, когда ветер направлен в сторону расположения поверхностных комплексов шахты, необходимо выбрать

площадку за пределами зоны задымленности и установить на ней вентиляторную установку с трубопроводом, смонтировав его конец в окно задымленного помещения. После герметизации окон и дверей здания и включения вентилятора создается повышенное вентиляционное давление, что не позволяет пожарным газам попасть внутрь помещения.

Выводы. Предложены методы оценки определения объема опасных газов, поступающих в здания поверхностных комплексов шахт, а также меры по их предупреждению и обеспечению безопасности людей от угроз, связанных с подземными пожарами.

Использование современных технологий, таких как датчики температуры и концентрации газов, работающие в режиме реального времени, может существенно повысить уровень безопасности персонала поверхностных комплексов, способствуя своевременному выявлению вредных и опасных факторов.

Список литературы / References

1. Мясников, С. В. Состояние промышленной безопасности и организация контроля в угольной промышленности / С. В. Мясников // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 6. – С. 9–14.

Myasnikov, S. V. *Sostoyaniye promyshlennoy bezopasnosti i organizatsiya kontrolya v ugol'noy promyshlennosti* [The state of industrial safety and organization of control in the coal industry]. Occupational safety in industry, 2015, no. 6, pp. 9-14. (In Russian)

2. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт / В. А. Портола, В. Г. Игишев, С. А. Син, А. Е. Овчинников // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 36–42.

Portola, V.A., Ovchinnikov, A.Ye., Sin, S.A., Igishev, V.G. [Coal mine accident rate and fire hazard analyses]. Bulletin of research center for safety in coal industry (Industrial Safety), 2018, no. 4, pp. 36-42. (In Russian)

3. Пашковский, П. С. Проветривание шахт при подземных пожарах / П. С. Пашковский, В. И. Лебедев. – Донецк : «Арпи», 2012. – 446 с.

Pashkovskiy, P. S., Lebedev, V. I. *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines during underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 446 p. (In Russian)

4. Пожарная безопасность подземных сооружений : учебное пособие / Д. В. Текушин, О. С. Власова, Н. Ю. Клименти ; М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград : ВолгГТУ, 2019. – 261 с.

Tekushin, D. V., Vlasova, O. S., Klimenti, N. Yu. Fire safety of underground structures: a textbook; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Volgograd State Technical University. Volgograd: VolGTU, 2019, 261 p. (In Russian)

5. Компьютерное моделирование аварийных режимов проветривания шахты / Н. В. Карнаух, А. В. Мавроди, В. В. Захлебн, А. В. Агарков // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 2 (56) – С. 37–46.

Karnaukh, N. V., Mavrodi, A. V., Zakhlebin, V. V., Agarkov, A. V. [Computer modeling the emergency conditions of mine ventilation]. Scientific bulletin of the NIIGD «Respirator», 2019, no. 2(56), pp. 37-46. (In Russian)

6. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» / М. Д. Попов, Д. С. Кормициков, М. А. Семин, Л. Ю. Левин // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 24–32.

Popov, M. D., Kormshchikov, D. S., Semin, M. A., Levin, L. Yu. [Calculation of air flows stability in the mine workings by the factor of thermal depression in the analytical complex «Aeroset»]. Occupational safety in industry, 2020, no. 10, pp. 24-32. (In Russian)

7. Моделирование аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий / Д. Ю. Палеев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S7. – С. 224–230.

Paleev, D. Y., Aksenov, V. V., Lukashov, O. Y., Vasenin, I. M., Kraynov, A. Y. [Ation of aerogasdynamic processes in ventilation systems of modern mining companies]. Mining informational and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal), 2015, no. S7, pp. 224-230. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук П. Е. Мухиным
Дата поступления рукописи 30.06.2025

Aleksandr Viktorovich Mavrodi, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru
Andrey Viktorovich Ivakhnenko, Junior Researcher; e-mail: andrey_ivakhnenko@mail.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artyoma St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-34

IMPROVING PERSONNEL SAFETY AT SURFACE MINE COMPLEXES DURING OF UNDERGROUND FIRES

Purpose. Justify measures at ensuring the safety of workers in surface mine complexes from the effects of hazardous gases that penetrate buildings and structures during underground fires.

Methodology. Uses information and analytical research, analysis and generalization of modern information sources, analysis of accidents at coal mining enterprises, and the experience of underground and surface firefighting by paramilitary mine rescue units.

Results. The effect of reversing the ventilation jet on the dynamics of fire gases propagation through the transition tunnel into the buildings and structures of the surface complex of the mine has been studied.

Scientific novelty. Mathematical dependences of determining the volume of fire gases penetrating into the buildings and structures of the surface complex of the mine during underground fires depending on the value of the loss of depression of the above-mine building and the air flow in it have been proposed.

Practical significance. The conducted research allows for the pre-simulation of the mine's emergency ventilation mode during a fire, taking into account air leaks in the buildings and structures of the surface complex, and the development of a set of safety measures to prevent the spread of hazardous gases for the employees of the enterprise who maintain these surface complexes.

Keywords: ventilation; reversing; fire gases; surface complex; safety measures; mine rescue service.

For citation: Mavrodi A. V., Ivakhnenko A. V. Improving personnel safety at surface mine complexes during of underground fires. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 66-72. EDN XRMPRD

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.888:621.565.53

*Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, нач. института; e-mail: a.kiryan@igps.80.mchs.gov.ru
Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-01*

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭКСТРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСТРАДАВШИХ ГОРНОРАБОЧИХ И СПАСАТЕЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ШАХТ

Цель. Разработать методы и технические средства экстренного охлаждения пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких температурах в горных выработках угольных шахт.

Методы. Использованы аналитический и экспериментальный методы исследования с обработкой результатов при использовании пакетов прикладных компьютерных программ.

Результаты. Проведены исследования теплообменных процессов в системе «внешняя среда – защитная одежда – горноспасатель (горнорабочий)» с охлаждающим быстроразъемным костюмом и пакетом химическим охлаждающим, определены параметры и время защитного действия предложенных средств. Определены технические и эксплуатационные параметры средств защиты горнорабочих и спасателей, обеспечивающие повышение безопасности и эффективности работы при эрготермических нагрузках в угольных шахтах.

Научная новизна. Предложены усовершенствованные методы и средства оказания оперативной доврачебной помощи пострадавшим горнорабочим и горноспасателям при высоких температурах в горных выработках аварийных участков угольных шахт, которые отличаются от существующих аналогов возможностью экстренного охлаждения в быстроразъемных костюмах или пакетах химических охлаждающих.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят повысить безопасность труда горнорабочих и эффективность ведения горноспасательных работ в угольных шахтах.

Ключевые слова: угольная шахта; аварийный участок; горная выработка; высокая температура; методы и средства экстренного охлаждения; быстроразъемный костюм; пакет химический охлаждающий; горнорабочий; горноспасатель; повышение безопасности труда.

Для цитирования: Кирьян А. П. Методы и технические средства экстренного охлаждения пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких температурах в горных выработках шахт // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 73–79. – EDN PNHKEQ

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Согласно требованиям Правил безопасности в угольных шахтах¹ в горных выработках допустимая температура воздуха не должна превышать 26 °С. Однако, несмотря на принимаемые меры по нормализации температуры, в настоящее время около 15 % шахт Донбасса работают в экстремальных микроклиматических условиях (температура воздуха превышает 26 °С и достигает 40 °С при влажности до 100 % и недостаточной скорости потока воздуха), что нередко приводит к перегреванию организма горнорабочих, потере здоровья, иногда – к смертельным случаям, материальным затратам на лечение и выплату по профессиональному заболеванию [1].

¹ Правила безопасности в угольных шахтах: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 507 (изм. от 07.04.2022 № 109, от 23.06.2022 № 195). – 120 с.

Согласно данным Государственного унитарного предприятия Донецкой Народной Республики «Научно-исследовательский институт медико-экологических проблем Донбасса и угольной промышленности» ежегодно к ним поступает в среднем 30 пострадавших с тепловыми травмами, что приводит к большим затратам на лечение, восстановление здоровья и выплаты по профессиональному заболеванию.

Анализ последних исследований и публикаций. Как известно, наиболее эффективным методом оказания помощи пострадавшим является локальное охлаждение. Анализ результатов исследований по определению интенсивности и физиологической эффективности теплосъема с различных участков тела человека, приведенных в работе [2], позволил установить, что охлаждению головы и шеи при гипертермии следует отдавать преимущество. Второе место по эффективности и удобству локального охлаждения занимают надгрудинная и лопаточная области, что объясняется хорошо развитой сосудистой сетью и эффектом влияния на область сердца. При этом, охлаждая шею и туловище, можно достичь уменьшения функционального напряжения организма до 72 %. Третье место по эффективности охлаждения поверхности тела занимают кисти, предплечье и голени. Стопы также обладают перечисленными свойствами, однако наиболее высокий эффект их охлаждения происходит при изоляции от теплопритока из окружающей среды.

Анализируя работу [3] следует отметить, что комплект экстренного охлаждения с водолеяными элементами ОЭ-2 в куртке ТК-50 и в остальных панелях для кистей рук, голеней и стоп, на внутренних слоях которых закреплены полиэтиленовые решетчатые карманы, является эффективным средством при оказании помощи пострадавшим. Однако недостаток заключается в необходимости подгонки охлаждающих панелей в каждом конкретном случае по размерам частей тела пострадавших, а поэтому данный комплект не получил внедрения в подразделениях Федерального государственного унитарного предприятия «Военизированная горноспасательная часть». Вместе с тем пострадавшие горноспасатели не всегда имеют возможность использовать воду для охлаждения.

На основании вышеизложенного можно выделить актуальное научное направление, посвященное разработке методов и технических средств экстренного охлаждения пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких температурах в горных выработках угольных шахт.

Цель статьи: разработать методы и технические средства экстренного охлаждения пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких температурах в горных выработках угольных шахт.

Результаты исследований. Для оказания помощи пострадавшим горнорабочим и спасателям при тепловом травматизме в шахтных условиях предлагается одновременное охлаждение организма в быстроразъемном костюме КЭОП (рис. 1), который состоит из капюшона и комбинезона. Капюшон предназначен для защиты от проникновения внешнего тепла к телу пострадавшего и закрепления водолеяных аккумуляторов холода, а также для размещения их в местах, обеспечивающих эффективное снижение теплового напряжения организма [4].

Комбинезон, рукава, рукавицы, штанины снабжены поперечными кулисами с протянутой в них тесьмой, позволяющей плотно стянуть соответствующие части комбинезона, прижимая источники холода к телу пострадавшего. Рукава и штанины выполнены съемными, крепятся они при помощи текстильных застежек,

что позволяет при необходимости отделять и использовать элементы костюма для охлаждения отдельных частей тела при механических травмах.

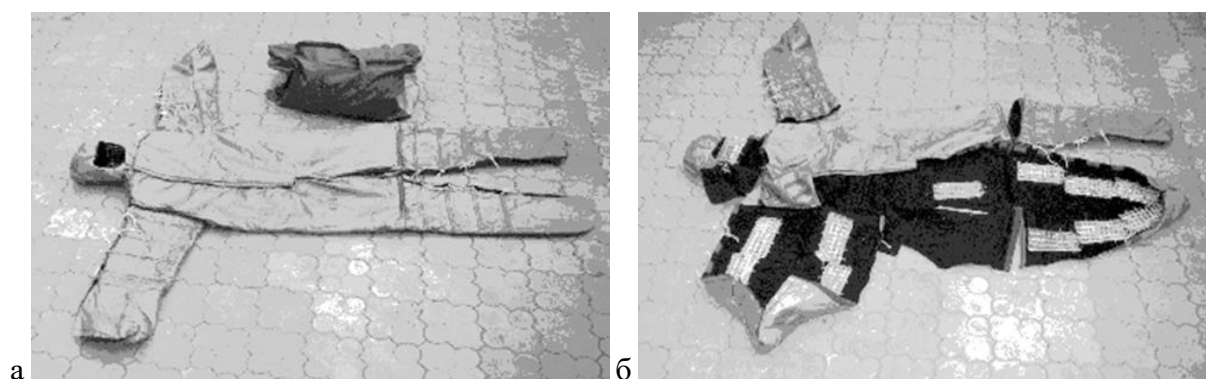


Рис. 1. Костюм КЭОП для экстренного охлаждения при перегревании организма:
а – общий вид; б – в развернутом виде

Испытания костюма проводили в тепловой камере ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» при температуре воздуха 40 °С и влажности 90 % при участии 5 испытуемых-добровольцев, имеющих право работы в изолирующих дыхательных аппаратах (респираторах Р-30) и трудовой стаж в подразделениях горноспасательной службы от 10 до 15 лет.

Перед работой в тепловой камере все испытуемые ощущали «тепловой комфорт», который оценивали как наиболее оптимальный (рациональный): среднее значение теплосодержания организма $Q_T = 124,48$ кДж/кг, средневзвешенная температура кожи $t_k = 33,2$ °С, средняя температура $t_p = 36,9$ °С, частота сердечных сокращений (далее – ЧСС) – 60 мин^{-1} .

В процессе испытаний проводили контроль состояния испытуемых по двум основным параметрам – ЧСС и температуре (рис. 2). Из представленных данных следует, что ЧСС – более динамичный физиологический показатель, значение которого в период работы испытуемых резко возрастает и превышает у некоторых из них при ее завершении по переносу кирпичей 160 мин^{-1} , однако в среднем ее значение равнялось 129 мин^{-1} , а при отдыхе происходило незначительное снижение или постепенное увеличение в отдельные периоды отдыха, при этом предельное значение t_p достигает на 50-й минуте.

Перед началом охлаждения испытуемые оценивали теплоощущение как «очень плохо», двое из них – «очень жарко». Наиболее выражено ощущали перегревание головы, лица, груди и стоп ног. У испытуемых отмечали учащение сердцебиения, слабость, головокружение, рассеянность, беспокойство, тяжесть в ногах, поэтому дальнейшее пребывание в тепловой камере без охлаждения в течение 45 мин считали невыносимым.

Оценка динамики температуры и ЧСС испытуемых в процессе охлаждения непосредственно в тепловой камере с помощью костюма КЭОП (рис. 3) позволила установить, что в начале восстановительного периода средняя температура t_p повышается, а затем снижается, и на 30-й минуте она, в основном, принимает допустимое значение (37 °С).

В первые минуты охлаждения испытуемые отмечали чувство приятной легкой прохлады по всему телу, исчезали головокружение, слабость, существенно улучшалось самочувствие, нормализовался ритм работы сердца, и к 20-й минуте

они все отмечали, по субъективному мнению, что готовы были выполнять физическую работу, охлаждение организма отмечалось комфортным.

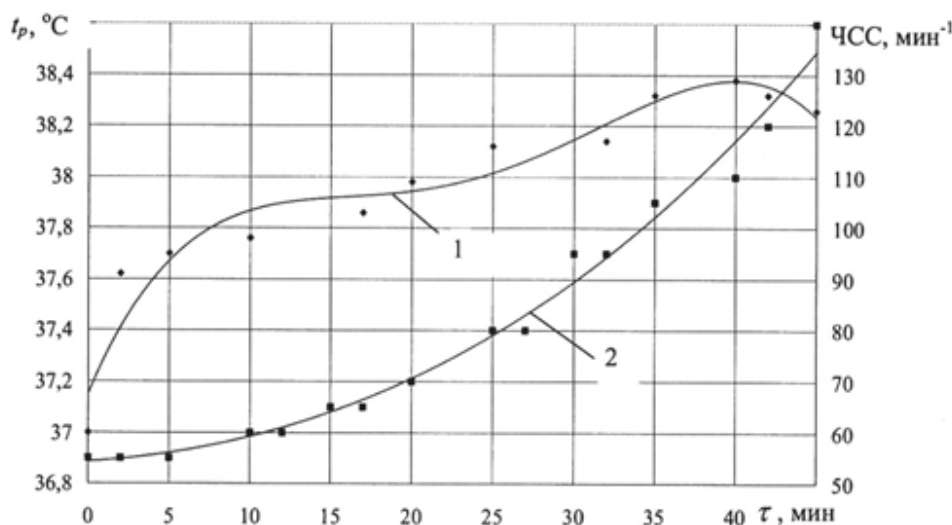


Рис. 2. Динамика ЧСС (1) и t_p (2) испытуемых в процессе эрготермической нагрузки:
•, ■ – данные эксперимента

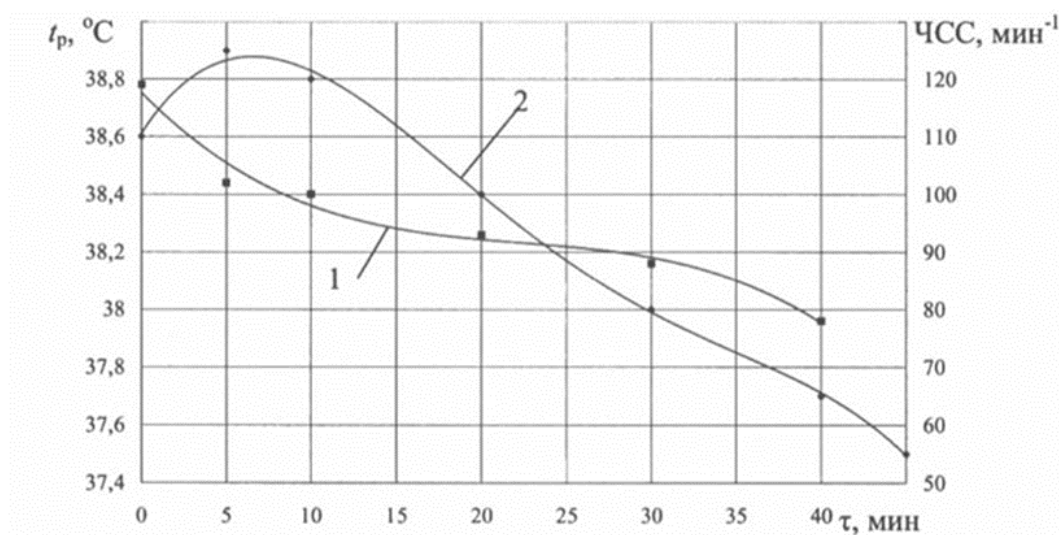


Рис. 3. Динамика ЧСС (1) и t_p (2) испытуемых в процессе охлаждения в костюме КЭОП:
■ – данные эксперимента

Максимальная разница температур между охлаждаемыми и неохлаждаемыми участками тела составляла не более 6,7 °C. Согласно ранее проведенным исследованиям [5] даже разница в 10 °C при локальном охлаждении не вызывает дискомфорта у человека на фоне общей гипотермии, что свидетельствует о некотором запасе комфортности разработанного костюма экстренного охлаждения.

Динамика температуры и ЧСС в процессах эрготермической нагрузки (с индексом «н») испытуемых и экстренного охлаждения (с индексом «о») описываются уравнениями:

$$t_{\text{рн}} = -2 \cdot 10^{-5} \tau^3 + 0,17 \cdot 10^{-2} \tau^2 - 0,119 \cdot 10^{-1} \tau + 36,915, (R = 0,9970);$$

$$\text{ЧСС}_H = -1,22 \tau^4 + 0,199 \cdot 10^{-1} \tau^3 - 0,6131 \tau^2 + 8,0075 \tau + 67,047, (R = 0,9657);$$

$$t_{\text{po}} = -2,4 \cdot 10^{-6} \tau^4 + 0,3257 \cdot 10^{-3} \tau^3 - 0,928 \cdot 10^{-2} \tau^2 + 0,9146 \cdot 10^{-1} \tau + 36,61, (R = 0,9993);$$

$$\text{ЧСС}_0 = -0,18 \cdot 10^{-2} \tau^3 + 0,1233 \tau^2 - 3,0073 \tau + 117,61, (R = 0,9900).$$

Для сравнения эффективности охлаждения с помощью костюма по изложенной выше методике проведены исследования с участием тех же испытуемых, но в термонейтральном микроклимате помещения предкамеры.

После достижения предельного теплового состояния испытуемых вывели из тепловой камеры, где они в режиме отсидки отдыхали при температуре 25 °С, относительной влажности воздуха 70 %, что характерно для горных выработок шахт со свежей струей воздуха. Установлено, что скорость снижения температуры при охлаждении в 1,7 раза выше, чем при отдыхе испытуемых в тепловой камере.

На оснащении горноспасателей отсутствуют средства противогазотепловой защиты с использованием аккумуляторов холода (далее – АХ), поэтому для них целесообразным является применение пакетов химических охлаждающих (ПХО) (рис. 4). Для активации ингредиентов нужно сжать пальцами рук охлаждающий пакет, в результате чего емкость с водой разорвется от усилия, и вода поступит в емкость с химическими ингредиентами в сухом виде: нитратом аммония, карбамидом и силикагелем. После интенсивного встряхивания (7–10 раз) пакета его прикладывают к участкам тела пострадавшего для снятия тепла или снижения болевого синдрома.

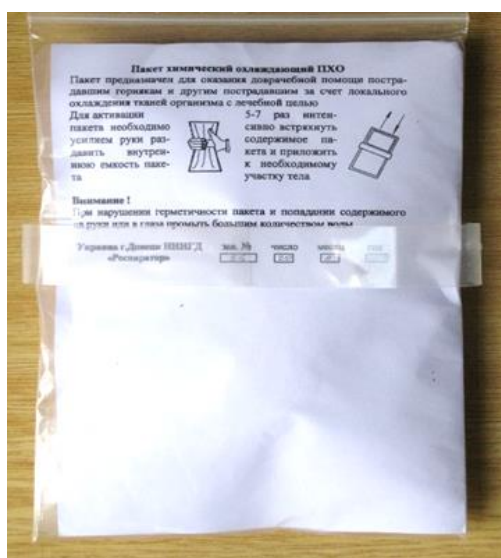


Рис. 4. Пакет химический охлаждающий ПХО

Несмотря на меньшее время охлаждающего действия пакета ПХО (табл.), восстановление теплового состояния с помощью шести единиц достигается в 1,2 раза быстрее, чем при использовании костюма КЭОП, время приведения в действие снижается в 2,5 раза, а масса – примерно в 3 раза.

Кроме этого, для применения костюма КЭОП необходимо иметь на оснащении морозильную установку, теплоизолирующий контейнер К-3, АХ, транспортную сумку, что связано, при отсутствии средств индивидуальной противотепловой защиты, с дополнительными материальными затратами.

Таблица

Технические характеристики пакета химического охлаждающего ПХО
и костюма для экстренного охлаждения при перегревании организма КЭОП

Наименование показателя	Пакет ПХО	Костюм КЭОП
Время охлаждающего действия при температуре воздуха окружающей среды 303 К (+30 °С), мин, не менее	30	45
Время приведения в действие, с, не более	120	300
Усилие, прикладываемое к пакету для его активации, Н, не более	150	—
Время восстановления теплового состояния пострадавших, мин, не более	22	30
Количество используемых пакетов АХ-7, ед., не более	6	28
Общая масса, кг, не более	2,2	7,8
Габаритные размеры, мм, не более	220 × 150 × 32	2000 × 450 × 150
Срок службы, лет, не менее	2	5

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В случае непредвиденных обстоятельств в шахте пострадавшие горнорабочие или горноспасатели при перегревании, используя костюм КЭОП или пакет ПХО, смогут самостоятельно выйти из зоны повышенных температур, а данные средства могут быть использованы для снижения болевого синдрома при механических травмах.

Таким образом, разработанные охлаждающие быстроразъемный костюм и пакет химический охлаждающий позволят сохранить жизнь и здоровье пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких эрготермических нагрузках.

Внедрение данного оборудования – один из важных этапов повышения безопасности труда горнорабочих и спасателей в угольных шахтах.

Перспективное направление дальнейших научных работ – исследование тепломассообменных процессов (в трехмерном виде) в горных выработках аварийных участков угольных шахт при экзогенных пожарах.

Список литературы / References

1. Булгаков, Ю. Ф. Индивидуальная противогазотепловая защита: монография / Ю. Ф. Булгаков, С. В. Борщевский, И. Ф. Марийчук [и др.]. – Донецк: «Норд Компьютер», 2016. – 250 с.

Bulgakov, Yu. F., Borshchevskij, S. V., Marijchuk, I. F. *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita: monografiya* [Individual gas and heat protection: monograph]. Doneck: «Nord Komputer», 2016, 250 p. (In Russian)

2. Положий, В. О. Совершенствование индивидуальных средств охлаждения горняков в условиях повышенной температуры шахтного микроклимата : специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)» : автореф. дис. канд. техн. наук / Виталий Олегович Положий. – Макеевка, 2013. – 20 с.

Polozhiy, V. O. *Sovershenstvovanie individualnyh sredstv ohlazhdeniya gornyakov v usloviyah povyshennoj temperatury shahtnogo mikroklimate* [Improving individual cooling means for miners in conditions of elevated temperature of mine microclimate : 05.26.01 «Occupational safety

(by industry)» speciality : thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Vitalij Olegovich Polozhij]. Makeevka, 2013, 20 p. (In Russian)

4. Воронов, П. С. Обоснование параметров и создание технических средств для противотепловой защиты горноспасателей с использованием сжатого воздуха : специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)» : автореф. дис. канд. техн. наук / Павел Сергеевич Воронов. – Донецк, 2007. – 21 с.

Voronov, P. S. *Obosnovanie parametrov i sozdanie tekhnicheskikh sredstv dlya protivoteplovoj zashchity gornospasatelej s ispolzovaniem szhatogo vozduha* [Justification of parameters and creation of technical means for heat protection of mine rescuers using compressed air : 05.26.01 «Occupational safety (by industry)» speciality : thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Pavel Sergeevich Voronov]. Donetsk, 2007, 21 p. (In Russian)

5. Кирьян, А. П. Научные основы защиты горнорабочих и спасателей при эрготермических нагрузках: монография / А. П. Кирьян. – Донецк: ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России», 2024. – 305 с.

Kiryan, A. P. *Nauchnye osnovy zashchity gornorabochih i spasatelej pri ergotermicheskikh nagruzkah: monografiya* [Scientific bases for protection of miners and rescuers under ergothermic loads: monograph]. Donetsk, FSI «NII «Respirator» EMERCOM of Russia», 2024, 305 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 07.08.2025

Andrey Petrovich Kiryan, Cand. of Tech. Sci., Head of the Institute; e-mail: a.kiryan@igps.80.mchs.gov.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-01

METHODS AND TECHNICAL MEANS FOR EMERGENCY COOLING OF INJURED MINERS AND RESCUERS AT HIGH TEMPERATURES IN MINING WORKINGS

Purpose. Develop methods and technical means for emergency cooling of injured miners and rescuers at high temperatures in coal mine workings.

Methods. Analytical and experimental research methods were used with processing of results using application software packages.

Results. The heat exchange processes in the system «external environment – protective clothing – mine rescuer (miner)» with a cooling quick-release suit and a chemical cooling package were studied, the parameters and time of protective action of the proposed means were determined. The technical and operational parameters of the means of protection for miners and rescuers were determined, ensuring increased safety and efficiency of work under ergothermic loads in coal mines.

Scientific novelty. Improved methods and means of providing emergency first aid to injured miners and mine rescuers at high temperatures in mine workings of emergency sections of coal mines are proposed, which differ from existing analogues by the possibility of emergency cooling in quick-release suits or packages of chemical cooling agents.

Practical value. The research results will improve the safety of miners and the efficiency of mine rescue operations in coal mines.

Keywords: coal mine; emergency area; mine workings; high temperature; emergency cooling methods and means; quick-release suit; chemical cooling pack; miner; mine rescuer; improving occupational safety.

For citation. Kiryan A. P. Methods and technical means for emergency cooling of injured miners and rescuers at high temperatures in mine workings. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 73-79. EDN PHHKEQ

УДК 614.8"364"

Дмитрий Алексеевич Колеров, преподаватель; e-mail: dima11rus@inbox.ru

Владимир Федорович Щетка, канд. воен. наук, профессор; e-mail: vfsche@mail.ru

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149. Тел.: +7 (812) 645-20-34

Алексей Маркович Шупенько, зам. нач. управления аналитического; e-mail: shupenko_a@mail.ru

Главное управление «Национальный центр управления в кризисных ситуациях» МЧС России

121357, Москва, ул. Ватутина, 1. Тел.: +7 (495) 983-79-01

СИСТЕМАТИКА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВОЕННЫМИ КОНФЛИКТАМИ

Цель. Проведение системной классификации чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами для разработки соответствующего терминологического аппарата, а также раскрытия отличий между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт», определения их возможных источников и повышения эффективности реагирования на них.

Методы. Использованы сведения отечественных (E-library) и зарубежных (Scholar Google Academy) баз данных научных исследований, а также основные положения теории системного анализа, критический анализ научных публикаций.

Результаты. Проведена системная классификация чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами. Определены источники их возникновения и проблемные вопросы в данной области.

Научная новизна. Впервые разработан терминологический аппарат, систематизирующий чрезвычайные ситуации, обусловленные военными конфликтами. Раскрыты отличия между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт», дано определение чрезвычайной ситуации, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами, проведена их классификация, определены возможные источники и дана их характеристика.

Практическая значимость. Разработанный терминологический аппарат, систематизирующий чрезвычайные ситуации, обусловленные военными конфликтами, позволит эффективнее реагировать на них и учитывать возможные источники возникновения для прогнозирования и проведения комплекса превентивных мероприятий.

Ключевые слова: систематика; системная классификация; чрезвычайные ситуации; ЧС; источник ЧС; характеристика ЧС; военные конфликты; вооруженные конфликты; Специальная военная операция; СВО.

Для цитирования: Колеров Д. А., Щетка В. Ф., Шупенько А. М. Систематика чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 80–88. – EDN UYEZQT

Постановка проблемы. Вся история человечества связана с войнами, вооруженными и военными конфликтами, при этом современное время не является исключением. В первой четверти XXI века отсутствовали масштабные, мировые войны, но локальные вооруженные (военные) конфликты происходят по всему миру и приводят к многочисленным разрушениям, огромному материальному ущербу, большому количеству пострадавших среди мирного населения и возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС). Поэтому на них необходимо своевременно реагировать и минимизировать величину нанесенного социального и материального ущерба для государства. С этой целью создана и успешно функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации ЧС (РСЧС), на которую возложены функции по предупреждению ЧС, их ликвидации и международному сотрудничеству в области обеспечения безопасности. Однако в настоящее время достаточно подробно регламентировано лишь реагирование на ЧС природного

и техногенного характера и практически не рассмотрены вопросы реагирования на вооруженные (военные) конфликты. Между тем на текущий момент они набирают всё большую динамику и требуют адекватного и своевременного реагирования.

Опасности, возникающие при вооруженных (военных) конфликтах или вследствие этих конфликтов бросают вызов современному обществу, предъявляя высокие требования к уровню защиты населения и территорий. Наличие военных угроз способствует развитию новых средств и способов ведения войны, что безусловно угрожает жизни и здоровью мирного населения и в целом безопасности государства.

Резюмируя вышеизложенные факты, можно сформулировать ряд проблемных вопросов в данной области: отсутствует определение чрезвычайной ситуации, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами, не представлена их классификация и не определены возможные источники. Также отсутствуют нормативно-правовые документы, регламентирующие порядок учета, прогнозирования, предупреждения и реагирования на чрезвычайные ситуации, обусловленные вооруженными (военными) конфликтами.

Анализ последних исследований. Анализ научных публикаций в данной сфере показал, что вопросам предупреждения чрезвычайных ситуаций посвящено множество исследований, однако в подавляющем большинстве они направлены на специфику ЧС природного и техногенного характера [1, 2], а также совершенствованию РСЧС [3, 4]. Часть исследований посвящена вопросам применения информационных ресурсов и программных средств для предупреждения и ликвидации ЧС различного характера [5, 6], а также решения вопросов их прогнозирования [7, 8]. Также предложен подход к систематизации данных о пожарах и ЧС, возникающих в период СВО [9]. В работе [10] предложена формулировка и общая классификация ЧС мирного и военного времени. Статьи [11, 12] посвящены разработке методического подхода к обоснованию рационального направления развития РСЧС и исследованию закономерностей работы подразделений МЧС в условиях военного конфликта соответственно.

Исследования зарубежных авторов направлены на управление готовности к участию в ЧС, обусловленных военными конфликтами [13, 14]. При этом отдельно внимание уделяется вопросам их планирования [15, 16], в том числе с использованием методов искусственного интеллекта [17, 18].

Таким образом анализ публикаций в различных сегментах (отечественных и зарубежных), посвященных вопросам систематики ЧС, обусловленных военными конфликтами и реагирования на них показал, что в данной сфере исследования практически отсутствуют, а в такой же постановке задачи исследования не проводились, в связи с чем материалы статьи являются исключительно актуальными.

Цель исследования заключается в проведении системной классификации ЧС, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами.

Для этого необходимо решить ряд частных задач, а именно: раскрыть отличия между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт», дать определение ЧС, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами, провести их классификацию, определить возможные источники.

Материалы и методы исследований. В качестве материалов исследования были использованы публикации как из отечественных (E-library), так и зарубежных

(Scholar Google Academy) баз данных научных исследований. В качестве методов исследования были использованы основные положения теории системного анализа, а также критический анализ научных публикаций.

Процедуры отбора исследований были выстроены следующим образом:

1. Выделены критерии отбора:

- тип публикации: статья в журнале или диссертация;
- год публикации: не позднее 2010 г. (включительно);
- статья должна быть в открытом доступе (доступна к прочтению).

2. Осуществлен поиск публикаций в E-library и Scholar Google Academy, соответствующих требованиям, указанных в п. 1 по следующим наименованиям и ключевым словам:

- систематика чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами;
- чрезвычайные ситуации, обусловленные военными конфликтами;
- чрезвычайные ситуации военного характера / ЧС военного характера.

В обеих базах данных также была применена функция нейропоиска (поиска с применением методов искусственного интеллекта) исследований, с целью более обширного охвата.

По результатам проведенного анализа выделены исследования, удовлетворяющие требованиям, сформулированным в пункте 1 и предложенным алгоритмами поиска по запросам из пункта 2, а также наиболее соответствующие цели и тематике настоящей статьи.

Далее был проведён детальный анализ каждой публикации с целью выявления наличия или отсутствия уже проведенной системной классификации ЧС, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами; обоснованных различий между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт»; определением ЧС, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами; имеющейся классификации таких ЧС, возможных источников таких ЧС и составлена сравнительная таблица (табл. 1).

Результаты исследований. Для более полного представления результатов исследования необходимо дать определение ЧС, обусловленной вооруженными (военными) конфликтами. В авторской интерпретации это – обстановка на определенной территории и(или) акватории, сложившаяся в результате воздействия средств вооруженной борьбы сторон, при которой нарушаются нормальные условия жизнедеятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу и окружающей природной среде.

Отличия между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт» отражены в Военной доктрине Российской Федерации, утвержденной Президентом Российской Федерации 25.12.2014. Под вооруженным конфликтом понимается вооруженное столкновение ограниченного масштаба между государствами (межгосударственный вооруженный конфликт) или противостоящими сторонами в пределах территории одного государства (внутренний вооруженный конфликт). Военный конфликт – это форма разрешения межгосударственных или внутригосударственных противоречий с применением военной силы (понятие включает все виды вооруженного противоборства, в том числе крупномасштабные, региональные, локальные войны и вооруженные конфликты).

Таблица 1

Результаты анализа отобранных научных публикаций

Ссылка	Раскрыты отличия между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт»?	ЧС, обусловленная вооруженными (военными) конфликтами		
		Дано определение?	Проведена классификация?	Определены возможные источники?
[7]	нет	нет	нет	да, но не в полной мере
[8]	нет	нет	нет	
[9]	нет	нет	нет	
[10]	нет	да	нет	нет
[11]	нет	нет	нет	да, но не в полной мере
[12]	нет	нет	нет	нет
[13]	нет	нет	нет	да, но не в полной мере
[14]	нет	нет	нет	
[15]	нет	нет	нет	
[16]	нет	нет	нет	
[17]	нет	нет	нет	нет
[18]	нет	нет	нет	да, но не в полной мере

Вместе с тем, в Постановлении Пленума Верховного суда Российской Федерации от 18.05.2023 № 11 «О практике рассмотрения судами уголовных дел о преступлениях против военной службы» понятие вооруженный конфликт трактуется как «столкновение ограниченного масштаба между государствами (межгосударственный вооруженный конфликт) или противостоящими сторонами в пределах территории одного государства (внутренний вооруженный конфликт), в ходе которого осуществляется применение Вооруженных сил Российской Федерации, других войск, воинских (специальных) формирований и органов без перехода государства в состояние войны».

Таким образом, можно сделать вывод, что применение военной силы предусмотрено и в случае вооруженного, и в случае военного конфликта. При этом военный конфликт является более широким понятием, включающим в себя и вооруженный конфликт, и войну, и вооруженные акции, тогда как вооруженный конфликт ограничивается только применением вооруженных сил, без объявления состояния войны.

Из предложенного определения следует, что к ЧС, обусловленным вооруженными (военными) конфликтами, могут быть отнесены практически все ЧС, характерные для мирного времени, но которые возникают в результате целенаправленного применения вооруженными силами противоборствующих сторон обычных средств поражения и оружия массового поражения не только против вооруженных сил, но и по объектам экономики, управления, крупным промышленным центрам, потенциально опасным объектам и объектам инфраструктуры.

В табл. 2 приведены наименования и подробные характеристики источников чрезвычайных ситуаций, обусловленных вооруженными (военными) конфликтами.

Таблица 2

Характеристики источников ЧС

Наименование источника	Характеристики источника
Опасности, возникающие от прямого воздействия средств поражения	– Поражения обычными средствами вооруженной борьбы, а также радиоактивным, химическим и бактериологическим оружием; – поражения нелетальным оружием* (психотропным, высокоточным, лазерным)
Опасности, возникающие от косвенного воздействия средств поражения (вторичные факторы поражения)	– Разрушение зданий, радиационно, химически и гидродинамически опасных объектов, – возникновение пожаров и очагов биологического заражения
Опасности, связанные с изменением среды обитания людей, которые могут привести к их гибели или нанести серьезный вред здоровью	Воздействие средств поражения, которые приводят: – к утрате жилищ, – нарушениям в системах снабжения водой, продовольствия и оказания медицинской помощи населению

Примечание. * – могут быть добавлены в перспективе

Анализ полученных данных (см. табл. 1) свидетельствует о том, что вопросы систематики чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами, не были ранее рассмотрены другими исследователями.

При этом, для подразделений МЧС России, сил и средств РСЧС в условиях вооруженных (военных) конфликтов и в условиях мирного времени важнейшей задачей является решение вопросов предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, спасение человеческих жизней.

Но если алгоритм действий по вопросам предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в условиях мирного времени отработан десятилетиями, то в условиях военных конфликтов это зачастую вызывает определенные трудности, связанные с теми условиями, в которых приходится выполнять поставленные задачи: обстрелы, взрывы и т. д.

Таким образом, необходимо проведение дополнительных научных исследований, посвященных вопросам предупреждения и ликвидации ЧС, обусловленных вооруженными (военными) конфликтами, в том числе и в вопросах систематики данных ЧС.

Вывод. В работе вскрыт ряд проблемных вопросов в области системной классификации и определения ЧС, обусловленных вооруженными (военными) конфликтами. Раскрыты отличия между понятиями «вооруженный» и «военный конфликт», определены возможные источники. Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые проведена систематика ЧС, обусловленных военными конфликтами.

Внедрение предложенного терминологического аппарата и системной классификации ЧС, обусловленных военными конфликтами, позволит внести ясность в деятельность органов повседневного управления МЧС России,

реагирующих на такие события, и оптимизировать процесс реагирования сил и средств РСЧС.

По результатам проведённой систематики чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами, выявлено, что существует ряд проблемных вопросов, для решения которых необходимо проведение дальнейших научных исследований, посвященных:

- анализу особенностей принятия решений должностными лицами органов управления МЧС России и ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в чрезвычайных ситуациях, обусловленных вооруженными конфликтами;
- разработке научно-методических средств принятия решений должностными лицами органов управления МЧС России по обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях, обусловленных вооруженными конфликтами.

Список литературы / References

1. Новиков, С. С. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций и комплекс мероприятий по их предотвращению / С. С. Новиков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 7-8 (85-86). – С. 47–51.

Novikov S. S. *Analiz prichin vozniknoveniya chrezvychajnykh situatsiy i kompleks meropriyatiy po ikh predotvrashcheniyu* [Analysis of the causes of emergencies and a set of measures to prevent them]. *Issues of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism*, 2015, no. 7-8 (85-86), pp. 47-51. (In Russian)

2. Сметанкина, Г. И. Анализ опасностей, угроз и рисков возникновения чрезвычайных ситуаций / Г. И. Сметанкина, С. А. Сазонова // Вестник Московского международного университета. – 2024. – № 1(1). – С. 282–287.

Smetankina G. I., Sazonova S. A. *Analiz opasnostej, ugroz i riskov vozniknoveniya chrezvychajnykh situatsiy* [Analysis of the dangers, threats and risks of emergencies]. *Bulletin of the Moscow International University*, 2024, no. 1 (1), pp. 282-287. (In Russian)

3. Лысенко, И. А. Анализ и перспективы совершенствования системы управления РСЧС / И. А. Лысенко, А. А. Комаристый // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 4. – С. 45–49. – DOI 10.25257/FE.2021.4.45-49.

Lysenko I. A., Komaristy A. A. *Analiz i perspektivy sovershenstvovaniya sistemy upravleniya RSChS* [Analysis and prospects for improving the RSChS management system]. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*, 2021, no. 4, pp. 45-49. DOI 10.25257/FE.2021.4.45-49. (In Russian)

4. Кудрявцев, А. Н. Совершенствование и развитие единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на современном этапе / А. Н. Кудрявцев, С. Г. Мингалеев // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18, № 1(67). – С. 27–31. – DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.5.27.

Kudryavtsev A. N., Mingaleev S. G. *Sovershenstvovanie i razvitie edinoj gosudarstvennoy sistemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnykh situatsiy na sovremennom etape* [Improvement and development of a unified state system for the prevention and elimination of emergency situations at the present stage]. *Civil security technologies*, 2021, vol. 18, no. 1(67), pp. 27-31. DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.5.27. (In Russian)

5. Хабибулин, Р. Ш. Анализ информационных ресурсов и программных средств для предупреждения и ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций / Р. Ш. Хабибулин, Ш. К. Кадиев // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 1(50). – С. 50–56.

Khabibulin R. Sh., Kadiev Sh. K. *Analiz informacionnykh resursov i programmykh sredstv dlya preduprezhdeniya i likvidacii pozharov i chrezvychajnykh situatsiy* [Analysis of information

resources and software for the prevention and elimination of fires and emergency situations / R. Sh. Khabibulin]. *Modern problems of civil defense*, 2024, no. 1 (50), pp. 50-56. (In Russian)

6. Гусак, С. В. Вопросы информационно-технологического обеспечения деятельности ЦУКС МЧС России / С. В. Гусак // Точная наука. – 2020. – № 88. – С. 12–14.

Gusak S. V. *Voprosy informacionno-tehnologicheskogo obespecheniya deyatel'nosti CzUKS MChS Rossii* [Issues of information technology support for the activities of the Central Control Center of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. *Exact science*, 2020, no. 88, pp. 12-14. (In Russian)

7. Курличенко, И. В. Совершенствование научно-методического аппарата формирования прогнозирования опасностей и угроз, возникающих при ведении военных конфликтов или вследствие их ведения, а также при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / И. В. Курличенко, Е. В. Горячева // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2017. – № 3. – С. 60–84.

Kurlichenko I. V., Goryacheva E. V. *Sovershenstvovanie nauchno-metodicheskogo apparata formirovaniya prognozirovaniya opasnostey i ugroz, voznikayushhikh pri vedenii voennykh konfliktov ili vsledstvie ikh vedeniya, a takzhe pri vozniknovenii chrezvychajnykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera* [Improving the scientific and methodological apparatus for the formation of forecasting of dangers and threats arising during the conduct of military conflicts or as a result of their conduct, as well as in the event of emergency situations of natural and man-made nature]. *Problems of security and emergency situations*, 2017, no. 3, pp. 60-84. (In Russian)

8. Модель предупреждения чрезвычайных ситуаций и преодоления их последствий в системе обеспечения военно-экономической безопасности России / В. П. Авдотын, М. Н. Козин, В. В. Носов, Ю. П. Марцев // Технологии гражданской безопасности. – 2018. – Т. 15, № 1(55). – С. 60–65. – DOI 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.10.60.

Avdotyin V. P., Kozin M. N., Nosov V. V., Martsev Yu. P. *Model preduprezhdeniya chrezvychajnykh situatsiy i preodoleniya ikh posledstviy v sisteme obespecheniya voenno-ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii* [Model of preventing emergency situations and overcoming their consequences in the system of ensuring military-economic security of Russia] *Civil security technologies*, 2018, vol. 15, no. 1 (55), pp. 60-65. DOI 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.10.60. (In Russian)

9. Федотов, С. Б. Систематизация статистических данных о ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций, возникающих в период специальной военной операции / С. Б. Федотов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 1. – С. 78–85. – DOI 10.25257/FE.2024.1.78-85.

Fedotov S. B. *Sistematizatsiya statisticheskikh dannykh o likvidatsii pozharov i chrezvychajnykh situatsiy, voznikayushhikh v period spetsialnoy voennoy operatsii* [Systematization of statistical data on the elimination of fires and emergency situations arising during a special military operation]. *Fires and emergency situations: prevention, elimination*, 2024, no. 1, pp. 78-85. DOI 10.25257/FE.2024.1.78-85. (In Russian)

10. Тютерев, В. Ф. Понятие и общая классификация чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени / В. Ф. Тютерев // Вестник Нижегородского института управления. – 2016. – № 4(41). – С. 29–33.

Tyuterev V. F. *Ponyatie i obshhaya klassifikatsiya chrezvychajnykh situatsiy mirnogo i voennogo vremeni* [Concept and general classification of emergency situations in peacetime and wartime]. *Bulletin of the Nizhny Novgorod Institute of Management*, 2016, no. 4 (41), pp. 29-33. (In Russian)

11. Петешев, И. В. Методический подход к обоснованию рационального направления развития единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и системы мероприятий по гражданской обороне в мирное и военное время / И. В. Петешев, А. И. Кузьмин, А. И. Пономарев // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – Т. 19, № 5. – С. 67–73.

Peteshev I. V., Kuzmin A. I., Ponomarev A. I. *Metodicheskiy podkhod k obosnovaniyu racionalnogo napravleniya razvitiya edinoy gosudarstvennoy sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychajnykh situatsiy i sistemy meropriyatiy po grazhdanskoy oborone v mirnoe i voennoe vremya* [Methodological approach to substantiating the rational direction of development of a unified state system for the prevention and elimination of emergency situations and a system of civil defense measures in peacetime and wartime]. *Civil security technologies*, 2022, vol. 19, no. S, pp. 67-73. (In Russian)

12. Добрякова, Е. И. Исследование закономерностей работы подразделений МЧС в условиях военного конфликта / Е. И. Добрякова // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2024. – № 1(61). – С. 106–117.

Dobryakova E. I. *Issledovanie zakonomernostey raboty podrazdeleniy MChS v usloviyakh voennogo konflikta* [Study of patterns of work of the EMERCOM units in the conditions of military conflict] *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2024, no. 1 (61), pp. 106-117. (In Russian)

13. Kaneberg, Elvira. (2017). Managing military involvement in emergency preparedness in developed countries. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. 7. 00-00. DOI 10.1108/JHLSCM-04-2017-0014. (In English)

14. Cao J. et al. *Modern emergency management*. Singapore: Springer Singapore, 2018, 290 p. DOI 10.1007/978-981-10-5720-5 (In English)

15. Kaneberg, Elvira & Hertz, Susanne & Jensen, Leif-Magnus. (2016). Emergency preparedness planning in developed countries: the Swedish case. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. 6. 145-172. DOI 10.1108/JHLSCM-10-2015-0039. (In English)

16. Daud A., Al Abdouli K. M., Badshah A. (2025). Emerging Computing Tools for Emergency Management: Applications, Limitations and Future Prospects. *IEEE Open Journal of the Computer Society*. 6. 627-624. DOI 10.1109/OJCS.2025.3563759. (In English)

17. K. visave, Jaideep. (2025). Transparency in AI for emergency management: building trust and accountability. *AI and Ethics*. 5. 3967-3980. DOI 10.1007/s43681-025-00692-x. (In English)

18. Wang Y., Chen H., Gu X. (2025). The characteristics of policy supply in the construction of smart emergency management in China: Based on text mining method. *Journal of Cleaner Production*. 487. 144-151. (In English)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. И. Кузатовым
Дата поступления рукописи 10.07.2025

Dmitry Alekseevich Kolerov, tutor; e-mail: dima11rus@inbox.ru

Vladimir Fedorovich Shchetka, Dr. of Military Sci., Professor; e-mail: vfsche@mail.ru

St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia

196105, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 149. Phone: +7 (812) 645-20-34

Alexey Markovich Shupenko, Deputy Head of the Analytical Department; e-mail: shupenko_a@mail.ru

National Crisis Management Center of the Russian Emergencies Ministry

121357, Moscow, Vatutina St., 1. Phone: +7 (495) 983-79-01

SYSTEMATICS OF EMERGENCY SITUATIONS CAUSED BY MILITARY CONFLICTS

Objective. Conducting a systemic classification of emergency situations caused by military conflicts in order to develop an appropriate terminology, as well as to disclose the differences between the concepts of «armed» and «military conflict», determine their possible sources and improve the effectiveness of response to them.

Methods. The research materials include publications from both domestic (E-library) and foreign (Scholar Google Academy) scientific research databases. The research methods include the basic provisions of the theory of systems analysis, as well as a critical analysis of scientific publications.

Results. A systemic classification of emergency situations caused by military conflicts has been conducted. The sources of their occurrence have been determined. A number of problematic issues in this area have been revealed.

Scientific novelty. For the first time, a terminology has been developed that systematizes emergency situations caused by military conflicts. The differences between the concepts of «armed» and «military conflict» have been disclosed, an emergency situation caused by armed (military) conflicts has been defined, their classification has been carried out, possible sources have been determined and their characteristics have been given.

Practical significance. The developed terminology, systematizing emergency situations caused by military conflicts, will allow to respond to them more effectively and take into account possible sources of occurrence in order to forecast and implement a set of preventive measures.

Keywords: *taxonomy; system classification; emergency situations; ES; source of ES; characteristics of ES; military conflicts; armed conflicts; Special military operation; SMO.*

For citation: Kolerov D. A., Shchetka V. F., Shupenko A. M. Systematics of emergency situations caused by military conflicts. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 80-88. EDN UYEZQT

УДК 614.842.862

Мария Александровна Кузнецова, асп., ст. преп. каф., e-mail: kma-kai@yandex.ru

Сирена Наилевна Зарипова, д-р техн. наук, доцент, профессор каф., e-mail: zsn10@mail.ru

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ»
420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10. Тел.: +7 (843) 231-59-92*

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА КОМПЛЕКТОВАНИЯ ШТАТОВ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЖАРНОГО НАДЗОРА

Цель. Научно-методическое обоснование рационального варианта закрепления вузов, находящихся в ведении Минобрнауки России и реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля, за территориальными подразделениями Государственного пожарного надзора (далее – ТП ГПН).

Методы. В статье использованы методы наблюдения, сравнения, анализа и синтеза, математического моделирования.

Результаты. Выявлена проблемная ситуация, заключающаяся в снижении уровня укомплектованности штатов ТП ГПН, которое сопровождается увеличением нагрузки сотрудников ГПН, снижением качества проводимых контрольно-надзорных мероприятий. В условиях, когда восполнение дефицита кадров не представляется возможным только за счет образовательных организаций МЧС России, являющихся основным источником комплектования штатов ТП ГПН, предлагается для устранения некомплекта сотрудников ГПН привлекать ресурсы образовательных организаций Минобрнауки России, реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля. В статье описана постановка задачи, предложен научно-методический подход к ее решению.

Научная новизна. Предложено научное обоснование методики решения задачи кадрового обеспечения штатов территориальных подразделений Государственного пожарного надзора.

Практическая значимость. Реализация результатов исследования позволит повысить укомплектованность кадров ТП ГПН, долю сотрудников ГПН с профильным образованием и качество проводимых контрольно-надзорных мероприятий за счет адресной подготовки специалистов по образовательным программам пожарно-технического профиля на базе образовательных организаций Минобрнауки России.

Ключевые слова: *Государственный пожарный надзор; контрольно-надзорные мероприятия; укомплектованность штатов; территориальные подразделения; образовательные организации.*

Для цитирования: *Кузнецова М. А., Зарипова С. Н. Обоснование рационального варианта комплектования штатов территориальных подразделений Государственного пожарного надзора // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 89–96. – EDN WSKNGH*

Постановка проблемы. Причинами возникновения каждого четвертого пожара на объектах защиты являются нарушения требований пожарной безопасности. Если в 2019 г. доля пожаров по этой причине в расчете на 1000 объектов защиты составляла менее 10 %, то к началу 2024 г. этот показатель превысил 51 % [1–4] (рис.). Данное обстоятельство способствует увеличению количества внеплановых контрольно-надзорных мероприятий (далее – КНМ), что в условиях укомплектованности штатов территориальных подразделений Государственного пожарного надзора (далее – ТП ГПН) в среднем на 85 % приводит к существенному увеличению нагрузки сотрудников и, соответственно, уменьшению времени на проведение КНМ в расчете на 1 объект защиты. Последнее приводит к существенному снижению качества проверок, что подтверждается результатом

исследования [5], в соответствии с которым без превышения нормативного времени проверки опытным сотрудникам ГПН удастся выявить не более 30 % нарушений требований пожарной безопасности на поднадзорных объектах защиты.

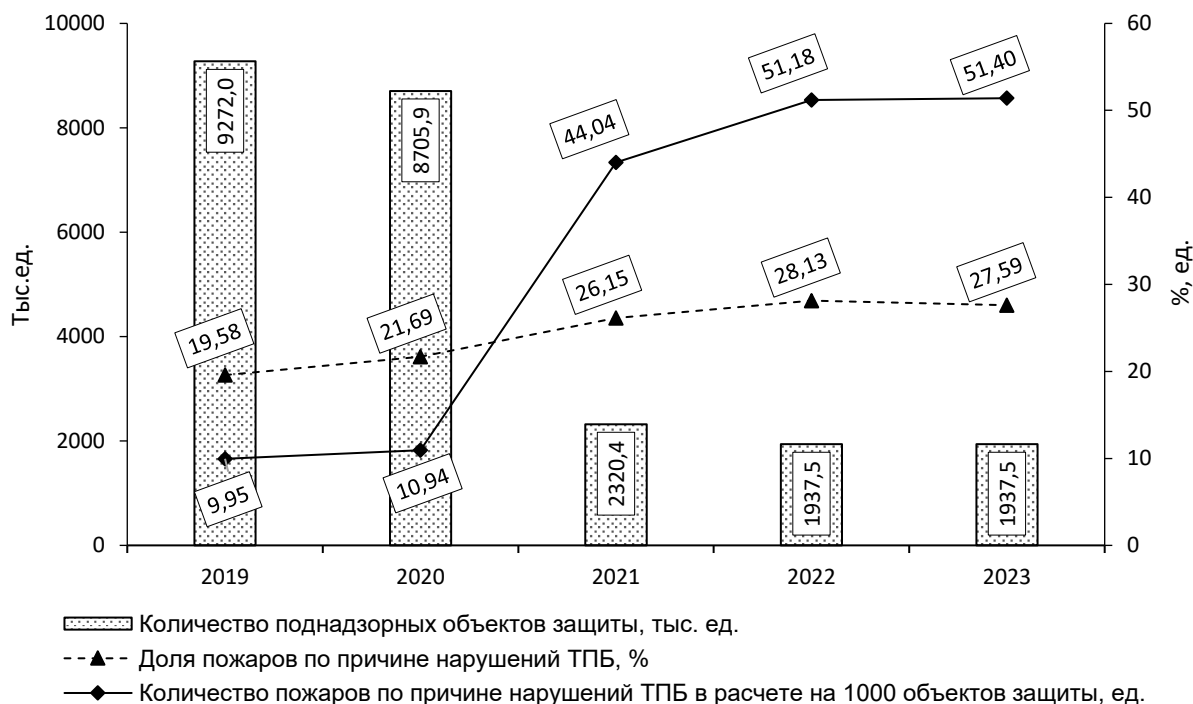


Рис. Статистика пожаров по причине нарушений требований пожарной безопасности на поднадзорных объектах защиты

На качестве КНМ сказываются также наличие профильного образования и практических навыков сотрудников ГПН, на подготовку которых требуется «до 6 лет обучения в ведомственном вузе и еще до 4 лет необходимой практики»¹.

В соответствии с руководящими документами основным источником комплектования штатов ТП ГПН являются образовательные организации высшего образования, находящиеся в ведении МЧС России (далее – ОО ВО МЧС России). Как показывает практика, доля трудоустроенных в ТП ГПН в 2019–2023 гг. из числа выпускников ОО ВО МЧС России составляет в среднем 11,7 %, тогда как доля трудоустроенных из внешних источников приближается в среднем к 87 %, доля специалистов с непрофильным образованием превысила в среднем 42 % [1–4].

ОО ВО МЧС России, реализующие образовательные программы пожарно-технического профиля, в настоящее время не покрывают потребности ТП ГПН в специалистах с соответствующим высшим образованием. Усугубляется ситуация высокой текучестью кадров в ТП ГПН, снижением доли сотрудников с необходимым уровнем квалификации и опытом профессиональной деятельности, наличием нормативных и финансовых ограничений, препятствующих увеличению численности обучающихся в профильных ОО ВО МЧС России.

Одним из перспективных направлений разрешения описанной проблемной ситуации, не требующим выделения дополнительных ресурсов (кадровых,

¹ Нехватка инспекторов Госпожнадзора составляет 15 процентов // Российская газета: [официальный сайт]. – 2024. – 18 июля. – URL: <https://rg.ru/2024/07/18/mchs-nehvatka-inspektorov-gospozhnadzora-sostavliaet-15-procentov.html> (дата обращения: 20.06.2025)

материально-технических, финансовых), является комплектование вакантных должностей ТП ГПН выпускниками вузов Минобрнауки России (далее – вузов), осуществляющих адресную подготовку кадров с определенным набором компетенций по образовательным программам бакалавриата, специалитета и (или) магистратуры пожарно-технического профиля. Реализация данного направления предполагает последовательное решение взаимосвязанных частных задач:

- 1) определение критериев отбора вузов – потенциальных дополнительных источников комплектования штатов ТП ГПН;
- 2) определение перечня и приоритетности вузов для адресной подготовки кадров с высшим образованием пожарно-технического профиля в интересах ТП ГПН на основе критериев отбора;
- 3) определение рационального варианта закрепления вузов с учетом их приоритетности за ТП ГПН.

Цель исследования. Научно-методическое обоснование рационального варианта закрепления вузов, находящихся в ведении Минобрнауки России и реализующих образовательные программы пожарно-технического профиля, за территориальными подразделениями Государственного пожарного надзора

Изложение основного материала и полученных научных результатов. Подробное описание первой частной задачи приведено в работах [6, 7]. В рамках данной статьи рассматриваются формализованная постановка и наиболее приемлемые подходы к решению второй и третьей частных задач.

Критерии $k_1, k_2, \dots, k_L$ отбора вузов, которые получены путем опроса сотрудников ГПН и обучающихся, выбравших образовательные программы (далее – ОП) пожарно-технического профиля в рамках направлений подготовки 20.03.01 (20.04.01) «Техносферная безопасность» и (или) специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность» для обучения в ОО ВО МЧС России или вузах Минобрнауки России, можно отнести в три группы:

- 1) k_i^1 ($i = \overline{1, L^1}$) – подлежат учету на начальной стадии отбора вузов, например, критерий «наличие в вузе военного учебного центра»;
- 2) k_j^2 ($j = \overline{1, L^2}$) – подлежат учету на стадии установления приоритетности вузов (в рамках решения второй частной задачи);
- 3) k_l^3 ($l = \overline{1, L^3}$) – подлежат учету на стадии закрепления вузов за ТП ГПН (в рамках решения третьей частной задачи), например, критерий «близость вуза к месту проживания».

Очевидно, $L^1 + L^2 + L^3 = L$.

После учета критериев первой группы из m_0 вузов, реализующих ОП пожарно-технического профиля, отбирается m вузов:

$$V^0 = \{v_1^0, \dots, v_{m_0}^0\} \rightarrow V^1 = \{v_1^1, \dots, v_m^1\},$$

в отношении которых устанавливается значимость (важность).

Задача установления значимости вузов может быть сформулирована следующим образом: для известных перечня вузов $V^1 = \{v_1^1, \dots, v_m^1\}$ и критериев k_j^2 ($j = \overline{1, L^2}$) второй группы необходимо определить коэффициенты значимости (важности) вузов.

Наиболее предпочтительным методом решения данной задачи является метод анализа иерархий: вершина иерархии определяет цель, на втором уровне

размещаются критерии k_j^2 ($j = \overline{1, L^2}$), на третьем уровне – альтернативы (вузы), значимость которых предстоит определить.

Укрупненный алгоритм решения задачи состоит из следующих шагов [8].

1. Построение матрицы попарных сравнений критериев по цели, определение их важности (весов), оценка согласованности проведенных оценок. В результате получается вектор-столбец весов w_j критериев k_j^2 ($j = \overline{1, L^2}$):

$$W = (w_1, \dots, w_{L^2})^T.$$

2. Построение матриц попарных сравнений вузов по критериям, определение весов (локальных приоритетов) вузов по каждому критерию, оценка согласованности проведенных оценок. В результате получается совокупность вектор-столбцов локальных приоритетов вузов по каждому критерию, которую можно представить в виде матрицы S порядка (m, L^2)

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1L^2} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2L^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mL^2} \end{pmatrix}.$$

3. Определение весов (глобальных приоритетов) вузов по системе иерархии на основе матрицы S и с вектор-столбца W :

$$(\gamma_1, \dots, \gamma_m)^T.$$

Так как к построению матриц попарных сравнений привлекаются представители экспертного сообщества, полученные значения весов усредняются и впоследствии учитываются при закреплении вузов за ТП ГПН.

В следующей задаче под рациональным вариантом закрепления вузов за ТП ГПН подразумевается такое распределение, которое доставляет максимальную укомплектованность штатов ТП ГПН выпускниками вузов, имеющих наибольший приоритет, при минимальных затратах на подготовку специалистов с заявленными компетенциями.

Максимальная укомплектованность штатов достигается за счет минимизации суммы разностей между потребностями в кадрах с определенной квалификацией и предельными численностями контингента обучающихся вузов по соответствующим уровням образования. В соответствии с критериями наибольшим приоритетом обладают вузы, менее удаленные от ТП ГПН, имеющие высокие уровни важности, которые позволяют обеспечить формирование заявленных компетенций у выпускников, минимизация затрат на подготовку кадров – за счет регулирования количества обучающихся в учебных группах с учетом уровней образования (другими словами, с учетом экономической целесообразности формирования учебных групп и, соответственно, выделения вузам контрольных цифр приема по перечисленным выше направлениям подготовки и (или) специальности), а также сведения к минимуму дополнительных затрат вуза на подготовку одного специалиста определенного уровня образования (например, за счет выбора в качестве баз практики близлежащих ТП ГПН, проведения совместно с ТП ГПН мероприятий в рамках приемной кампании и других мер).

Допуская, что каждый вуз может быть закреплен за несколькими ТП ГПН, как и каждое ТП ГПН может взаимодействовать с несколькими вузами по вопросам комплектования штатов и учитывая, что в общем случае количество закрепляемых вузов не совпадает с количеством ТП ГПН, математическую модель открытой многокритериальной задачи о назначениях можно представить в виде:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ F_2 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \\ F_3 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ F_4 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &\geq 1, j = \overline{1, n}, \sum_{j=1}^n x_{ij} \geq 1, i = \overline{1, m}, x_{ij} \geq 0, \end{aligned}$$

где F_1-F_4 – целевые функции-критерии;

(u_{ij}) – матрица разностей между количеством вакантных должностей j -го ТП ГПН и предельной численностью контингента обучающихся i -го вуза по образовательным программам пожарно-технического профиля ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);

(v_{ij}) – матрица важности (значимости) i -го вуза относительно j -го ТП ГПН ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);

(r_{ij}) – матрица расстояний между i -м вузом МОН и j -м ТП ГПН ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);

(c_{ij}) – матрица затрат i -го вуза МОН на подготовку одного специалиста для j -го ТП ГПН ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$);

x_{ij} – булевы переменные: $x_{ij} = 1$, если i -й вуз закреплен за j -м ТП ГПН, и $x_{ij} = 0$ в противном случае.

Преобразование представленной модели в модель простейшей линейной многокритериальной задачи о назначениях состоит из следующих этапов:

1) нормализация матриц $(u_{ij}), (v_{ij}), (r_{ij}), (c_{ij}), i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$, в результате которой получаются матрицы $(u_{ij}^*), (v_{ij}^*), (r_{ij}^*), (c_{ij}^*), i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$;

2) преобразование нормализованной матрицы (v_{ij}^*) к матрице (v_{ij}^{**}) для перехода от задачи на максимизацию к задаче на минимизацию

$$F_3^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij}^{**} x_{ij} \rightarrow \min;$$

3) преобразование нормализованных прямоугольных матриц к квадратным матрицам дополнением нулевых строк в случае, если $m < n$, и нулевых столбцов в случае, если $m > n$ для получения модели закрытой многокритериальной задачи;

4) формирование целевых функций-критериев с безразмерными коэффициентами;

5) определение весовых коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ относительной важности целевых функций-критериев методом экспертных оценок ($\alpha_i > 0, i = \overline{1, 4}, \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$);

6) формирование скалярной целевой функции – интегрального критерия

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_1 u_{ij}^* + \alpha_2 v_{ij}^{**} + \alpha_3 r_{ij}^* + \alpha_4 c_{ij}^*) x_{ij};$$

7) переход к однокритериальной задаче о назначениях вида

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_1 u_{ij}^* + \alpha_2 v_{ij}^{**} + \alpha_3 r_{ij}^* + \alpha_4 c_{ij}^*) x_{ij} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}, \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = \overline{1, n}, x_{ij} \in \{0; 1\};$$

8) решение однокритериальной задачи о назначениях любым способом, в результате которого получится оптимальное по Парето решение [9];

9) выделение подматрицы (x_{ij}) , $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$, в полученном Парето-оптимальном решении.

Путем варьирования значений весовых коэффициентов $\alpha_i, i = \overline{1, 4}$ можно получить множество Парето-оптимальных решений, среди которых ЛПР выбирается рациональный вариант закрепления вузов за ТП ГПН.

Выводы, перспективы дальнейшего развития. Проведенное исследование позволило разработать научно-методический подход к решению актуальной задачи кадрового обеспечения ТП ГПН. На основе анализа статистических данных о пожарах, КНМ, нагрузке сотрудников ГПН, источниках комплектования штатов ТП ГПН выявлена проблемная ситуация, решение которой в условиях ограниченных ресурсов ОО ВО МЧС России требует разработки нестандартных подходов. Описанный выше подход, который сводится к последовательному решению трех взаимосвязанных частных задач, представляет по своей сути укрупненный алгоритм решения задачи комплектования штатов ТП ГПН специалистами с профильным высшим образованием, без привлечения дополнительных кадровых, материально-технических, финансовых и иных ресурсов.

Для применения предложенного научно-методического подхода на практике требуется разработка алгоритмов решения описанных частных задач с пошаговой детализацией и их программная реализация. Реализация научно-методического подхода позволит усовершенствовать систему кадрового обеспечения ТП ГПН и сделать систему пожарной безопасности более эффективной.

Список литературы / References

1. Государственный надзор МЧС России в 2020 г: Информационно-аналитический сборник / П. В. Полехин [и др.]. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ, 2021. – 127 с. – ISBN 614.84.31. – EDN OWAYED.

Polekhin, P. V., Kozlov, A. A., Poroshin, A. A., Matyushin, Y. A., Firsov, A. G., Arslanov, A. M., Zagumennova, M. V., Malyomina, E. N., Preobrazhenskaya, E. S. *Gosudarstvennyy nadzor MChS Rossii v 2020 g: Informatsionno-analiticheskiy sbornik*. Moscow, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2021. 127 p. – ISBN 614.84.31. – EDN OWAYED. (In Russian)

2. Государственный надзор МЧС России в 2021 г: Информационный сборник / С. В. Глинов [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 263 с. – EDN CAAPCZ.

Glinov, S. V., Grigoriev, A. A., Dmitriev, S. A., Zobkov, D. V., Kozlov, A. A., Mashchitsky, A. O., Nestrugin, A. N., Polekhin, P. V., Ryzhikov, A. I., Fedulov, A. V., Chebukhanov, M. A., Zagumennova, M. V., Iskalin, V. I., Malyomina, E. N., Matyushin, A. V., Preobrazhenskaya, E. S., Firsov, A. G. *Gosudarstvennyy nadzor MChS Rossii v 2021 g: Informatsionnyy sbornik*. Balashikha, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2022, 263 p. – EDN CAAPCZ. (In Russian)

3. Государственный надзор МЧС России в 2022 г: Информационно-аналитический сборник / С. В. Глинов [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 262 с. – EDN JARHLE.

Glinov, S. V., Grigoriev, A. A., Dmitriev, S. A., Zobkov, D. V., Kozlov, A. A., Matskevich, D. M., Mashchitsky, A. O., Nestrugin, A. N., Polekhin, P. V., Ryzhikov, A. I., Chebukhanov, M. A., Zagumenova, M. V., Iskalin, V. I., Malyomina, E. N., Matyushin, A. V., Firsov, A. G. *Gosudarstvennyy nadzor MChS Rossii v 2022 g: Informatsionno-analiticheskiy sbornik*. Balashikha, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2023, 262 p. – EDN JARHLE. (In Russian)

4. Государственный надзор МЧС России в 2023 г: информационно-аналитический сборник / М. В. Загуменнова [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. – 258 с. – EDN FCTSHI.

Zagumenova, M. V., Domrachev, K. V., Malyomina, E. N., Preobrazhenskaya, E. S., Matyushin, A. V., Firsov, A. G., Glinov, S. V., Grigoriev, A. A., Kozlov, A. A., Matskevich, D. M., Mashchitsky, A. O., Nestrugin, A. N., Polekhin, P. V., Ryzhikov, A. I., Chebukhanov, M. A. *Gosudarstvennyy nadzor MChS Rossii v 2023 g: Informatsionno-analiticheskiy sbornik*. Balashikha, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2024, 258 p. – EDN FCTSHI. (In Russian)

5. Шаров, И. Н. Влияние уровня знаний государственных инспекторов по пожарному надзору на надежность их работы / И. Н. Шаров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2012. – № 3. – С. 74–76.

Sharov, I. N. [Influence of level of knowledge state inspectors on the supervision on reliability of their work]. *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2012, no. 3, pp. 74-76. (In Russian)

6. Кузнецова, М. А. Профессиональные ориентиры обучающихся как основа формирования кадрового потенциала ФПС ГПС МЧС России / М. А. Кузнецова, С. Н. Зарипова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 240–252.

Kuznetsova, M. A., Zaripova, S. N. [Professional orientation of students as a basis for forming the staffing potential of the Fire Service of Russian Ministry of Emergency Situations]. *Journal of Civil Protection*, 2025, no. 9 (2), pp. 240-252. (In Russian)

7. Профессиональные траектории сотрудников Государственного пожарного надзора / М. А. Кузнецова, С. Н. Зарипова, Р. Ф. Зарипов, П. В. Понурко // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 2 (65). – С. 40–48.

Kuznetsova, M. A., Zaripova, S. N., Zaripov, R. F., Ponurko, P. V. *Professionalnye traektorii sotrudnikov Gosudarstvennogo pozharnogo nadzora. Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2025, no. 2(65), pp. 40-48. (In Russian)

8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ./ Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 198 с.

Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy: per. s angl.* Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993, 198 p. (In Russian)

9. Зак, Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Ю. А. Зак. – М. : Экономика, 2014 – 455 с.

Zak, Yu. A. *Prikladnye zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii*. Moscow, Ekonomika Publ., 2014, 455 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук П. Е. Мухиным
Дата поступления рукописи 28.07.2025

Maria Alexandrovna Kuznetsova, Postgraduate Student, Senior Lecturer;
e-mail: kma-kai@yandex.ru

Sirena Nailevna Zaripova, Dr. of Tech. Sci., Associate Prof., Professor; e-mail: zsn10@mail.ru
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI»
420111, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 10. Phone: 8 (843) 231-59-92

SUBSTANTIATION OF THE RATIONAL STAFFING APPROACH FOR TERRITORIAL DIVISIONS OF THE STATE FIRE SUPERVISION

Objective. To provide a scientific and methodological rationale for addressing staff shortages in territorial divisions of the State Fire Supervision (hereinafter referred to as TD SFS) through the optimal allocation of higher education institutions under the jurisdiction of the Russian Ministry of Science and Higher Education that offer fire safety and engineering programs.

Methods. The study employs observation, comparison, analysis, synthesis, and mathematical modeling.

Results. The study identifies a critical issue: declining staffing levels in TD SFS, which leads to increased workload for SFS officers and reduced quality of control and supervisory measures. Under current conditions, when staffing shortages cannot be resolved solely through educational institutions of EMERCOM of Russia, the study proposes to address SFS staff shortages by utilizing resources of educational institutions under the Russian Ministry of Science and Higher Education that implement fire safety engineering programs. The article describes the problem statement and proposes a scientific-methodological approach to its solution.

Scientific novelty. The novelty of the research lies in the formulation of the problem and the proposed solution framework. The developed methods for sequentially addressing three specific sub-tasks enable a solution to this pressing practical challenge.

Practical value. Implementing the study's findings will improve staffing levels in TD SFS, increase the proportion of fire supervision personnel with specialized education, and consequently enhance the quality of control and supervisory measures through targeted training of specialists in fire safety and engineering programs at institutions under the Russian Ministry of Science and Higher Education.

Keywords: *State Fire Supervision; control and supervisory measures; staffing levels; territorial divisions; educational institutions.*

For citation: Kuznetsova M. A., Zaripova S. N. Substantiation of the rational staffing approach for territorial divisions of the State Fire Supervision. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 89-96. EDN WSKNGH

УДК 355.244.2:[697.95:628.5]:001.891.572*Светлана Александровна Гарелина, канд. техн. наук, доц., профессор кафедры;**e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru**Константин Павлович Латышенко, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры;**e-mail: kplat@mail.ru**Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» 141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: 8 (498) 699-05-59*

МОДУЛЬНЫЙ АНАЛИТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

Цель. Обосновать метод прогнозирования концентраций опасных веществ, кислорода и углекислого газа в замкнутых помещениях для определения допустимого времени пребывания укрываемых лиц, формирования управленческих решений по режимам вентиляции и регенерации воздуха, а также для построения прогностических моделей в условиях дефицита исходных данных.

Методика. Методика основана на аналитическом решении уравнений материального баланса с использованием данных инструментальных измерений параметров атмосферы, что обеспечивает сочетание теоретической обоснованности и практической применимости.

Результаты. Модульный аналитико-экспериментальный метод, включающий четыре взаимосвязанных блока: аналитическое моделирование концентраций опасных веществ при различных сценариях поступления и режимах вентиляции; моделирование дыхательной нагрузки укрываемых лиц, учитывающее потребление кислорода и накопление углекислого газа; прогнозирование момента достижения критических концентраций по результатам дискретных измерений; интеграцию в информационно-измерительную систему для автоматического формирования сигналов реагирования.

Научная новизна. Впервые реализована возможность интеграции прогноза в информационно-измерительные системы с автоматическим формированием сигналов реагирования на основе комплексного учёта внешнего загрязнения и дыхательной нагрузки, унификации сценариев поступления опасных веществ, использовании аппроксимации по дискретным измерениям и обеспечении аналитической решаемости моделей.

Практическая значимость. Определяется возможностью адаптивного управления режимами вентиляции, продлением времени безопасного пребывания и повышением уровня защиты укрываемых лиц. Метод может использоваться при проектировании и эксплуатации убежищ, бункеров, подземных сооружений и промышленных объектов, обеспечивая научное обоснование режимов вентиляции, своевременное принятие решений по эвакуации и применение систем регенерации воздуха.

Ключевые слова: *защитные сооружения гражданской обороны; математическое моделирование; концентрация; кислород; углекислый газ; опасные вещества; время пребывания укрываемых; вентиляционная система; предельно допустимая концентрация; режим работы вентиляции.*

Для цитирования: *Гарелина С. А., Латышенко К. П. Модульный аналитико-экспериментальный метод прогнозирования загрязнения воздушной среды в замкнутых объёмах // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 97–106. – EDN RQLFYK*

Постановка проблемы. Одной из приоритетных задач гражданской обороны (ГО) определено внедрение современных средств защиты населения от угроз

военного и техногенного характера¹. Однако существующие методы расчёта времени достижения критических концентраций опасных веществ (ОВ) в замкнутых помещениях в основном базируются на упрощённых балансовых и эмпирических моделях. Такие модели дают лишь приближённые результаты, не отражают всей сложности процессов и ограничены в применении при принятии оперативных решений в условиях чрезвычайной ситуации (ЧС).

В связи с этим актуальной научно-практической задачей является разработка методов анализа состояния воздушной среды в замкнутых помещениях (защитные сооружения ГО, метрополитен, бункеры, укрытия и др.²) на основе аналитически решаемых моделей, способных учитывать дыхательную нагрузку укрываемых лиц, многосценарные условия поступления загрязнителей и обеспечивать интеграцию с информационно-измерительными системами (ИИС).

Анализ последних исследований. Исследования последних лет [1–3]) показывают, что расчёт микроклимата и распространения ОВ в замкнутых объёмах в основном ведётся с применением экспоненциальных и линейных (упрощённых) моделей. Они предполагают идеальное перемешивание воздуха и фиксированные условия вентиляции, что упрощает вычисления, но не отражает реальных процессов [4]. Такие подходы позволяют выполнять лишь базовые инженерные оценки и обладают рядом существенных ограничений: не учитывают сочетание внешнего поступления загрязнителей и дыхательной нагрузки людей; слабо адаптируются к переменным режимам вентиляции и изменяющимся условиям ЧС; как правило, рассматривают изолированные сценарии, без комплексного анализа; практически не интегрируются в автоматизированные системы мониторинга и управления; не дают достоверных прогнозов предельного времени безопасного пребывания при комплексном воздействии факторов.

Таким образом, существующие модели полезны для локальных задач проектирования или оценки микроклимата, но оказываются недостаточными для прогнозирования в условиях ГО и ЧС, где требуется комплексный и адаптивный подход, объединяющий аналитические расчёты и экспериментальные данные.

Цель исследования. Обосновать метод прогнозирования концентраций ОВ, O_2 и CO_2 в ограниченных воздушных объёмах для определения допустимого времени пребывания укрываемых лиц, формирования управленческих решений по режимам вентиляции и регенерации воздуха, а также для построения прогностических моделей в условиях дефицита исходных данных.

Материалы и результаты исследований. При построении уравнений материального баланса были приняты следующие допущения: идеальное перемешивание газов; пренебрежение инерционностью вентиляции; отсутствие химических реакций и сорбции; температура, давление и влажность воздуха внутри помещения постоянны и не влияют на массу, объём или диффузионные свойства газов; линейность процесса дыхания, т. е. расход O_2 и выделение CO_2 человеком приняты постоянными во времени и одинаковыми для всех укрываемых лиц; фильтрация с постоянной эффективностью; герметичность помещения; непрерывное и с постоянным расходом поступление ОВ; отсутствие отложенного (инерционного) выделения ОВ.

¹ Указ Президента РФ от 20.12.2016 № 696

² СП 88.13330.2022

Аналитическое моделирование концентраций опасных веществ при различных сценариях поступления и режимах вентиляции

Аналитические выражения для расчёта критического времени достижения ПДК или НКПР при различных сценариях поступления ОВ (без вентиляции, с вентиляцией, через вентиляцию и с фильтровентиляцией) представлены в табл. 1. Они позволяют оценить динамику загрязнения и рассчитать предельное время безопасного пребывания людей в помещении.

В отличие от типовых экспоненциальных моделей, предлагаемый подход учитывает специфические сценарии ГО и обладает модульной структурой, что обеспечивает возможность гибкого применения отдельных компонентов модели в зависимости от имеющихся исходных данных.

Моделирование дыхательной нагрузки (кислород и углекислый газ)

В условиях ограниченного объёма воздуха снижение концентрации O_2 и накопление CO_2 становятся лимитирующими параметрами, определяющими предельное время пребывания укрываемых лиц. Поэтому второй блок метода посвящён построению аналитических зависимостей, описывающих изменение содержания O_2 и CO_2 в зависимости от числа укрываемых лиц, объёма помещения и режима вентиляции. Эти зависимости представлены в табл. 2 и позволяют оценить критическое время достижения минимально допустимой концентрации O_2 или максимально допустимой концентрации CO_2 .

Прогноз изменения концентрации опасных веществ на основе дискретных измерений

Данные, получаемые при дискретном контроле параметров воздушной среды ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$), образуют временной ряд, который позволяет оценивать тенденцию изменения концентраций, но не фиксирует момент достижения критического уровня $C_{кр}$. Пороговое значение может быть превышено в интервале между измерениями и остаться незарегистрированным. Для устранения этого недостатка предложено использовать метод конечных разностей. По двум соседним точкам вычисляется приращение $\Delta C/\tau$ (τ – интервал времени между измерениями), на основе которого строится аппроксимирующая прямая. Точка её пересечения с линией $C(t) = C_{кр}$ принимается за прогнозное время достижения критической концентрации T_p (рис. 1).

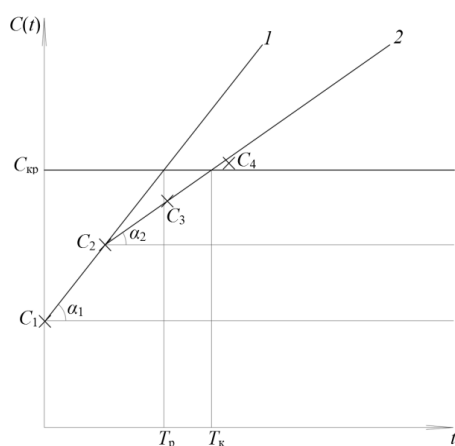


Рис. 1. К расчёту времени достижения $C_{крит}$

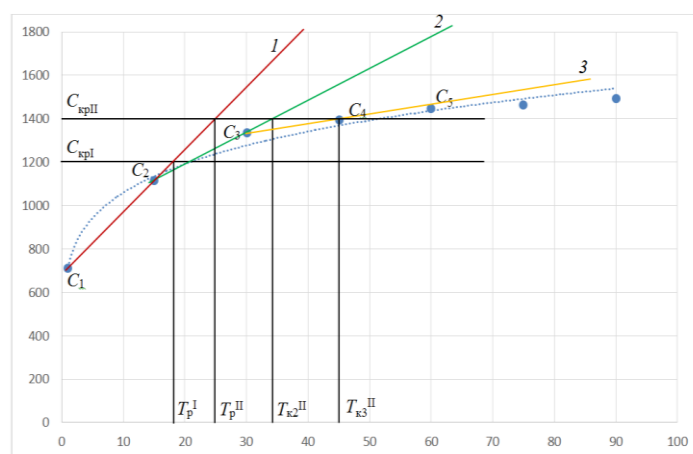


Рис. 2. Изменение концентрации CO_2 в учебной аудитории

Таблица 1
Критическое время $t_{\text{крит}}$ достижения ПДК или НКПР в зависимости от сценария поступления ОВ в замкнутое помещение

Помещение		Путь поступления ОВ	
Герметичное	С вентиляцией	Через вентиляцию	При фильтровентиляции
$\frac{dC}{dt} = \frac{m}{V}$	$\frac{dC}{dt} = \frac{m}{V} - \frac{\nu}{V} C$	$\frac{dC}{dt} = \frac{\nu}{V} (C_{\text{ОВ}} - C)$	$\frac{dC}{dt} = \frac{\nu}{V} ((1 - \eta) C_{\text{ОВ}} - C)$,
где $m = u C_{\text{ОВ}}$ – массовый (объёмный) расход поступающего ОВ, м³/ч; u – скорость поступления ОВ в помещение, м³/ч; $C_{\text{ОВ}}$ – концентрация поступающих ОВ, м³/м³; t – время, ч; V – объём помещения, м³; $C(t)$ – концентрация ОВ в воздухе в момент времени t, м³/м³; ν – расход вентиляции, м³/ч; $C_{\text{ПДК}}$ – концентрация ПДК, м³/м³; $t_{\text{крит}}$ – момент времени достижения ПДК или НКПР; η – доля вещества, задержанная фильтром (эффективность фильтрации).			
$C(t) = \frac{u C_{\text{ОВ}}}{V} t$	$C(t) = \frac{m}{V} \left(1 - e^{-\frac{\nu}{V} t} \right)$	$C(t) = C_{\text{ОВ}} \left(1 - e^{-\frac{\nu}{V} t} \right)$	$C(t) = (1 - \eta) C_{\text{ОВ}} \left(1 - e^{-\frac{\nu}{V} t} \right)$
$t_{\text{крит}} = \frac{V C_{\text{ПДК}}}{u C_{\text{ОВ}}}$	$t_{\text{крит}} = -\frac{V}{\nu} \ln \left(1 - \frac{\nu C_{\text{ПДК}}}{m} \right)$	$t_{\text{крит}} = -\frac{V}{\nu} \ln \left(1 - \frac{C_{\text{ПДК}}}{C_{\text{ОВ}}} \right)$	$t_{\text{крит}} = -\frac{V}{\nu} \ln \left(1 - \frac{C_{\text{ПДК}}}{(1 - \eta) C_{\text{ОВ}}} \right)$

Таблица 2

Результаты моделирования дыхательной нагрузки (O₂ и CO₂) в замкнутых помещениях

Наименование	O ₂	CO ₂
Материальный баланс без вентиляции	$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -\frac{(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}})\mu N}{V}$,	$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = -\frac{(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}})\mu N}{V}$,
	где C – концентрация O ₂ или CO ₂ , мг/м ³ ; μ – объём воздуха, потребляемый одним человеком в час, м ³ /ч; N – количество укрываемых; $C_{O_{2атм}}$, $C_{CO_{2атм}}$ – концентрации O ₂ и CO ₂ в атмосферном воздухе; $C_{O_{2выд}}$, $C_{CO_{2выд}}$ – концентрации O ₂ и CO ₂ в выдыхаемом воздухе; за один час человек потребляет из воздуха $\mu(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}})$ м ³ O ₂ и выдыхает $\mu(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}})$ м ³ CO ₂ .	
Модель изменения концентрации	$C_{O_2}(t) = C_{O_{2атм}} - \frac{(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}})\mu N t}{V}$	$C_{CO_2} = C_{CO_{2атм}} + \frac{(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}})\mu N t}{V}$
Критическое время $t_{\text{крит}}$ (по ПДК)	$t_{\text{крит}} = \frac{C_{O_{2атм}} - C_{O_{2пдк}}}{C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}}} \frac{V}{\mu N}$	$t_{\text{крит}} = \frac{C_{CO_{2пдк}} - C_{CO_{2атм}}}{C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}}} \frac{V}{\mu N}$
Материальный баланс с вентиляцией	$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -\frac{\mu N}{V}(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}}) + \frac{v}{V}(C_{O_{2атм}} - C_{O_2})$	$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = -\frac{\mu N}{V}(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}}) - \frac{v}{V}(C_{CO_2} - C_{CO_{2атм}})$
Модель изменения концентрации	$C_{O_2}(t) = C_{O_{2атм}} - \left(\frac{\mu N}{v}\right)(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}})(1 - e^{-\frac{v}{V}t})$	$C_{CO_2}(t) = C_{CO_{2атм}} + \left(\frac{\mu N}{v}\right)(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}})(1 - e^{-\frac{v}{V}t})$
Критическое время $t_{\text{крит}}$ (по ПДК)	$t_{\text{крит}} = -\frac{V}{v} \ln \left(1 - \frac{C_{O_{2атм}} - C_{O_{2пдк}}}{\frac{\mu N}{v}(C_{O_{2атм}} - C_{O_{2выд}})}\right)$	$t_{\text{крит}} = -\frac{V}{v} \ln \left(1 - \frac{C_{CO_{2пдк}} - C_{CO_{2атм}}}{\frac{\mu N}{v}(C_{CO_{2выд}} - C_{CO_{2атм}})}\right)$

Проведена апробация метода на примере накопления CO_2 в учебной аудитории ($\tau = 15$ мин, прибор «Мегакон 10К») (рис. 2). При критических уровнях 1200 и 1400 мг/м^3 расчётные оценки времени достижения составили 18 и 25 мин. По мере поступления новых данных проведена корректировка времени достижения второго критического уровня 45 мин. Фактические значения – 20 и 51 мин, что подтверждает работоспособность метода и наличие запаса времени для реагирования.

Интеграция в интеллектуальные системы

С учётом необходимости повышения оперативности принятия решений при угрозе техногенных ЧС, связанных с выбросом и накоплением ОВ в замкнутых объёмах, особую актуальность приобретает интеграция прогностических алгоритмов в состав ИИС [5, 6]. Такие системы должны обеспечивать автоматическое выявление критических тенденций на ранней стадии развития аварийной обстановки и выдачу предупредительных сигналов с опережением фактического наступления опасных состояний.

Разработан алгоритм функционирования ИИС мониторинга, основанный на методе дискретного прогнозирования. Алгоритм позволяет оценить момент достижения трёх последовательно нарастающих критических значений параметра опасности $C_{\text{крI}}$, $C_{\text{крII}}$ и $C_{\text{крIII}}$, соответствующих уровням реагирования «Предупреждения» (по $T_{\text{кI}}$), «Тревога» (по $T_{\text{кII}}$) и «Опасность» (по $T_{\text{кIII}}$) (рис. 3).

Архитектура схемы включает следующие функциональные блоки: модуль сбора и первичной обработки данных от сенсорных устройств, блок расчёта производных и аппроксимации по методу конечных разностей, модуль прогнозирования времени достижения критических значений параметров, а также блок логического анализа и генерации управляющих сигналов.

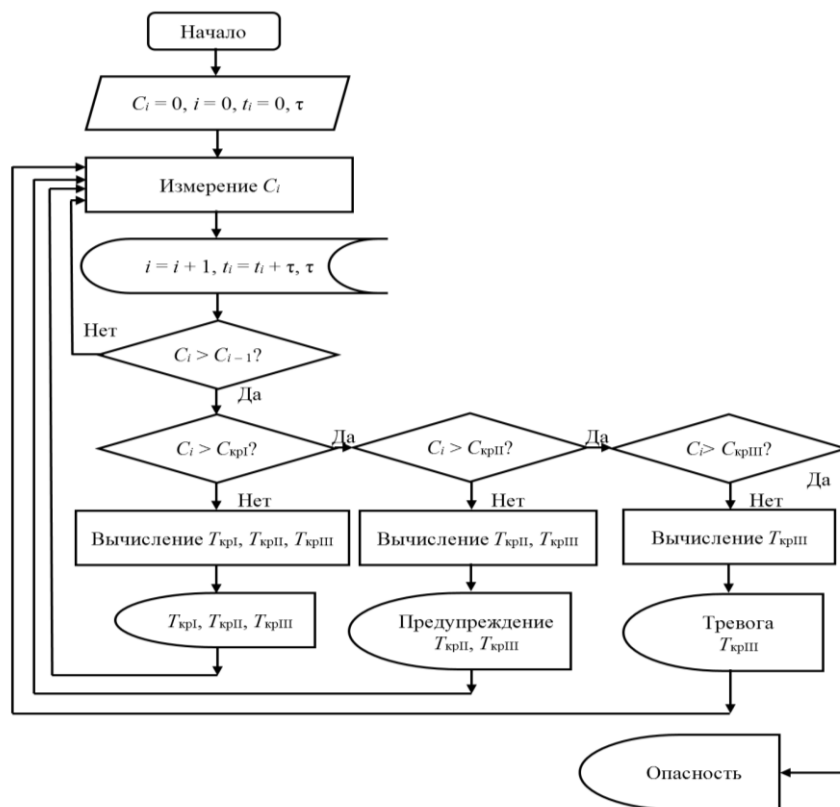
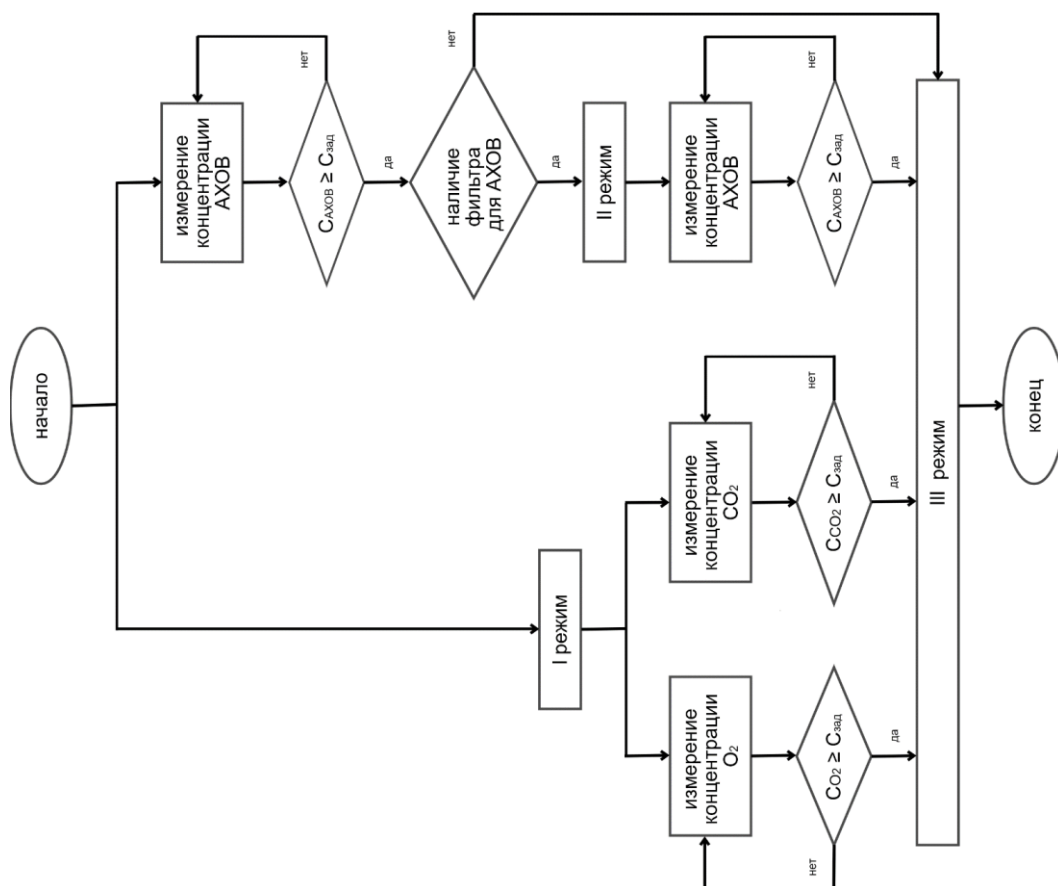
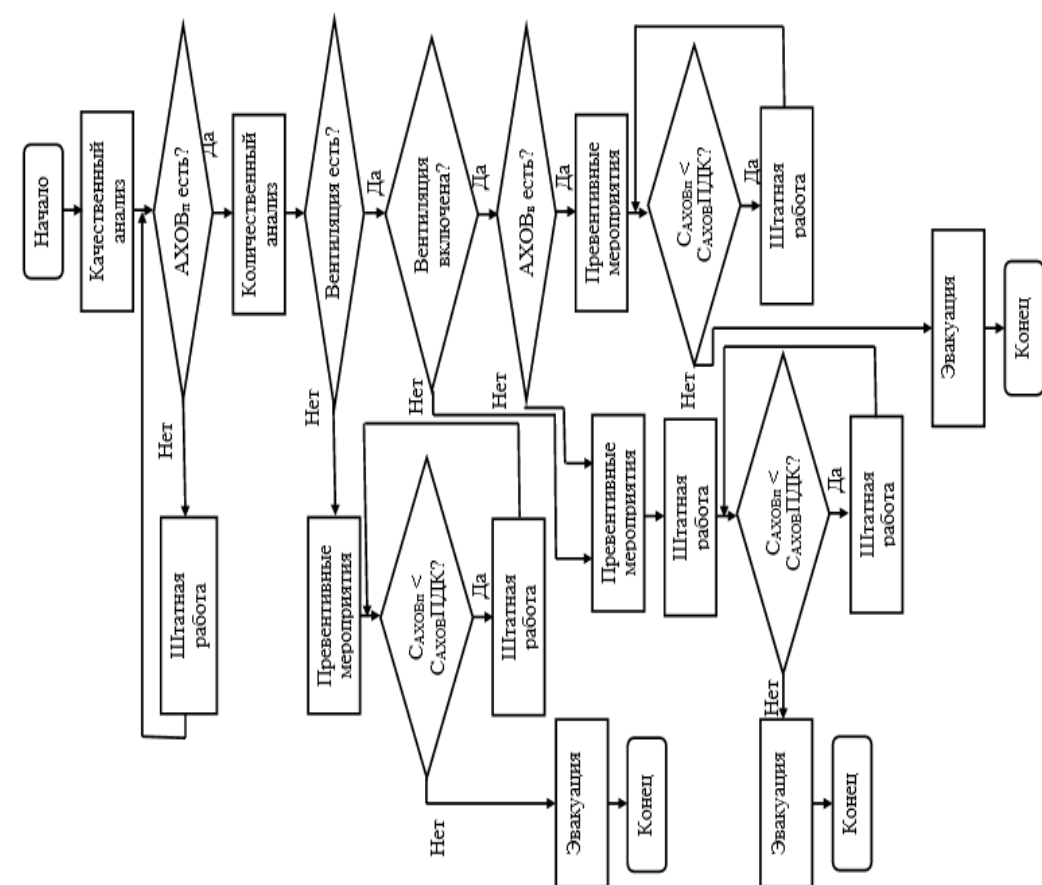


Рис. 3. Блок-схема алгоритма функционирования ИИС прогнозирования достижения трёх заданных порогов опасности



Особенностью предложенной архитектуры является возможность непрерывной адаптации к текущим условиям за счёт постоянно поступающей информации о состоянии воздушной среды. Такая интеграция метода прогнозирования в состав ИИС позволяет реализовать адаптивный мониторинг состояния воздушной среды в режиме реального времени. Это существенно повышает эффективность обнаружения потенциальных угроз и минимизирует время реагирования, особенно в условиях быстро нарастающей опасности.

Ограниченная продолжительность действия регенерационных патронов (не более 6 ч) при расчётном времени пребывания в защитных сооружениях ГО до 48 ч требует строгого и научно обоснованного подхода к управлению режимами вентиляции³.

Текущая практика контроля воздушной среды внутри защитных сооружений основана на периодическом анализе, выполняемом разведывательными звеньями⁴. Однако такой подход не обеспечивает необходимой оперативности и может привести к запаздыванию принятия решения о переключении вентиляционных режимов. Это подчёркивает актуальность внедрения автоматизированных систем непрерывного анализа атмосферы укрытия.

Непрерывный мониторинг содержания O_2 , CO_2 и ОВ позволяет в реальном времени определять момент достижения опасных концентраций и заблаговременно инициировать переход на I, II или III режим³. Это обеспечивает оптимальное расходование ресурсов системы жизнеобеспечения, повышает безопасность укрываемых лиц и продлевает допустимое время их пребывания в убежище.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма функционирования системы защиты людей в помещении, а на рис. 5 – обобщённая схема работы автоматизированной системы вентиляции, основанная на прогнозируемых значениях загрязнителей.

Выводы. Разработан аналитико-экспериментальный метод оценки предельного времени безопасного пребывания людей в замкнутых и вентилируемых помещениях при загрязнении воздушной среды. Метод включает четыре взаимосвязанных блока, которые могут применяться как совместно, так и автономно: 1) аналитическое моделирование концентраций ОВ; 2) моделирование дыхательной нагрузки укрываемых; 3) прогноз по результатам дискретных измерений; 4) интеграция в информационно-измерительную систему.

Несмотря на наличие известных моделей распространения ОВ в замкнутых объёмах, предложенные модели обладают рядом принципиальных особенностей, обеспечивающих их прикладную ценность.

Многообразие сценариев поступления ОВ. В отличие от традиционных моделей, ориентированных на одну фиксированную схему (например, мгновенный выброс в невентилируемом помещении), разработанные модели охватывают четыре различных режима загрязнения. Это позволяет использовать метод в реальных ситуациях, включая аварии в инженерных сооружениях, защитных сооружениях ГО, метрополитена, террористические атаки и др.

³ СП 88.13330.2022

⁴ Приказ МЧС России от 15.12.2002 № 583

Учёт кислородного и углекислотного баланса укрываемых. В отличие от большинства моделей, сосредоточенных только на ОВ, разработаны модели для оценки времени безопасного дыхания с учётом расхода O_2 и накопления CO_2 , зависящих от числа укрываемых лиц и объёма помещения. Это делает метод особенно актуальным для ГО, укрытий, где вентиляция не предусмотрена, и подземных сооружений.

Аналитическая решаемость и адаптивность. Предложены аналитически решаемые модели на основе уравнений материального баланса. Это делает метод пригодным для реализации в простых программно-аппаратных средствах, в том числе мобильных. Каждый расчётный блок работает автономно и может применяться отдельно, в зависимости от наличия данных и требований к точности прогноза.

Прогноз по результатам дискретных измерений. Впервые предложен аппроксимирующий подход, позволяющий прогнозировать момент достижения критической концентрации на основе массива результатов измерений. Это обеспечивает применение метода в ситуациях, когда отсутствует полный профиль загрязнения и измерения проводят с интервалами. Метод апробирован в реальных условиях, и прогнозы концентраций CO_2 согласуются с экспериментальными данными.

Интеграция в ИИС мониторинга. В отличие от «чисто расчётных» моделей предложенные решения связаны с алгоритмами ИИС и автоматическим формированием сигналов реагирования, что делает их пригодными для интеграции в современные комплексы раннего оповещения и инженерной защиты.

Список литературы / References

1. Стефанов, Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – Минск: Белые страницы, 2014. – 360 с.
Stefanov, E. V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh*. Minsk, Belye stranitsy Publ., 2014, p. 360. (In Russian)
2. Pitchurov, G., Fantke, P., Markov, D., Jolliet, O. Modelling indoor pollutant exposure from steady state and pulse sources. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2024: vol. 1380, no. 1:012014. – URL <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1380/1/012014> (accessed 01.07.2025). (In English)
3. AENOR. Calidad ambiental en interiores. Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior (UNE 171330-1:2008). – Madrid: AENOR, 2008. – URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0041499> (accessed: 01.07.2025). (In English)
4. Эльтерман, В. М. Вентиляция химических производств. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
Elterman, V. M. *Ventilyatsiya khimicheskikh proizvodstv*. Moscow, Khimiya Publ., 1980, p. 288. (In Russian)
5. Октябрьский, Р. Д. Риски нарушения микроклимата в защитных сооружениях // Проблемы анализа риска. – 2020. – Т. 17, № 5. – С. 26–33.
Oktyabrskiy, R. D. [Risks of violation of the microclimate in protective structures (shelters)]. *Issues of Risk Analysis*; 2020, no. 17 (5), pp. 26-33 (In Russian)
6. Латышенко, К. П., Малинин, Р. С., Гарелина, С. А., Глушаченков, А. А. Алгоритм функционирования системы контроля при прогнозировании развития ЧС, обусловленных выбросом и распространением опасных веществ в замкнутом пространстве // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 1. – С. 17–24. (In Russian)

Latyshenko, K. P., Garelina, S. A., Malinin, R. S., Glushachenkov, A. A. [Algorithm for the functions of the control system in predicting the development of emergencies caused by the release and spread of hazardous substances in enclosed spaces]. *Scientific and educational problems of civil protection*; 2020, no. 1 (44), pp. 17-24. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 27.08.2025

Svetlana Aleksandrovna Garelina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;
e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Konstantin Pavlovich Latyshenko, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department;
e-mail: kplat@mail.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: 8(498)699-05-59

MODULAR ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL METHOD FOR FORECASTING AIR POLLUTION IN ENCLOSED SPACES

Objective. To substantiate a method for predicting the concentrations of hazardous substances, oxygen, and carbon dioxide in confined air volumes in order to determine the permissible time of human occupancy, to support decision-making on ventilation modes and air regeneration, as well as to build predictive models under conditions of limited initial data.

Methods. The approach is based on the analytical solution of material balance equations combined with data from instrumental measurements of atmospheric parameters, which ensures both theoretical validity and practical applicability.

Results. A modular analytical-experimental method has been developed, comprising four interrelated components: analytical modeling of hazardous substance concentrations under various intake and ventilation scenarios; modeling of respiratory load, accounting for oxygen consumption and carbon dioxide accumulation; forecasting of critical threshold exceedance based on discrete measurement data; integration into an information–measurement system for automated alert generation.

Scientific novelty. The research novelty lies in the comprehensive consideration of external contamination and respiratory load, the unification of pollutant intake scenarios, the use of discrete data approximation for forecasting under incomplete information, and the preservation of analytical solvability of the models. For the first time, the method enables integration of forecasts into information–measurement systems with automated alert generation.

Practical value. The method provides adaptive control of ventilation regimes, extends the safe occupancy time, and enhances the level of protection for sheltered individuals. It can be applied in the design and operation of shelters, bunkers, underground facilities, and industrial sites, ensuring justified ventilation regimes, timely evacuation decisions, and the application of air regeneration systems.

Keywords: *civil defense shelters; mathematical modeling; concentration; oxygen; carbon dioxide; hazardous substances; occupancy time; ventilation system; maximum permissible concentration; ventilation regime.*

For citation: Garelina S. A., Latyshenko K. P. Modular analytical and experimental method for forecasting air pollution in enclosed spaces. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 3 (62), pp. 97-106. EDN RQLFYK

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, № 3 (62)

На русском языке

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

Издатель: Министерство Российской Федерации по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных
бедствий (г. Москва, ул. Ватутина, 1); Федеральное государственное
казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор»
МЧС России» (г. Донецк, ул. Артема, 157)

Ответственный редактор Л. В. Барзий

Редактор О. К. Межова

Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность за использование
сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано в печать 15.09.2025. Дата выхода в свет 19.09.2025.
Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать лазерная.
Усл. печ. л. 12,9. Тираж 20 экз. Заказ № 7. Распространяется бесплатно.

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: <https://niirespirator.organizations.mchs.gov.ru/vestnik>