



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 2 (63)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – 111 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: 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 Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) (дата регистрации СМИ: 13.04.2026). Регистрационный номер СМИ: Серия ПИ № ФС77-91242.

Подписано к печати 15.06.2026 по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 4 от 28.05.2026).

Дата выхода в свет 19.06.2026.

Распространяется бесплатно.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NII «RESPIRATOR»

No. 2 (63)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NII «Respirator». – 2026. – No. 2 (63). – 111 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: 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 with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor) (Media registration date: 13.04.2026). Media registration number: Series ПИ No. ФС77-91242.

Approved for printing 15.06.2026 according to the reference of the Academic council of FSI «NII «Respirator» EMERCOM of Russia» (Protocol No. 4 dated 28.05.2026).

Release date: 19.06.2026.

Distributed free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Пожарная безопасность

**Кирьян А. П., Пештибай Г. И.,
Галухин Н. А.**
Потери давления при движении
компрессионной пены в рукавной линии
с учетом температуры окружающей среды

Сытдыков М. Р.
Многокритериальный подход к оценке
эффективности пожарной техники как
сложной технической системы

**Заятдинов Д. Ф., Ермакова И. А.,
Тациенко В. П., Киренберг Е. А.**
Зависимость константы скорости сорбции
кислорода углем от свойств угля

**Агарков Ал. В., Ефименко В. Л.,
Евтеев Д. С., Чован А. Н.**
Эмпирические исследования процессов
тепломассопереноса в горной выработке
при пожаре

II. Безопасность труда

**Агеев В. Г., Лебедева В. В.,
Храпоненко О. В., Щербаклова О. Н.**
Оценка влияния пластифицирующей
добавки на свойства материала шахтных
взрывоустойчивых перемычек

**Фомин А. И., Копытов А. И.,
Михайлов В. Г., Рафиков Р. Р.**
Повышение безопасности производства
через позиционирование и мониторинг
параметров организма персонала

**Ашихмин В. Д., Тишин Р. А.,
Мавроди А. В., Тишина С. Р.**
Эффективность дегазации
неразгруженных угольных пластов
после нагнетания жидкости

TABLE OF CONTENTS

I. Fire safety

**Kiryan A. P., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A.**
7 Pressure loss during the movement
of compression foam in a hose line, taking
into account the ambient temperature

Sytdykov M. R.
15 A multi-criteria approach to evaluating the
effectiveness of fire fighting equipment as
a complex technical system

**Zayatdinov D. F., Ermakova I. A.,
Tatsienko V. P., Kirenberg, E. A.**
26 Dependence of the oxygen sorption rate
constant on the properties of coal

**Agarkov Al. V., Efimenko V. L.,
Evteev D. S., Chovan A. N.**
33 Empirical studies of heat and mass
transfer processes in a mine working
during a fire

II. Occupational safety

**Ageev V. G., Lebedeva V. V.,
Khraponenko O. V., Shcherbakova O. N.**
44 Assessment of the impact of a plasticizing
additive on the properties of a material
for mine explosion-proof crosscuts

**Fomin A. I., Kopytov A. I.,
Mikhailov V. G., Rafikov R. R.**
51 Improving production safety
through body positioning
and monitoring

**Ashikhmin V. D., Tishin R. A.,
Mavrodi A. V., Tishina S. R.**
58 Effectiveness of degasation
of unloaded coal seams after liquid
injection

**Александрова А. В., Пушин Д. А.,
Панкратов Н. С., Левчук А. А.**

Анализ функционирования системы
управления производственной
безопасностью на предприятии,
выполняющем аварийно-
восстановительные работы

**Aleksandrova A. V., Pushchin D. A.,
Pankratov N. S., Levchuk A. A.**

68 Analysis of the functioning
of the industrial safety management
system at an enterprise performing
emergency recovery work

**Порческо А. А., Чукарин А. Н.,
Финоченко Т. А.**

Эффективность использования упругих
пневмоэлементов в качестве
виброизоляторов

**Porcesco A. A., Chukarin A. N.,
Finochenko T. A.**

78 Efficiency of using elastic pneumatic
elements as vibration isolators

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

**Мамаев В. В., Лебедева В. В.,
Храпоненко О. В., Добровольскене А. А.**

Оценка сорбционной способности
природных материалов

**Mamaev V. V., Lebedeva V. V.,
Khraponenko O. V., Dobrovolskene A. A.**

86 Assessment of sorption capacity
of natural materials

**Копец Ю. В., Малкин В. Ю.,
Рыбаков А. В.**

Физико-химическое моделирование
генерации опасных факторов при
пиролизе твердых коммунальных отходов
для прогнозирования условий труда

**Kopets Iu. V., Malkin V. Yu.,
Rybakov A. V.**

92 Physico-chemical modeling of hazard
generation during pyrolysis of municipal
solid waste to predict working conditions

**Кузьмин А. В., Кондратьев А. А.,
Иванов Е. В.**

Обоснование рационального объема
мероприятий по повышению
защищенности территории от пожаров

**Kuzmin A. V., Kondratiev A. A.,
Ivanov E. V.**

98 Justifying the rational scope of measures
to increase the protection of territory
against fires

Публикационная этика

108

**Правила оформления
авторских рукописей**

110

I. Пожарная безопасность

УДК [614.844.5:532.55]:001.891.572

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

Георгий Иванович Пефтибай, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru

Николай Александрович Галухин, ст. науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-36

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ В РУКАВНОЙ ЛИНИИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Цель. Обоснование пенной структуры потока и наибольшей длины рукавной линии с учетом влияния потерь давления и температуры окружающей среды.

Методы. Методы термодинамики газовых процессов с использованием объединенного закона газового состояния, гидравлические методы определения потерь давления, методы расчета режимов течения газожидкостных смесей в рукавной линии.

Результаты. Определены потери давления при движении компрессионной пены в рукавной линии с учетом влияния температуры окружающей среды. Полученные результаты позволяют определить структуру газоводяного потока и максимальную длину рукавной линии, при которой обеспечивается одновременно номинальный режим работы пожарного ствола и пенная структура газоводяной смеси.

Научная новизна. Предложена математическая модель потери давления при движении компрессионной пены в рукавной линии, отличающаяся тем, что: объемное газонасыщение потока получено с учетом выполнения закона Клапейрона, рассматривается как функция двух переменных – температуры и давления, изменяющаяся по длине рукавной линии; потери давления определены как интегральная сумма удельных потерь давления на элементарных участках рукавной линии.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют обосновать максимальную длину рукавной линии и структуру газоводяной смеси, а при ее отклонении произвести корректировку, например, используя газонасыщение.

Ключевые слова: компрессионная пена, потери давления, газонасыщение, форма движения, температура окружающей среды.

Для цитирования: Кирьян А. П., Пефтибай Г. И., Галухин Н. А. Потери давления при движении компрессионной пены в рукавной линии с учетом температуры окружающей среды // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 7–14. – EDN WXYIWQ

Постановка проблемы. Компрессионной пене присущи высокие пожаротушающие свойства, основные из которых:

- снижение расхода пенообразователя и воды;
- сокращение времени тушения пожара;
- повышенная адгезионная способность;
- возможность тушения пожаров в высотных зданиях (до 100 м);
- повышенная транспортирующая способность по пожарным рукавам;
- увеличение дальности подачи струи;
- полное отсутствие свободной жидкой фазы в пене.

Очевидные преимущества компрессионной пены по сравнению с традиционной, получаемой эжекционно-сеточным способом, обуславливают актуальность исследований, направленных на совершенствование методов определения потерь

давления в рукавной линии. Расширение области применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров в различных климатических зонах с температурным диапазоном от -30°C до $+70^{\circ}\text{C}$ требует учета влияния температуры внешней среды на параметры компрессионной пены, что позволит обосновать наличие или отсутствие пенной структуры течения газовой смеси и наибольшую длину рукавной линии. Существующие методы расчета потерь давления при течении компрессионной пены в рукавной линии ограничиваются рассмотрением изотермического состояния газа (воздуха) по всей ее длине, то есть не учитывают влияние температурных колебаний климатической зоны на параметры пенного потока.

Цель работы. Обоснование пенной структуры потока и наибольшей длины рукавной линии с учетом влияния потерь давления и температуры окружающей среды.

Анализ последних исследований. В последнее время значительно вырос научный и практический интерес к тушению пожаров компрессионной пеной [1–5], получаемой путем подачи сжатого воздуха в водный раствор пенообразователя. В первую очередь это обусловлено существенными преимуществами компрессионной пены низкой кратности [5–8]: высокой адгезией, даже к отрицательно наклоненным поверхностям, снижением ее удельного расхода и времени тушения, повышением дальности подачи, полному отсутствию свободной воды в пене.

В работе [2] приведены результаты сравнительных испытаний эффективности тушения условного очага пожара воздушно-пенным стволом СВП-2 и стволами, подающими компрессионную пену. Установлено, что эффективность тушения пожара класса А по параметрам время тушения, количество использованного пенообразователя сокращается более чем в два раза при тушении пожара компрессионной пеной по сравнению с тушением пожара воздушно-механической пеной. Также экспериментально подтверждена возможность подачи сухой компрессионной пены на 32-й этаж (100 м) для тушения пожара в высотных зданиях. Экспериментальные исследования дальности подачи струи компрессионной пены показали [4], что её дальность зависит не только от угла наклона ствола, но и от кратности пены. Наибольшая дальность подачи обеспечивается струей мокрой компрессионной пены, истекающей из пожарного ствола, установленного под углом 10° .

В работе [9] выполнено экономическое обоснование тушения условного очага пожара компрессионной пеной. Показано, что экономические затраты по расходу пенообразователя более, чем в два раза меньше по сравнению с тушением пожара воздушно-механической пеной средней кратности.

В публикации [10] приведена математическая модель процесса получения компрессионной пены, однако отсутствует расчетная схема пеногенератора и идентификация его геометрических параметров, принятых для обозначения. На основании ограниченной информации и выражения для градиента давления нами сделан вывод о допущении изотермического газового процесса при выводе формулы, то есть температура окружающей среды постоянная и не влияет на градиент давления.

В работах [11–13] решена задача определения потерь давления на горизонтальных участках рукавной линии, заполненной движущейся компрессионной пеной. Показано, что особенности движения пенного потока в рукавной линии существенно отличаются от классического движения жидкости и для расчета потерь давления

не могут быть применены известные методы расчета. В исследованиях отмечена существенная роль газосодержания в возникновении гидравлического сопротивления при движении компрессионной пены по рукавной линии. Экспериментальными исследованиями установлено экспоненциальное влияние газосодержания на удельные потери давления, получено выражение для определения потерь давления. Однако данные исследования не рассматривают влияние температуры окружающей среды (положительной или отрицательной) на газонасыщение. Кроме того, принято по умолчанию, что газонасыщение определяют по закону Бойля-Мариотта для одной точки рукавной линии – на входе в рукавную линию (то есть при одном давлении). Авторы исследования приняли допущение, что газонасыщение – константа, вычисленная при давлении входа в рукавную линию и при температуре пены, совпадающей с температурой окружающей среды. Очевидно, что давление в рукавной линии (по длине) не постоянно, а уменьшается, и газонасыщение должно возрасти. В условиях действия низких температур движущаяся пена охлаждается, а газонасыщение уменьшается, а в условиях жаркого климата стенки рукавной линии нагреваются, что приводит к увеличению газосодержания пены. Следовательно, газосодержание не константа, а функция двух наиболее существенных переменных – давления и температуры.

Учет влияния давления и температуры в рукавной линии позволит повысить уровень обоснованности расчетных значений предельной дальности подачи компрессионной пены и прогнозировать наличие необходимой формы движения компрессионной пены.

Результаты исследований. Дальность подачи компрессионной пены по рукавной линии существенно выше, чем воды при меньшей массе в два раза, что снижает нагрузку на ствольщика. Наибольшая дальность подачи компрессионной пены определяется потерями на трение компрессионной пены. Основным фактором, влияющим на потери давления при транспортировании газоводяных смесей, является газонасыщение φ , которое для практических расчетов определяют по формуле

$$\varphi = \frac{V_g}{V_g + V_w}, \quad (1)$$

где V_g , V_w – объем газа и воды в смеси, соответственно, м^3 ;

Величину φ называют объемным газонасыщением и для текущей среды может быть представлена в виде

$$\varphi = \frac{Q_g}{Q_g + Q_w}, \quad (2)$$

где Q_g , Q_w – объемные расходы газа и воды соответственно, $\text{м}^3/\text{с}$.

Условием применения формул объемного газонасыщения (1) и (2) является постоянство φ во всем объеме Q_g рукавной линии, т. е. указанные формулы справедливы для элемента ее длины (элемента объема).

Газонасыщение не постоянно по длине рукавной линии, его значение зависит от изменения газовых макропараметров (P , T , Q). Действительно, давление в рукавной линии снижается из-за потерь на трение, что вызывает уменьшение плотности газа и увеличение объемного расхода Q_g . Другим фактором, влияющим на φ , является изменение температуры движущейся компрессионной пены в результате воздействия отрицательных или положительных температур окружающей

среды. Очевидно, что нагрев компрессионной пены вызывает повышение газонасыщения, а охлаждение – уменьшение газонасыщения. В таких случаях нельзя идентифицировать газовые процессы внутри рукавной линии как изотермические и применять к нахождению объемного расхода газа уравнение Бойля-Мариотта. Следовательно, изменение газонасыщения в рукавной линии нельзя отнести ни к одному из известных изопроцессов. Однако, в любом случае выполняется уравнение состояния идеального газа, приводящее к уравнению Клапейрона

$$\frac{P_a Q_a}{T_a} = \frac{P Q_z}{T}, \quad (3)$$

где P_a – атмосферное давление, Па;

Q_a – объемный расход газа при давлении P_a , м³/с;

T_a, T – температура газа при давлении P_a и при давлении P , соответственно, К.

Из уравнения (3) находим

$$Q_z = \frac{T}{T_a} \frac{P_a}{P} Q_a. \quad (4)$$

Подставляя Q_z из выражения (4) в формулу (2), получаем зависимость

$$\varphi(P, T) = \frac{P_a T Q_a}{P_a T Q_a + P T_a Q_a}. \quad (5)$$

Отличие полученной зависимости для газонасыщения от известных выражений состоит в том, что $\varphi(P, T)$ рассматривается не как точечное числовое значение (например, на входе рукавной линии [12]), а как изменяющаяся функция двух параметров (P, T). Примем выражение для потерь удельного давления $\Delta P_{y\partial}$, Па/м, в рукавной линии без учета влияния давления и температуры [12, 13] за исходное

$$\Delta P_{y\partial} = \frac{8\rho_6 Q_6^2}{\pi^2 d^5} (18 \cdot 10^{-6} e^{12\varphi} + 0,032) \quad , \quad (6)$$

где ρ_6 – плотность воды, кг/м³;

Q_6 – объемный расход воды, м³/с;

d – диаметр рукавной линии, м.

Рассмотрим длину x рукавной линии как n элементарных равных отрезков бесконечно малой длины (рис.).

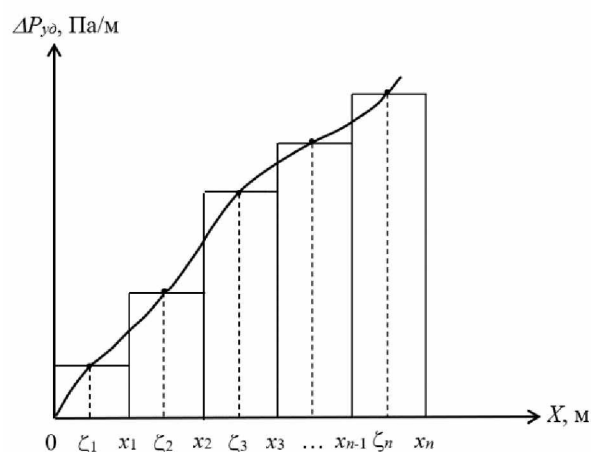


Рис. Графическая интерпретация определения потерь давления в рукавной линии

Пусть $x_1, x_2, \dots, x_n$ – точки разбиения, а $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ – срединные координаты отрезков. Ввиду влияния температуры и давления на газосодержание φ , формулу (6) и зависимость (5) применим для нахождения потерь давления на элементарном отрезке, а общие потери давления ΔP , Па, по длине рукавной линии определим с помощью интегральной суммы

$$\Delta P = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta P_{y\partial}(\zeta_i) \Delta x_i, \quad (7)$$

где Δx_i – длины элементарных отрезков разбиения оси OX , м.

В предельном значении выражение (7) представляет собой интеграл

$$\Delta P = \int_0^x \Delta P_{y\partial}(P, T) dx. \quad (8)$$

Представим

$$\Delta P = P_n - P, \quad (9)$$

где P_n – давление в начале рукавной линии (при $x = 0$), Па.

Тогда интеграл (8) запишем в виде

$$P_n - P = \int_0^x \Delta P_{y\partial}(P, T) dx. \quad (10)$$

Дифференцируя обе части уравнения (10), получим

$$-\frac{dP}{dx} = \Delta P_{y\partial}(P, T). \quad (11)$$

С учетом выражения (6) уравнение (11) запишем в виде

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{8\rho_b Q_b^2}{\pi^2 d^5} (18 \cdot 10^{-6} e^{12\varphi(P, T)} + 0,032). \quad (12)$$

Дополняя уравнение (12) выражением (5), а также ранее полученной [14] зависимостью температуры компрессионной пены от длины рукавной линии, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} -\frac{dP}{dx} = \frac{8\rho_b Q_b^2}{\pi^2 d^5} (18 \cdot 10^{-6} e^{12\varphi(P, T)} + 0,032) \\ \varphi(P, T) = \frac{P_a T Q_a}{P_a T Q_a + P T_a Q_b} \\ T = T_o + (T_n - T_o) \exp\left(-\frac{K_l}{c_p G_n} x\right) \end{cases}, \quad (13)$$

где T_o – температура окружающей среды, К;

T_n – температура компрессионной пены в начале рукавной линии, К;

K_l – линейный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м · К);

C_p – теплоемкость компрессионной пены, кг/с;

G_n – массовый расход компрессионной пены, кг/с.

Система уравнений (13) методом подстановок сводится к нелинейному дифференциальному уравнению, решение которого находят численным методом. В результате получаем функцию $P(x)$ давления в рукавной линии, а по уравнению (9) находим перепад давления ΔP на отрезке $[0, L]$, где L – длина рукавной линии, м.

Зная зависимость давления $P(x)$, можно определить максимальную длину рукавной линии L_{max} , при которой обеспечивается равенство

$$P(L_{max}) = P_{ном},$$

где $P_{ном}$ – номинальное давление перед пожарным стволом, Па.

Прогнозирование структуры движения газовой смеси можно осуществить на основе диаграмм Бейкера, Мандхэйма и др. [15]. Например, в диаграмме Бейкера интересующая нас пенная форма движения обозначена под номером 7. Для идентификации формы движения необходимо определить критерий Фруда и объемное газосодержание ϕ на конце (перед пожарным стволом) рукавной линии. Критерий (число) Фруда, F_r , определяют по формуле

$$F_r = \frac{v_c^2}{g d},$$

где $v_c = \frac{4(Q_g + Q_a)}{\pi d^2}$ – среднемассовая скорость смеси, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Используя число Фруда F_r и газонасыщение $\phi(5)$, вычисленные на максимальной длине L_{max} рукавной линии, определяют расчетным путем одну из семи возможных форму движения газовой смеси v . В случае, если форма движения смеси не соответствует пенной, производят ее корректировку путем изменения газонасыщения (например, изменением объемного расхода газа).

Выводы. Установлена зависимость давления и его потерь от температурных условий внешней среды при движении компрессионной пены в рукавной линии. Найденные зависимости могут быть использованы для определения максимальной длины рукавной линии в условиях низких и высоких температур, а также для прогнозирования пенной формы движения газовой смеси.

Список литературы / References

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

Kamlyuk, A. N., Grachulin, A. V. [Particularities of extinguishing by compressed air foam systems]. Journal of Civil Protection, 2018, no. 2 (2), pp. 168-175. (In Russian)

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

Kamlyuk, A. N., Navrotsky, O. D., Grachulin, A. V. [Fire extinguishing by compressed air foam systems]. Journal of Civil Protection, 2017, no. 1 (1), pp. 44-53. (In Russian)

3. Потеряев, Ю.К. Сравнение эффективности компрессионной пены и пены низкой кратности AFFF / Ю.К. Потеряев, А.В. Миронычев, А.М. Ощенко // Пожары и чрезвычайные ситуации : предупреждение, ликвидация. - 2023. - № 3. - С. 32-38.

Poteryaev, Yu. K., Mironychev, A. V., Oshchenkov, A. M. [Comparing efficiency of compressed air foam and AFFF low expansion foam]. Fire and emergencies: prevention, elimination, 2023, no. 3, pp. 32-38. (In Russian)

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

Skorupich, I. S., Grachulin, A. V., Shinkorenko, K. E. [Experimental investigation of compression foam jet supply]. Journal of Civil Protection, 2022, no. 2 (6), pp. 201-210. (In Russian)

5. Kim, A., Crampton, G. A new Compressed-Air-Foam Technology. Halon Options Technical Working Conference. 2-4 May, 2000, pp. 343-348. (In English)

6. Carey, W. M. National class A foam project report. Structural fire fighting-room burn tests phase II. National fire Protection Research Foundation. Quincy, Massachusetts, USA, 1994, 85 p. (In English)

7. Colletti, D. J. Class A foam for structure firefighting. Fire Engineering, 1992, vol. 145, no. 7, pp. 47-56. (In English)

8. Liebson, J. Introduction to class F foams and compressed air foam systems for the structural fire service. International Society of Fire Service Instructors, 1991, 45 p. (In English)

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

Belorozhev, O. N., Bagazhkov, I. V. *Effektivnost primeneniya kompressionnykh pen pri tushenii pozharov*. Fire safety: problems and prospects, 2016, no. 1 (7), vol. 1, pp. 305-307. (In Russian)

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

Sizinova, N. A. [Means of obtaining and prospects for using compression foam in fire extinguishing]. Siberian Fire and Rescue Bulletin, 2024, no. 3 (34), pp. 211-220. (In Russian)

11. Грачулин, А. В. Экспериментальные исследования движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале / А. В. Грачулин // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. - 2016. - № 1 (23). - С. 68-77.

Grachulin, A. V. [Experimental research of the motions of compressed air foam in horizontal cylindrical channel]. Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus, 2016, no. 1 (23), pp. 68-77. (In Russian)

12. Камлюк, А. Н. Методы применения компрессионной пены для тушения пожаров / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин // Техносферная безопасность. – 2018. – № 3 (20). – С. 3–14.

Kamluk, A. N., Grachulin, A. V. [Methods of application of compression foam for extinguishing fires]. Technosphere Safety, 2018, no. 3 (20), pp. 3-14. (In Russian)

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

Grachulin, A. V. *Metody primeneniya penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom dlya tusheniya pozharov* [Methods of application of compressed air foam systems for extinguishing fires : 05.26.03 «Fire and industrial safety (by branches)» speciality : Candidate of Technical Sciences dissertation / Alexander Vladimirovich Grachulin]. Minsk, 2017. 23 p. Place of thesis

defence: University of Civil protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. (In Russian)

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

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

15. Миркин, А. З. Трубопроводные системы. Расчет и автоматическое проектирование : справочник / А. З. Миркин, В. В. Усиныш. - М. : Химия, 1991. - 256 с.

Mirkin, A. Z., Usinysh, V. V. *Truboprovodnyye sistemy. Raschet i avtomaticheskoye proyektirovaniye* [Pipeline systems. Calculation and automatic design: reference book]. Moscow, Chemistry Publ., 1991, 256 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 17.03.2026

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

Andrey Petrovich Kiryan, Cand. of Tech. Sci., Head of the Institute; e-mail: kiryan@80.mchs.gov.ru

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

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, Senior Researcher; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru

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

283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-36

PRESSURE LOSS DURING THE MOVEMENT OF COMPRESSION FOAM IN A HOSE LINE, TAKING INTO ACCOUNT THE AMBIENT TEMPERATURE

Objective. Justification of the foam structure of the flow and the maximum length of the hose line, taking into account the influence of pressure losses and ambient temperature.

Methods. Methods of thermodynamics of gas processes using the unified law of the gas state, hydraulic methods for determining pressure losses, methods for calculating flow regimes of gas-liquid mixtures in a hose line.

Results. Pressure losses during the movement of compression foam in a hose line were determined, taking into account the influence of ambient temperature. The obtained results allow us to determine the structure of the gas-water flow and the maximum hose line length that simultaneously ensures the nominal operating mode of the fire nozzle and the foam structure of the gas-water mixture.

Scientific novelty. A mathematical model of pressure loss during the movement of compression foam in a hose line is proposed, characterized in that:

- the volumetric gas saturation of the flow is obtained taking into account the Clapeyron law, and is considered as a function of two variables - temperature and pressure, changing along the length of the hose line;

- pressure losses are defined as the integral sum of specific pressure losses in the elementary sections of the hose line.

Practical significance. The research results make it possible to justify the maximum length of the hose line and the structure of the gas-water mixture, and, if it deviates, to make adjustments, for example, using gas saturation.

Keywords: *compression foam; pressure losses; gas saturation; movement pattern; ambient temperature.*

For citation: Kiryan A. P., Peshibay G. I., Galukhin N. A. Pressure loss during the movement of compression foam in a hose line, taking into account the ambient temperature. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 7-14. EDN WXYIWQ

УДК 614.843/.846:51-74

Максим Равильевич Сытдыков, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры;
e-mail: maxim0205@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным
ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации
генерала армии Е. Н. Зиничева»
196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149. Тел.: +7 (911) 2352537

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ КАК СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Цель. Разработка научно обоснованной методики, интегрирующей различные математические подходы, для оценки эффективности пожарной техники как сложной технической системы.

Методы. Синтез теоретико-размерностного метода с использованием π -теоремы Бакингема для формирования безразмерных критериев оценки; метода экспертной оценки для определения весовых коэффициентов и расчета средневзвешенных значений; аппарата нечёткой логики и системы нечёткого вывода типа Мамдани для учёта неопределённости и качественных характеристик применительно к специфике пожарной техники.

Результаты. Построен алгоритм методики, включающий формализацию критериев, определение весов и получение интегральной оценки с учётом иерархии критериев и экспертных суждений.

Научная новизна. Разработана интегрированная методика многокритериальной оценки эффективности пожарной техники как сложной технической системы, впервые объединяющей подход на основе π -теоремы Бакингема для формирования безразмерных критериев, метод экспертного оценивания для определения весовых коэффициентов и аппарат нечёткой логики для формализации качественных характеристик и учёта неопределённости применительно к специфике пожарно-спасательной техники различных классов.

Практическая значимость. Методика применима при оптимизации характеристик на этапе проектирования и формировании требований к перспективным образцам пожарной техники для обоснования ее закупок для подразделений МЧС России.

Ключевые слова: многокритериальная оценка эффективности; пожарная техника; π -теорема Бакингема; анализ размерностей; экспертная оценка; нечёткая логика; безразмерные критерии; интегральная оценка.

Для цитирования: Сытдыков М. Р. Многокритериальный подход к оценке эффективности пожарной техники как сложной технической системы // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 15–25. – EDN PTLBJL

Постановка проблемы. Современная пожарная техника представляет собой сложные технические системы, характеризующиеся множеством взаимосвязанных параметров: технических, эксплуатационных, экономических, эргономических и экологических. Традиционные однокритериальные подходы к оценке таких систем не позволяют учесть всю полноту факторов, влияющих на эффективность применения пожарной техники в различных условиях [1, 2].

Актуальность исследования обусловлена несколькими факторами:

– постоянное усложнение конструкции пожарной техники и расширение спектра её функциональных возможностей требует более глубокого анализа при выборе оптимальных решений [3];

– ограниченность бюджетов подразделений пожарной охраны диктует необходимость обоснованного выбора техники с учётом множества критериев эффективности [4–6];

– отсутствие универсальной методики комплексной оценки эффективности затрудняет принятие управленческих решений при закупке и модернизации пожарной техники.

Анализ последних исследований. Анализ научно-технической литературы показывает, что существующие подходы к оценке пожарной техники можно разделить на несколько групп. Первая группа методов основана на частных показателях эффективности, таких как производительность насосных установок, запас огнетушащих веществ, динамические характеристики [2, 7]. Вторая группа включает экономические методы, учитывающие стоимость пожарной техники и ее эксплуатации [8]. Третья группа представлена методами экспертного оценивания, основанными на субъективном мнении специалистов [9].

Проблема многокритериальной оценки технических систем активно разрабатывается в различных областях техники [10, 11]. Применяют методы взвешенных сумм, аналитической иерархии Саати, TOPSIS, ELECTRE и другие [12, 13]. Однако специфика пожарной техники, включающая разнородность критериев, неопределённость условий применения, необходимость учёта мнений экспертов-практиков, требует адаптации и интеграции различных подходов.

Особый интерес представляет применение теории размерностей и π -теоремы Бакингема для формирования безразмерных критериев оценки [14, 15]. Этот подход широко используют в гидродинамике, теплопередаче, теории подобия, а также при оценке технической эффективности пожарной техники [16, 17].

Аппарат нечёткой логики доказал свою эффективность в задачах принятия решений в условиях неопределённости [18, 19]. Нечёткие системы вывода позволяют формализовать качественные экспертные суждения и учитывать нечёткость границ между классами объектов [20].

Цель работы – разработка научно обоснованной методики, интегрирующей различные математические подходы, для оценки эффективности пожарной техники как сложной технической системы.

Основные задачи исследования:

- формализация критериев оценки технической эффективности пожарной техники с использованием π -теоремы Бакингема;
- определение весовых коэффициентов и значимости технических параметров методом экспертных оценок;
- построение нечётко-множественной модели интегральной оценки;
- разработка алгоритма методики многокритериальной оценки эффективности пожарной техники как сложной технической системы.

Методы исследования. Пожарная техника обладает характерными особенностями, которые делают необходимым применение специальных математических методов для корректной оценки (рис. 1).

Одной из фундаментальных проблем многокритериального анализа является проблема несоизмеримости критериев [14]. Классический подход через нормирование, когда предпринимают попытки сравнить «метры» с «килограммами», а «литры в минуту» с «денежными единицами», часто приводит к потере физического смысла. В свою очередь теория размерностей и π -теорема Бакингема предоставляет решение этой проблемы [15].



Рис. 1. Характерные особенности пожарной техники

Формулировка π -теоремы заключается в условии, что, если физическое соотношение связывает n размерных величин и содержит k основных размерностей, то это соотношение может быть представлено через $(n-k)$ безразмерных комбинаций исходных величин, называемых π -комплексам.

Преимущества метода заключаются в следующем:

- безразмерные комплексы инвариантны относительно выбора системы единиц
- результаты не зависят от того, используют метрическую систему или британскую;
- π -комплексы часто имеют ясный физический смысл (числа Рейнольдса, Фруда, критерии подобия), что облегчает интерпретацию результатов [14];
- сокращается количество переменных – вместо множества размерных параметров получают меньшее число обобщённых характеристик.

Формирование безразмерных критериев позволяет сравнивать технику различных классов и типов на единой основе, что невозможно при использовании исходных размерных параметров.

Переход от размерных параметров к безразмерным критериям решает проблему соизмеримости, но не отвечает на вопрос: какой критерий важнее? Для определения весовых коэффициентов критериев применяют методы экспертного оценивания [9], в основе которого лежит критически важный этап – формирование экспертной группы (рис. 2).



Рис. 2. Принципы формирования экспертной группы

Оптимальное число экспертов определяется статистически. Однако следует отметить, что при числе менее 5 экспертов возрастает случайная ошибка, при числе более 10–15 усложняется организация и обработка данных [9]. Практика показывает, что группа из 5–9 экспертов обеспечивает приемлемое соотношение точности и трудоёмкости.

Сформированная группа экспертов проводит ранжирование параметров пожарной техники и заполняет матрицы рангов (табл. 1).

Таблица 1

Матрица рангов мнений экспертов

№ п/п	Наименование параметров	Ранги							
		№ эксперта					Сумма рангов	Разность суждений	Квадрат разности суждений
		1	2	3	4	5			
1									
2									
3									
о									
	Сумма								

Для дальнейшего исследования и возможности использования данных матрицы рангов необходимо определить согласованность мнений экспертов. Проверку согласованности матрицы осуществляют через индекс согласованности и отношение согласованности [12]. Для оценки степени согласия экспертов используют коэффициент конкордации Кендалла W [9], который изменяется от 0 (полное несогласие) до 1 (полное согласие). Для того чтобы убедиться, что величина W не случайная, рассчитывают статистическую значимость коэффициента Кендалла с помощью уточненного критерия Пирсона для случая связанных рангов путем сравнения расчетного значения с табличным.

Для дальнейшего исследования и определения наиболее значимого параметра технической эффективности пожарной техники проводят математический анализ исходных данных (табл. 1) методами средних арифметических и медиан рангов [9], результаты которого заносятся в таблицу (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета по методу средних арифметических и методу медиан для рангов

№ п/п	Наименование параметров	Сумма рангов	Среднее арифметическое рангов	Итоговый ранг по среднему арифметическому	Медианы рангов	Итоговый ранг по медианам	Итоговый ранг
1							
2							
3							

На основании результатов (табл. 2) определяют весовые коэффициенты технических параметров пожарной техники (λ) и проводят расчет

средневзвешенной оценки каждого образца для выявления наиболее эффективного. Однако классическая булева логика оперирует чёткими категориями, когда элемент принадлежит множеству (1), либо не принадлежит ему (0). Многие характеристики пожарной техники не укладываются в эту дихотомию.

Теория нечётких множеств позволяет формализовать неопределённость и субъективность оценок [18].

Нечёткое множество A на универсальном множестве X характеризуется функцией принадлежности $\mu_a(x): X \rightarrow [0, 1]$, где $\mu_a(x)$ — степень принадлежности элемента x множеству A . Возможные типы функций принадлежности представлены на рис. 3.



Рис. 3. Типы функций принадлежности

При построении функций принадлежности задают лингвистические переменные, значениями которых являются слова или словосочетания естественного языка [19]. Например, переменная – «Эффективность тушения», а терм-множество: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая». При этом каждому терму соответствует нечёткое множество с функцией принадлежности.

Система нечёткого вывода включает три основных этапа [20] (рис. 4).

Преимуществами нечёткого подхода в контексте оценки пожарной техники являются:

- возможности формализации качественных экспертных суждений и включения их в количественную модель;
- робастности к неточности и неполноте исходных данных – небольшие изменения входов вызывают небольшие изменения выходов;
- интерпретируемости результатов – база правил понятна экспертам-практикам без специальной математической подготовки;
- возможности учёта нелинейных и сложных зависимостей между параметрами.

Результаты исследования. На основе методов анализа размерности и π -теоремы, экспертной оценки и нечеткой логики разработана интегрированная методика многокритериальной оценки сложных технических систем применительно к пожарной технике, алгоритм которой представлен на рис. 5.

Предложенные безразмерные критерии инвариантны к масштабу и классу техники, что позволяет проводить корректное сравнение разнородных образцов.

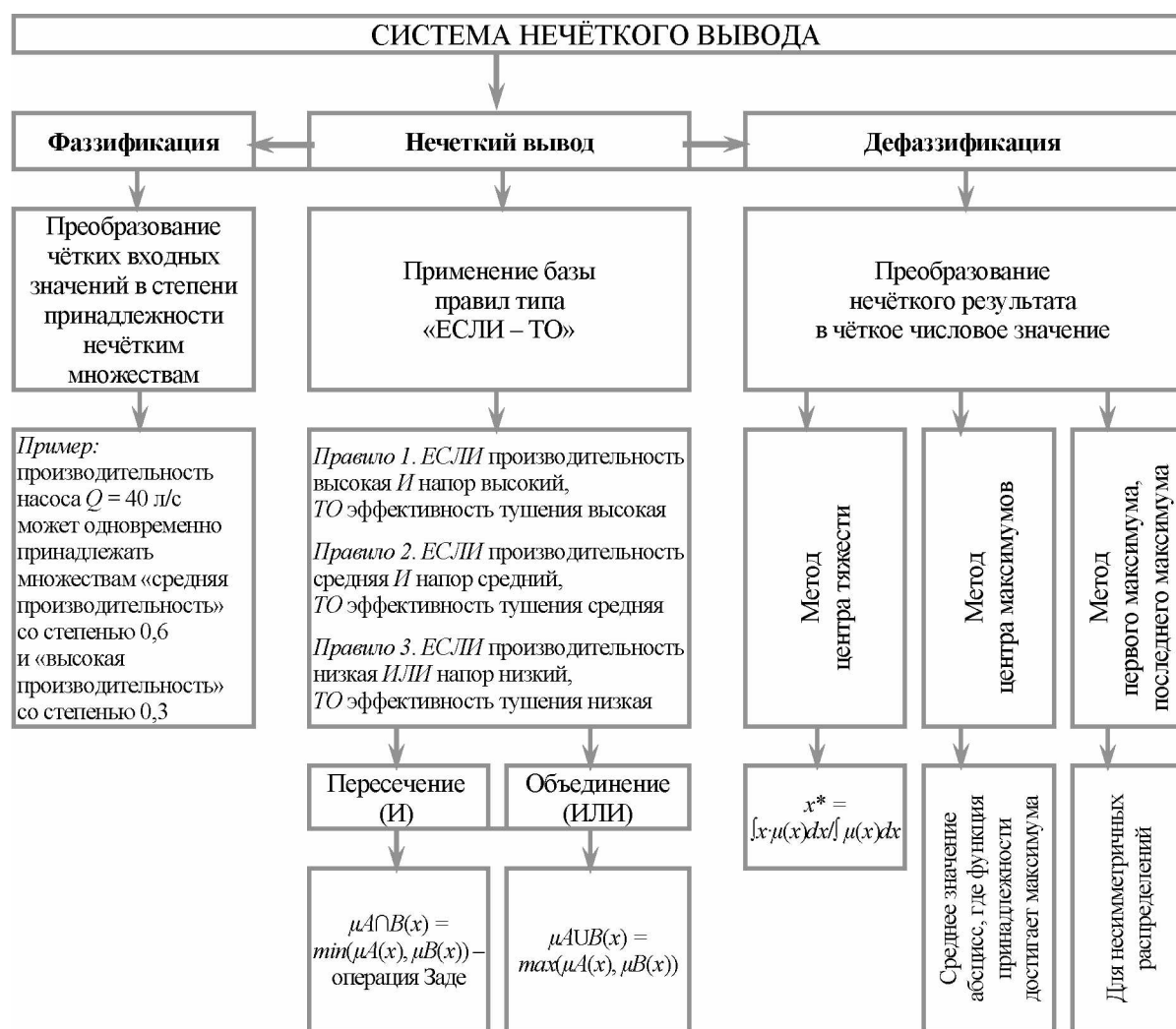


Рис. 4. Этапы системы нечёткого вывода

Методика может применяться при:

- оптимизации характеристик техники на этапе проектирования;
- формировании требований к перспективным образцам;
- обосновании выбора пожарной техники при закупках для подразделений МЧС России;

- сравнительной оценке конкурирующих образцов при проведении тендеров.

Программная реализация методики в виде системы поддержки принятия решений позволяет специалистам без глубокой математической подготовки получать обоснованные оценки.

Наряду с преимуществами разработанной методики следует отметить ряд ограничений:

- необходимость формирования квалифицированной экспертной группы для определения весов и настройки нечёткой модели;
- сложность автоматизации процесса формирования базы правил нечёткого вывода при большом числе критериев;
- субъективность выбора типов функций принадлежности для нечётких множеств.

Эти ограничения типичны для экспертных систем и могут быть частично преодолены с применением методов машинного обучения для автоматической настройки параметров на основе накопленных данных эксплуатации.

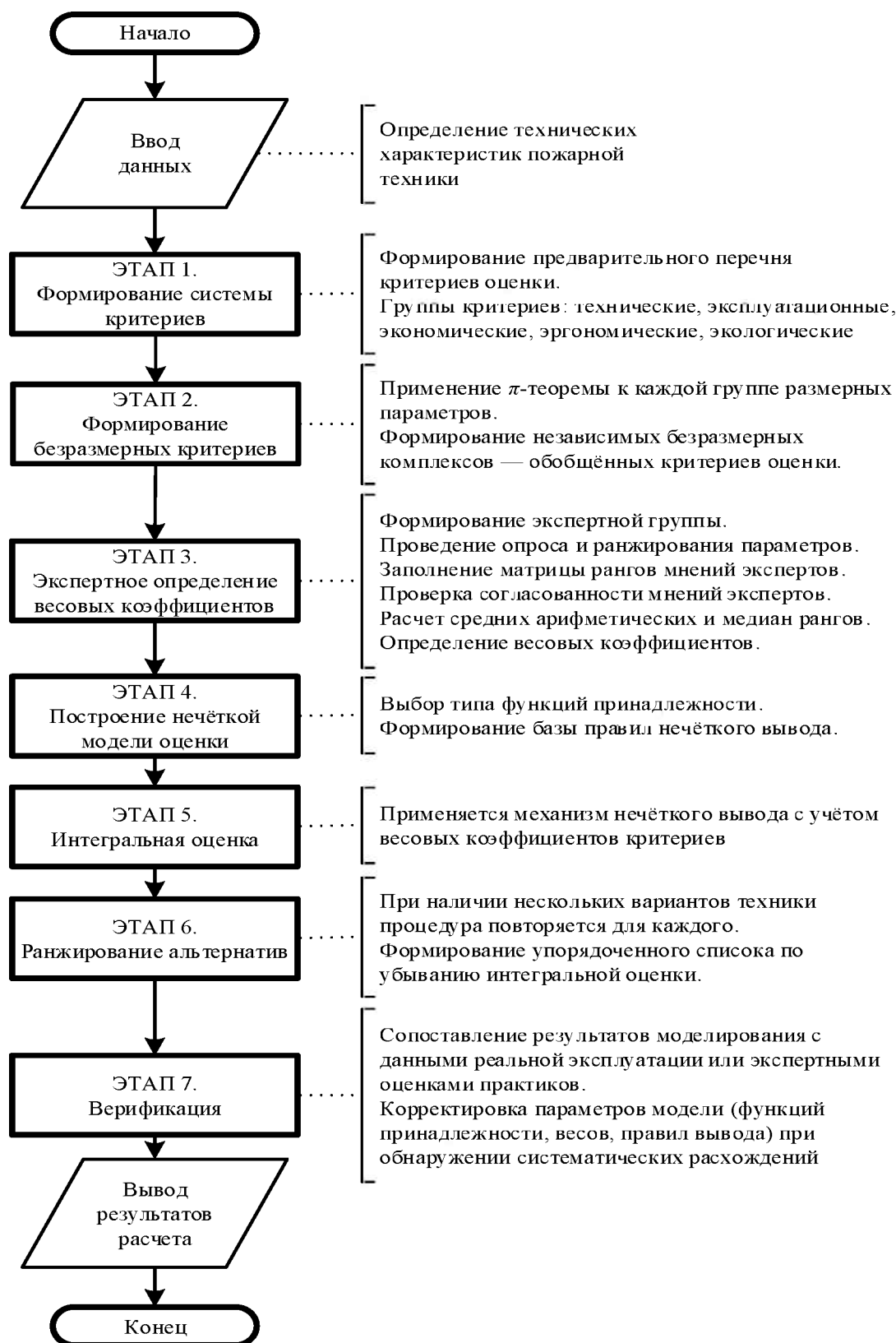


Рис. 5. Алгоритм методики многокритериальной оценки сложных технических систем применительно к пожарной технике

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

- многокритериальная оценка сложных технических систем, таких как пожарная техника, требует комплексного подхода, интегрирующего различные математические методы, так как традиционные однокритериальные подходы не обеспечивают полноты объективной оценки;

- метод анализа размерностей и π -теорема Бакингема обеспечивают корректную нормализацию разнородных критериев с сохранением физического смысла, а сформированные безразмерные π -комплексы позволяют сравнивать технику различных классов на единой основе;

- экспертные методы, в частности метод парных сравнений Саати, позволяют формализовать опыт и знания специалистов-практиков в виде весовых коэффициентов критериев, а коэффициент конкордации Кендалла обеспечивает контроль согласованности экспертных мнений;

- аппарат нечёткой логики адекватно отражает неопределённость и субъективность оценок, характерную для сложных технических систем, а системы нечёткого вывода типа Мамдани обеспечивают интерпретируемость результатов и робастность к неточности исходных данных.

Направления дальнейших исследований:

- расширение методики на более широкий класс пожарно-технического вооружения, включая средства индивидуальной защиты, аварийно-спасательное оборудование, системы пожаротушения;

- включение в модель динамических критериев, учитывающих изменение характеристик техники в процессе эксплуатации и старения;

- разработка методов групповой оценки комплектов пожарной техники с учётом синергетических эффектов совместного применения;

- применение методов машинного обучения (нейронные сети, генетические алгоритмы) для автоматической настройки параметров нечёткой модели на основе накопленных данных эксплуатации.

Разработанная методика позволяет осуществить научно обоснованный выбор и оптимизацию характеристик сложных технических систем в условиях многокритериальности и неопределённости.

Список литературы / References

1. Пожарная тактика / Б. В. Гавкалюк [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2024. – 288 с. – ISBN 978-5-907724-72-3. – EDN DYCDIA.

Gavkalyuk, B. V., Butko, V. S., Tursenev, S. A., Shirinkin, P. V., Lednev, M. V., Klyuj, V. V., Krymsky, V. V., Shklyarik, V. A., Evteev, D. S., Yurchenko, R. A. *Pozharnaya takтика* [Fire tactics]. St. Petersburg, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia Publ., 2024, 288 p. (In Russian)

2. Пожарная техника. Ч. 2. / Б. В. Гавкалюк [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям

и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2022. – 448 с. – ISBN 978-5-907489-49-3.

Gavkalyuk, B. V., Marchenko, M. A., Presnov, A. I., Pechurin, A. A., Sytdykov, M. R., Skripka, A. V. *Pozharnaya tekhnika* [Firefighting equipment. Part 2]. St. Petersburg, Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia Publ., 2022, 448 p. (In Russian)

3. Критерии отнесения техники, находящейся на вооружении пожарных подразделений МЧС России, к категории «современная», «новая» или «перспективная» / Р. Б. Володченков, А. А. Новиков, Л. В. Щербатых, В. В. Володченкова // Пожарная безопасность. – 2022. – № 2(107). – С. 86–91. – DOI 10.37657/vniipo.pb.2022.107.2.009.

Volodchenkov R. B., Novikov A. A., Shherbatykh L. V., Volodchenkova V. V. [Criteria for classifying the equipment of fire departments of Emercom of Russia as «modern», «new» or «prospective»]. *Fire safety*, 2022, no. 2(107), pp. 86-91. (In Russian)

4. Жовна, А. В. Эффективность объектов противопожарной защиты в обеспечении пожарной безопасности промышленных предприятий / А. В. Жовна // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2008. – № 5. – С. 90–96.

Zhovna, A. V. [The effectiveness of fire protection facilities in ensuring the fire safety of industrial enterprises]. *Bulletin of the Belarusian National Technical University*, 2008, no. 5, pp. 90-96. (In Russian)

5. Сторожук, Д. Ю. Оценка эффективности современных пожарных надстроек в условиях различных типов пожаров / Д. Ю. Сторожук // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, № 6(75). – С. 1900-1905. – EDN DTKQGS.

Storozhuk, D. Yu. [Evaluation of effectiveness of modern fire superstructures in conditions of various types of fires]. *Bulletin of Science*, 2024, vol. 2, no. 6(75), pp. 1900-1905. (In Russian)

6. Сторожук, Д. Ю. Экономическая эффективность применения современных пожарных надстроек / Д. Ю. Сторожук // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, № 6(75). – С. 1906-1911.

Storozhuk, D. Yu. [Economic efficiency of use of modern fire superstructures]. *Bulletin of Science*, 2024, vol. 2, no. 6(75), pp. 1906-1911. (In Russian)

7. Моргунов, К. П. Насосы и насосные станции / К. П. Моргунов. – Изд. 2-е, исправленное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2018. – 308 с. – ISBN 978-5-8114-2956-1.

Morgunov, K. P. *Nasosy i nasosny'e stancii* [Pumps and pumping stations]. Ed. 2nd, Corrected. St. Petersburg, Lan Publ., 2018, 308 p. (In Russian)

8. Воронин, С. В. Подходы к определению новой стоимости образца пожарной техники / С. В. Воронин, И. Л. Скрипник, Т. Т. Каверзнева // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2018. – № 2. – С. 128-134.

Voronin, S. V., Skripnik, I. L., Kaverzneva, T. T. [Approaches to determining the new value of the sample fire equipment]. *Scientific and Analytical Journal «Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia»*, 2018, no. 2, pp. 128-134. (In Russian)

9. Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений / А. И. Орлов. – Москва : ООО Издательство «КноРус», 2017. – 568 с. – ISBN 978-5-406-04089-8.

Orlov, A. I. *Organizacionno-ekonomicheskoe modelirovanie: teoriya prinyatiya resheniy* [Organizational and economic modeling: theory of decision-making]. Moscow, KnoRus Publ., 2017, 568 p. (In Russian)

10. Аленина, Е. Э. Количественные и качественные методы разработки и принятия управленческих решений / Е. Э. Аленина, Л. В. Бородачева, Д. В. Ширяев. – Москва : Научные технологии, 2017. – 114 с. – ISBN 978-5-4443-0123-4.

Alenina, E. E., Borodacheva, L. V., Shiryayev, D. V. *Kolichestvennyye i kachestvennyye metody razrabotki i prinyatiya upravlencheskikh resheniy* [Quantitative and qualitative methods of developing and making managerial decisions]. Moscow, Scientific Technologies Publ., 2017, 114 p. (In Russian)

11. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – Москва : Физматлит, 2007. – 256 с. – ISBN 978-5-9221-0812-6.

Podinovskij, V. V., Nogin, V. D. *Pareto-optimalnye resheniya mnogokriterialnykh zadach* [Pareto-optimal solutions to multi-criteria problems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 256 p. (In Russian)

12. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.

Saati, T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarxij* [Decision-making. Hierarchy analysis method]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1993, 278 p. (In Russian)

13. Triantaphyllou E. Multi-criteria decision making methods: A comparative study. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2016. 290 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-3157-6. (In English)

14. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1977. – 440 с.

Sedov, L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimension methods in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 440 p. (In Russian)

15. Buckingham E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations // *Physical Review*. 1914. Vol. 4. No. 4. P. 345-376. DOI: 10.1103/PhysRev.4.345. (In English)

16. Кожевин, Д. Ф. Методика комплексной оценки эффективности огнетушителей (применительно к пожароопасным производственным объектам нефтебаз) : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кожевин Дмитрий Федорович. – Санкт-Петербург, 2011. – 167 с. Место защиты: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева.

Kozhevin, D. F. *Metodika kompleksnoy ocenki effektivnosti ognetushiteley (primenitelno k pozharoopasnym proizvodstvennym obektam neftebaz)* [The methodology of comprehensive assessment of the effectiveness of fire extinguishers (in relation to fire-hazardous production facilities of oil depots) : 05.26.03 «Fire and industrial safety» specialty: Candidate of Technical Sciences dissertation / Kozhevin Dmitry Fedorovich]. St. Petersburg, 2011, 167 p. Place of thesis defence: Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia (In Russian)

17. Сытдыков, М. Р. Методика оценки эффективности порошкового огнетушителя со встроенной пористой емкостью (применительно к пожароопасным производственным объектам нефтебаз) : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сытдыков Максим Равильевич. – Санкт-Петербург, 2013. – 170 с. Место защиты: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева.

Sytdykov, M. R. *Metodika ocenki effektivnosti poroshkovogo ognetushitelya so vstroennoy poristoy emkostyyu (primenitelno k pozharoopasnym proizvodstvennym obektam neftebaz)* [Methodology for evaluating the effectiveness of a powder fire extinguisher with a built-in

porous container (in relation to fire-hazardous production facilities of oil depots) : 05.26.03 «Fire and industrial safety» specialty: Candidate of Technical Sciences dissertation / Maxim Ravilevich Sytdikov]. St. Petersburg, 2013, 170 p. Place of thesis defence: Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia (In Russian)

18. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X. (In English)

19. Zimmermann H.-J. Fuzzy set theory – and its applications. 5th ed. Dordrecht: Springer, 2016. 516 p. DOI: 10.1007/978-94-015-8702-0. (In English)

20. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. No. 1. P. 1-13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2. (In English)

Дата поступления рукописи 23.03.2026

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

*Maxim Ravilevich Sytdikov, Cand. of Tech. Sci., Head of the Department; e-mail: maxim0205@mail.ru
Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149. Phone: +7 (911) 2352537*

A MULTI-CRITERIA APPROACH TO EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF FIRE FIGHTING EQUIPMENT AS A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

Purpose. Development of a scientifically based methodology integrating various mathematical approaches to assess the effectiveness of fire fighting equipment as a complex technical system.

Methods. An original integrated methodology synthesizing three approaches is proposed: a dimension-theoretic method using Buckingham's π -theorem to form dimensionless evaluation criteria; an expert assessment method to determine weighting coefficients and calculate weighted averages; a fuzzy logic apparatus and a Mamdani-type fuzzy inference system to account for uncertainty and qualitative characteristics. The novelty lies in the integrated integration of these methods in relation to the specifics of fire fighting equipment.

Results. The algorithm of the methodology is constructed, which includes the formalization of criteria, the determination of weights and the receipt of an integral assessment, taking into account the hierarchy of criteria and expert judgments.

Scientific novelty. An original integrated methodology for multi-criteria assessment of the effectiveness of fire fighting equipment as a complex technical system has been developed. For the first time, it combines an approach based on Buckingham's π -theorem to form dimensionless criteria, an expert assessment method to determine weighting coefficients, and a fuzzy logic apparatus to formalize qualitative characteristics and account for uncertainty in relation to the specifics of fire and rescue equipment of various classes.

Practical significance. The methodology is applicable in justifying the procurement of fire fighting equipment for the Russian Ministry of Emergency Situations units, conducting tenders, optimizing characteristics at the design stage and forming requirements for promising samples.

Key words: multicriteria efficiency assessment; fire fighting equipment; Buckingham's π -theorem; dimensional analysis; expert assessment; fuzzy logic; dimensionless criteria; integral assessment.

For citation: Sytdikov M. R. A multi-criteria approach to evaluating the effectiveness of fire fighting equipment as a complex technical system. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 15-25. EDN PTLBJL

УДК 622.822.2

Дамир Фанисович Заятдинов, генеральный директор; e-mail: damir.zayatdinov@yandex.ru

Научно-производственное объединение «Алзамир»

650036, г. Кемерово, ул. Гагарина, 151, а/я 1051. Тел.: +7 (951) 701-31-67

Инна Алексеевна Ермакова, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры; e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

Виктор Прокопьевич Тащиенко, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры;

e-mail: tatsienkovp@kuzstu.ru

Евгений Александрович Киренберг, магистрант; e-mail: Omega440@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева»

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел.: +7 (913) 287-54-02

ЗАВИСИМОСТЬ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ СОРБЦИИ КИСЛОРОДА УГЛЕМ ОТ СВОЙСТВ УГЛЯ

Цель. Установление количественных зависимостей между свойствами угля и константой скорости сорбции кислорода – ключевым параметром, определяющим склонность угля к эндогенному самовозгоранию.

Методы. Корреляционный и регрессионный анализ результатов лабораторных исследований.

Результаты. Установлено, что влажность угля, выделение угарного газа (CO) и метана (CH₄), оказывают статистически значимое положительное влияние на константу сорбции кислорода углем, в то время как марка угля и другие петрографические характеристики не влияют на указанную величину.

Научная новизна. Впервые получено уравнение зависимости константы скорости сорбции кислорода углем от свойств угля: его влажности, объемов выделяемого угарного газа и метана.

Практическая значимость. Полученное уравнение линейной множественной регрессии позволяет оперативно оценивать константу сорбции по легко измеряемым характеристикам для повышения пожарной безопасности на угледобывающих и перерабатывающих предприятиях.

Ключевые слова: константа скорости сорбции кислорода углем; инкубационный период самовозгорания угля; предупреждение эндогенных пожаров.

Для цитирования: Заятдинов Д. Ф., Ермакова И. А., Тащиенко В. П., Киренберг Е. А. Зависимость константы скорости сорбции кислорода углем от свойств угля // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 26–32. – EDN PVC MJW

Постановка проблемы. По состоянию на 2026 г. в Кузбассе работает 151 угледобывающее и перерабатывающее предприятие:

- 39 шахт, в том числе 22 предприятия, добывающих коксующийся уголь, и 17 предприятий, добывающих энергетический уголь;
- 55 разрезов, в том числе 8 – добывающих коксующийся уголь, 37 – добывающих энергетический уголь, 10 – добывающих коксующийся и энергетический уголь;
- 57 обогатительных фабрик и установок.

В 2024 г в Кузбассе было добыто 198,4 млн т угля [1]. Обязательным условием эксплуатации шахт и разрезов является обеспечение безопасности ведения горных работ, в частности, предотвращение эндогенных пожаров [2–6].

Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности устанавливает требования, соблюдение которых предупреждает экзогенную и эндогенную пожаробезопасность при эксплуатации шахт, разрезов, фабрик и породных отвалов. Первым требованием этой инструкции является обязательное определение инкубационного периода самовозгорания угля.

Одним из факторов, определяющих величину инкубационного периода самовозгорания угля, является константа скорости сорбции кислорода углем.

Анализ последних исследований. Константа скорости сорбции кислорода углем является комплексным показателем, которая зависит от влажности угля, размера его частиц, пористости и других характеристик [7–9]. Влияние влажности угля на константу скорости сорбции кислорода углем оценивается исследователями неоднозначно. В работе [9] указано, что при определенной «критической влажности» наблюдается резкое увеличение этой константы, что связано с изменением супермикропор угля. Когда уголь освобождается от влаги в этих порах, доступная поверхность для сорбции кислорода возрастает, что приводит к ускорению процесса сорбции. С другой стороны, применение воды или водных составов для охлаждения угля может значительно снижать константу скорости сорбции кислорода [10], указывая на сложную зависимость этого параметра от содержания влаги и её распределения в пористой структуре угля.

При обзоре научно-технической литературы не встречены регрессионные зависимости, позволяющие численно оценить влияние различных факторов на величину константы скорости сорбции кислорода углем.

В связи с этим, установление зависимостей, которые позволяют оценить величину константы скорости сорбции кислорода углем с учетом различных факторов, имеет большое значение для предупреждения эндогенных пожаров.

Цель исследования. Установление количественных зависимостей между свойствами угля и константой скорости сорбции кислорода – ключевым параметром, определяющим склонность угля к эндогенному самовозгоранию.

Методика проведения исследования. Для установления факторов, оказывающих влияние на константу скорости сорбции кислорода, проведены исследования проб угля в лаборатории «Профилактики и тушения эндогенных пожаров» НПО «Алзамир» (г. Кемерово).

Приказ № 491¹ Ростехнадзора устанавливает требования, согласно которым определение инкубационного периода самовозгорания угля $\tau_{\text{инк}}$ следует проводить по формуле:

$$\tau_{\text{инк}} = \frac{C_y(T_{\text{кр}} - T_0) + 0,6\lambda W_0 / 100 + q_d X_0}{24\alpha K^{0,45} C_{O_2} q_{O_2}}, \quad (1)$$

где C_y – теплоемкость угля, Дж/(кг·°C);

$T_{\text{кр}}$ – критическая температура самовозгорания угля, °C;

T_0 – начальная температура угля, °C;

λ – теплота испарения воды, Дж/кг;

W_0 – начальная влажность угля, %;

q_d – удельная теплота десорбции метана, Дж/м³;

X_0 – природная метаноносность угля, м³/кг;

α – коэффициент усвоения кислорода воздуха;

C_{O_2} – концентрация кислорода на входе в угольное скопление, доли единицы;

q_{O_2} – удельная теплота сорбции кислорода воздуха углем, Дж/м³;

¹ Приказ Ростехнадзора от 27.12.2023 № 491 «Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по определению инкубационного периода самовозгорания угля»

K – константа скорости сорбции кислорода углем, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{ч})$, вычисляют после проведения экспериментов по формуле:

$$K = -\frac{V}{m \cdot \tau} \cdot \ln \frac{(100 - C_0)C_K}{C_0(100 - C_K)}, \quad (2)$$

где V – объем воздуха в реакционном сосуде, м^3 ;

m – масса навески угля, кг ;

τ – время контакта воздуха с углем, ч ;

C_0, C_K – соответственно начальная и конечная концентрация кислорода в воздухе над углем, %.

Исследуемые пробы угля, взятые на угольных пластах Кузбасса, характеризовались следующими факторами: марка угля, выход летучих веществ, показатель отражения витринита, влажность угля W , выделение угарного газа V_{CO} , метана V_{CH_4} и углекислого газа V_{CO_2} . Значения констант скорости сорбции кислорода углем были рассчитаны по измеренной концентрации кислорода в закрытом сосуде с углем через 24, 48, 72 ч выдержки.

Проведен корреляционный и регрессионный анализ влияния указанных факторов на величину константы скорости сорбции за различные промежутки времени, а также на ее среднее значение в эти промежутки. Проверку значимости уравнения регрессии проводили по критерию Фишера, для чего рассчитывали наблюдаемое значение критерия F . Уровень значимости принимали равным 0,05. Уравнение регрессии считали значимым, если показатель «значимость F » был меньше 0,05. Аналогично, фактор считали значимым, если соответствующее « P -значение» было менее 0,05 [12].

Результаты исследования влияния свойств угля на константу скорости сорбции кислорода включают в себя характеристики проб угля (марка угля с соответствующим выходом летучих веществ и показателем отражения витринита; влажность угля) и данные лабораторных исследований (значения константы скорости сорбции кислорода углем за 24, 48, 72 ч и их среднее значение (K_{cp}); объемы выделенных газов: угарного газа, метана и углекислого газа из угля за 24 ч) (табл. 1).

В результате исследования установлено (табл. 2), что константа скорости сорбции кислорода K :

- линейно зависит от трех факторов: влажности угля W , объемов выделенного угарного газа V_{CO} и метана V_{CH_4} ;
- не зависит от марки угля.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом:

- показатель «значимость F » принимает значения менее 0,05 во все наблюдаемые моменты времени, что позволяет говорить о значимой зависимости константы скорости сорбции кислорода K от указанных факторов;
- показатель « P -значение» для каждого из факторов составляет менее 0,05 в наблюдаемые моменты времени, что свидетельствует о том, что эти факторы можно включить в уравнение линейной множественной регрессии.

Исключение составляет показатель «Выделение угарного газа» на момент времени 72 ч.

Таблица 1

Характеристики проб угля, результаты лабораторных исследований
и расчета по уравнению регрессии

Характеристики проб угля				Результаты лабораторных исследований							Расчет по уравнению регрессии	
Марка угля	Выход летучих веществ, %	Показатель отражения витринита Ro _r , %	Влажность угля, %	Константа скорости сорбции кислорода углем K , см ³ /(г·ч)				Объем выделенных газов из угля за 24 ч B , см ³ /кг			$K_{расч}$	$A, \%$
				24 ч.	48 ч.	72 ч.	$K_{ср}$	Угарный газ, B_{CO}	Метан, B_{CH_4}	Углекислый газ, B_{CO_2}		
ДГ	32	0,65	4,31	0,177	0,082	0,060	0,106	1,40	169,19	93,06	0,099	6,7
ДГ	32	0,65	7,13	0,107	0,064	0,045	0,072	0,63	0,36	93,75	0,073	1,4
ДГ	32	0,65	5,41	0,111	0,066	0,050	0,076	0,71	107,49	89,59	0,078	2,5
ДГ	32	0,65	6,57	0,121	0,068	0,049	0,079	0,38	124,19	86,10	0,079	0,6
СС	28	1,05	5,25	0,049	0,028	0,023	0,033	0,25	2,41	35,52	0,048	44,8
Д	30	0,60	5,45	0,107	0,049	0,034	0,063	0,64	79,22	135,80	0,072	14,3
ДГ	32	0,65	7,22	0,132	0,081	0,072	0,095	0,15	0,02	19,49	0,060	37,4
ДГ	32	0,65	6,93	0,124	0,067	0,047	0,079	0,45	79,90	116,78	0,078	1,5
СС	28	1,05	11,4	0,194	0,109	0,079	0,127	1,39	0,04	56,94	0,128	0,8
ДГ	32	0,65	5,07	0,111	0,060	0,043	0,071	0,65	2,78	195,32	0,058	17,9
СС	28	1,05	7,15	0,080	0,043	0,031	0,051	0,33	11,03	68,63	0,066	29,2
СС	28	1,05	8,23	0,083	0,053	0,038	0,058	0,53	0,10	51,99	0,078	35,2
ГЖО	34	0,80	6,10	0,108	0,056	0,040	0,068	0,37	51,04	98,70	0,065	4,6
ДГ	32	0,65	6,25	0,052	0,028	0,020	0,033	0,21	39,98	55,35	0,060	80,9
ГЖО	34	0,80	6,70	0,161	0,087	0,065	0,104	0,61	290,08	76,44	0,111	7,1
СС	28	1,05	6,46	0,155	0,096	0,076	0,109	1,28	249,93	75,85	0,124	13,3
ДГ	32	0,65	5,48	0,096	0,051	0,039	0,062	0,62	18,06	56,53	0,063	1,2
ДГ	32	0,65	7,51	0,093	0,058	0,052	0,068	0,85	0,27	58,86	0,082	21,2
ДГ	32	0,65	7,88	0,209	0,109	0,084	0,134	0,59	124,71	122,33	0,096	28,6
ДГ	32	0,65	5,18	0,133	0,071	0,053	0,086	0,91	47,95	145,94	0,073	14,7

Уравнение линейной множественной регрессии, устанавливающее зависимость среднего значения константы скорости сорбции кислорода от указанных факторов, имеет вид:

$$K_{ср} = 0,007648W + 0,029352B_{CO} + 0,000147B_{CH_4}. \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии для всех трех факторов положительны, при их увеличении наблюдается рост константы скорости сорбции кислорода углем. Таким образом, уголь высокой влажности, а также активно выделяющий угарный газ и метан, обладает высокой константой скорости сорбции кислорода и, следовательно, имеет большую склонность к самовозгоранию.

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа влияния трех факторов
на константу скорости сорбции кислорода

Показатель	Константа скорости сорбции K			Среднее $K_{ср}$
	за 24 ч	за 48 ч	за 72 ч	
Множественный R	0,780781	0,816276	0,76374	0,796625
Значимость F	0,001455	0,00043	0,002407	0,000871
P-значение				
– Y-пересечение	0,831578	0,741171	0,778423	0,968313
– влажность угля W , %	0,041753	0,005214	0,012453	0,015632
– выделение угарного газа B_{CO} , см ³ /кг	0,02772	0,029747	0,077654	0,030494
– выделение метана B_{CH_4} , см ³ /кг	0,01809	0,011198	0,02677	0,01441

По уравнению (3) вычислены расчетные значения $K_{расч}$ и ошибки аппроксимации (погрешности вычислений):

$$A = \frac{|K_{набл} - K_{расч}|}{K_{набл}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $K_{набл} = K_{ср}$ и $K_{расч}$ – соответственно средние наблюдаемые и рассчитанные по уравнению регрессии значения константы скорости сорбции кислорода углем (см. табл. 1).

Средняя ошибка аппроксимации составила 18,2 %, и это значение можно оценивать как достаточное для предварительной оценки константы скорости сорбции кислорода по найденному уравнению регрессии (3).

Наиболее значимым фактором, влияющим на среднюю константу скорости сорбции кислорода, в данном случае является выделение метана, так как «P-значение» минимально.

Полученное уравнение регрессии (3) позволяет осуществлять оперативный прогноз константы скорости сорбции кислорода по известным свойствам угля: влажности, объему выделенного угарного газа и метана.

Мониторинг этих свойств позволит определить наиболее активные виды угля, для которых необходимо проводить профилактические мероприятия по предотвращению самовозгорания.

Выводы. Константа сорбции кислорода углем является фактором, изменение которого оказывает существенное влияние на длительность инкубационного периода самовозгорания угля. Поэтому полученная регрессионная зависимость, позволяющая численно оценить влияние различных факторов на величину константы скорости сорбции кислорода углем, представляет значительный интерес для оценки склонности угля к самовозгоранию.

Установлено, что величина константы скорости сорбции кислорода углем линейно зависит от трех факторов: влажности угля W , выделенных объемов угарного газа B_{CO} и метана B_{CH_4} . Полученная зависимость позволяет осуществлять

оперативный прогноз значения величины константы сорбции кислорода углем по вышеуказанным факторам, что имеет важное практическое значение для обеспечения безопасности при добыче, переработке и хранении угля.

Список литературы/ References

1. Министерство угольной промышленности Кузбасса: официальный сайт. [Электронный ресурс]. – URL: <https://mupk42.ru/ru/industry/> (дата обращения: 14.01.2026).
[Ministry of Coal Industry of Kuzbass: official website]. Available at: <https://mupk42.ru/ru/industry/> (accessed: 14.01.2026). (In Russian)
2. Склонность углей к низкотемпературному окислению и оценка опасности возникновения эндогенных пожаров / Н. М. Качурин, А. Ю. Ермаков, В. И. Ефимов, А. В. Волберг // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 4. – С. 36–39.
Kachurin, N. M., Ermakov, A. Ju., Efimov, V. I., Volberg, A. V. [The tendency of coals to low-temperature oxidation and assessment of the risk of endogenous fires]. Occupational safety in industry, 2016, no. 4, pp. 36-39. (In Russian)
3. Риск самовозгорания угля и опасность эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса / Г. В. Стась, А. В. Волберг, Е. В. Смирнова, М. П. Ганин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 93–103.
Stas, G. V., Volberg, A. V., Smirnova, E. V., Ganin, M. P. [Risk of coal spontaneous ignition and danger of endogenous fires at the Kuznetck basin mines]. Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle, 2017, no. 3, pp. 93-103. (In Russian)
4. Тимофеева, С. С. Риски самовозгорания угля и технологии их индикации / С. С. Тимофеева, Г. И. Смирнов // XXI век. Техносферная безопасность. – 2022. – Т. 7, № 3 (27). – С. 264–274.
Timofeeva, S. S., Smirnov, G. I. [Spontaneous coal combustion risks and risk indication methods]. XXI century. Technosphere Safety, 2022, no. 7(3), pp. 264-274. (In Russian)
5. Применение температурной и газовых съемок для обнаружения и локации очагов эндогенных пожаров на выходах пластов ликвидированной шахты / В. А. Портола, А. А. Бобровникова, С. В. Ковалев, Е. А. Киренберг // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 3 (157). – С. 79–90.
Portola, V.A., Bobrovnikova, A.A., Kovalev, S.V., Kirenberg, E.A. [Application of temperature and gas surveys for detection and location of points of endogenous fires at seam outcrops of the abandoned mine]. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2023, no. 3(157), pp. 79-90. (In Russian)
6. Портола, В. А. Исследование температуры и выделения газов в очагах эндогенных пожаров на породных отвалах / В. А. Портола, С. И. Протасов, Е. А. Серегин // Горная промышленность. – 2024 – № 4. – С. 140–145.
Portola, V.A., Protasov, S.I., Seregin, E.A. [Investigation of temperature and gas release in spontaneous fires at rock dumps]. Russian Mining Industry. 2024, no. 4, pp. 140-145. (In Russian)
7. Кузнецов, П. Н. Влияние свойств ископаемых углей на их склонность к самовозгоранию / П. Н. Кузнецов, А. С. Малолетнев, З. Р. Исмагилов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24, № 3. – С. 335–346.
Kuznecov, P. N. Maloletnev, A. S., Ismagilov, Z. R. [Influence of the properties of fossil coal on its tendency to self-ignition]. Khimiya v Interesakh Ustoichivogo Razvitiya, 2016, no. 3 (24), pp. 335-346. (In Russian)
8. Поведение константы скорости реакции кислорода с углем при внутренней и внешней механоактивации / С. П. Ворошилов, А. С. Ворошилов, К. С. Лебедев, М. С. Сазонов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 99–103.

Voroshilov, S. P., Voroshilov, A. S., Lebedev, K. S., Sazonov, M. S. [Oxygen/coal reaction speed constant behavior at inner and outer mechanical activation]. Bulletin of research center for safety in coal industry, 2010, no. 2, pp. 99-103. (In Russian)

9. Ворошилов, С. П. Влияние влажности на скорость окисления углей / С. П. Ворошилов, А. С. Ворошилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S12. – С. 316–320.

Voroshilov, S. P., Voroshilov, A. S. [Influence of humidity on coals oxidation speed]. Mining informational and analytical bulletin, 2009, no. S12, pp. 316-320. (In Russian)

10. Оценка эффективности водных составов для охлаждения очагов самовозгорания бурого угля на разрезах / В. А. Портола [и др.] // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 89–94.

Portola, V. A., Cherskih, O. I., Protasov, S. I., Seregin, E. A., Shvakov, I. A. [Assessment of water-based compositions efficiency for cooling place of lignite spontaneous combustion in strip mines]. Mining Industry Journal, 2023, no. 4, pp. 89-94. (In Russian)

11. Елисеева, И. И. Эконометрика / И. И. Елисеева, С. В. Курьшева, Т. В. Костеева. – Москва : Финансы и статистика, 2008. – 575 с.

Eliseeva, I. I., Kuryшева S. V., Kosteeva T. V. [Econometrics]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2008, 575 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 14.04.2026

Рекомендовано к публикации профессором кафедры аэрологии, охраны труда и природы ФГБОУ ВО КузГТУ, д-ром техн. наук, профессором А. И. Фоминым

Damir Fanisovich Zayatdinov, General Director; e-mail: damir.zayatdinov@yandex.ru

Scientific and Production Association Alzamid

650036, Kemerovo, Gagarina St., 151, office 1051. Phone: +7 (961) 701-31-67

Inna Alekseevna Ermakova, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department;

e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

Viktor Prokopyevich Tatsienko, Dr. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;

e-mail: tatsienkovp@kuzstu.ru

Evgeny Alexandrovich Kirenberg, Master's student; e-mail: Omega440@yandex.ru

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

650000, Kemerovo, Vesennaya St., 28. Phone: +7 (913) 287-54-02

DEPENDENCE OF THE OXYGEN SORPTION RATE CONSTANT ON THE PROPERTIES OF COAL

Objective. To establish quantitative relationships between coal properties and the oxygen sorption rate constant, a key parameter determining coal's susceptibility to endogenous spontaneous combustion.

Methods. Correlation and regression analysis of laboratory data obtained at Alzamid (Kemerovo).

Results. It was found that coal moisture content and carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) emission have a statistically significant positive effect on the oxygen sorption constant by coal, while coal grade and other petrographic characteristics do not affect this value.

Scientific novelty. For the first time, an equation has been derived for the dependence of the oxygen sorption rate constant by coal on coal properties: moisture content, carbon monoxide (CO) and methane (CH₄) emission.

Practical significance. The resulting linear multiple regression equation allows for the rapid estimation of the sorption constant based on easily measurable characteristics to improve fire safety at coal mining and processing facilities.

Keywords: oxygen sorption rate constant by coal; incubation period of spontaneous combustion of coal; prevention of endogenous fires.

For citation: Zayatdinov D. F., Ermakova I. A., Tatsienko V. P., Kirenberg, E. A. Dependence of the oxygen sorption rate constant on the properties of coal. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 26-32. EDN PVCMIJW

УДК 622.822:[622.413.3+622.41]:536.24

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

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

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

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования

«Донецкий институт государственной противопожарной службы МЧС России»

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

Дмитрий Сергеевич Евтеев, ст. преп. каф.; e-mail: d.evtееv@academygps.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Академия государственной противопожарной службы МЧС России»

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

Александр Николаевич Чован, аспирант, гл. спец.; e-mail: sasha.chovan@mail.ru

Главное управление МЧС России по Донецкой Народной Республике

283050, г. Донецк, ул. Щорса, д. 60. Тел.: +7 (949) 317-92-22

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ ПРИ ПОЖАРЕ

Цель. Установление зависимостей температуры и концентраций газов при нестационарном и стационарном распространении тепла и газов с учетом условий (режимов) проветривания, коэффициентов тепло- и массообмена, а также геометрических размеров выработки аварийного участка угольной шахты.

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

Результаты. Сравнение теоретических данных с результатами экспериментальных исследований динамики развития подземных пожаров в условиях штольни позволило подтвердить достоверность математических моделей переноса тепла и газов в горной выработке при наличии очага пожара с максимальной относительной погрешностью не более 15 %.

Научная новизна. Установлены зависимости скорости распространения пожарных газов (концентраций газов и температуры) при нестационарных и стационарных процессах тепломассопереноса в горной выработке, отличающиеся от известных учетом ее геометрических размеров (геометрии), условий (режимов) проветривания, а также коэффициентов тепло- и массопереноса при подземном пожаре экзогенного происхождения.

Практическая значимость. Получение достоверных данных о газовой динамике на всем протяжении горной выработки с источниками газовыделения при пожаре позволит повысить уровень безопасности труда горноспасателей и эффективности ведения аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: *горная выработка; экспериментальная штольня; подземный пожар; процесс тепломассопереноса; эмпирические исследования.*

Для цитирования: Агарков Ал. В., Ефименко В. Л., Евтеев Д. С., Чован А. Н. Эмпирические исследования процессов тепломассопереноса в горной выработке при пожаре // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 33–43. – EDN RCUEMK

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Несмотря на ежегодное повышение уровня промышленной безопасности и противопожарной защиты шахт, пожары остаются наиболее распространенным видом аварий, которые наносят угольной отрасли существенный материальный ущерб и сопровождаются большим риском для жизни и здоровья шахтеров и горноспасателей [1]. Согласно анализу официальных данных

Федерального государственного унитарного предприятия «Военизированная горноспасательная часть», за 13-летний период произошло 603 аварии, из них – 288 подземных пожаров и пожаров на поверхностном комплексе шахт (в среднем – 22 пожара в год). По частоте возникновения пожары в шахтах составляют 45 % всех подземных аварий.

Ликвидация пожаров сопряжена с высокой вероятностью взрыва газовой смеси и возникновением других опасных условий. Соответственно, получение достоверных данных о составе шахтной среды на аварийных участках угольных шахт путем прогнозирования и оценки газовой обстановки (температуры и концентраций газов) в горных выработках в течение всего периода ликвидации аварии – одно из главных условий безопасного и эффективного ведения горноспасательных работ.

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

В работе [10] было выполнено моделирование процессов тепломассопереноса в проветриваемой и непроветриваемой горных выработках с источниками газовой обстановки при пожарах. В ходе теоретических исследований была разработана математическая модель тепломассообменных процессов в аварийных участках угольных шахт при пожарах с учетом геометрических размеров горных выработок, условий (режимов) их проветривания, коэффициентов тепло- и массопереноса, которая позволяет определять динамику пожарных газов вдоль выработок.

Цель настоящего исследования. Установление зависимостей температуры и концентраций газов при нестационарном и стационарном распространении тепла и газов с учетом условий (режимов) проветривания, коэффициентов тепло- и массообмена, а также геометрических размеров выработки аварийного участка угольной шахты.

Соответственно, актуальная научно-техническая задача, имеющая важное практическое значение, заключается в проведении эмпирических исследований процессов тепломассопереноса в горной выработке при пожаре путем оценки достоверности результатов математического моделирования переноса тепла и газов в горной выработке при пожаре при их сравнении с экспериментальными данными исследований динамики развития подземных пожаров в натурных условиях – штольне ФГКУ «ННИ «Респиратор» МЧС России» [10–12]. Реализация данной задачи позволит установить зависимости скорости распространения пожарных газов (концентраций газов и температуры) при нестационарных и стационарных процессах тепломассопереноса в горной выработке с учетом ее геометрических размеров (геометрии), условий (режимов) проветривания, а также коэффициентов тепло- и массопереноса при подземном пожаре экзогенного происхождения.

Результаты исследований. При проведении эмпирических исследований используем результаты экспериментов, проведенных в натурных условиях – в штольне ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» при изучении динамики развития экзогенного пожара, в том числе: особенностей распространения газов по длине горной выработки, а также изменения температуры газов по высоте и длине выработки. Штольня состояла из горизонтальной выработки длиной 181 м и сечением 4,2 м², с двумя выходами на поверхность (наклонным и диффузором), вентиляторной установки, насосной камеры с водосборником, электрораспределительного пункта и помещения для измерительной аппаратуры.

В ней устанавливались деревянные неполные крепежные рамы. Для загорания крепи поджигали костры, сложенные из затяжек в начале выработки. Очаг пожара перемещался вдоль выработки по направлению вентиляционной струи. Всего было проведено 10 экспериментов. Скорости вентиляционного потока составляли 0,6; 1,0; 1,75; 2,1; 3,2 и 5,2 м/с. Температура пожарных газов изменялась с течением времени и определялась по показаниям термпар, установленным на 23 замерных станциях по длине штольни, а также по высоте штольни в трех точках (у кровли, у почвы и в центре). Изменение концентраций газов при пожаре с течением времени исследовалось путем дистанционного отбора проб воздуха по трубопроводам, установленным на девяти замерных станциях по длине штольни, и дальнейшего их газового анализа [11, 12].

Результаты экспериментов были обработаны в программах Microsoft Office (Excel), Mathcad, Origin и других. Установлены зависимости температуры и концентраций пожарных газов, которые позволяют определять характер и кинетику их распределения вдоль горной выработки. Сравнение результатов измерений средней температуры в горной выработке при наличии очага пожара с результатами теоретического расчета осуществлялось согласно формулам, аналогичным выражению (3) из работы [10], приняв вместо концентрации газа – температуру, поскольку уравнения (7) и (8) из работы [10] описывают стационарное распределение температуры по длине выработки. Кинетика теплопереноса была проанализирована численно при использовании точного решения уравнения теплопроводности из работы [10]:

$$C(x, t) = 0,5 \left\{ 1 + \Phi \left(\frac{ut - x}{2\sqrt{D_x t}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{D_x} \right) \left[1 - \Phi \left(\frac{ut + x}{2\sqrt{D_x t}} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где C – концентрация газа, кг/м³;

x – продольная координата в горной выработке шахты, м;

t – время с момента начала отсчета, с;

Φ – интеграл вероятности, 1;

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

D_x – коэффициент турбулентной диффузии газов по выработке, м²/с.

При отсутствии проветривания горной выработки (скорость $u = 0$) решение уравнения (1) принимает вид:

$$C(x, t) = 1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{D_x t}} \right). \quad (2)$$

На рис. 1 представлены зависимости температуры воздуха от времени и расстояния от очага пожара. Предполагается, что очаг пожара находится в начале координат, температура в очаге составляет 1000°C , длина выработки 150 м, скорость вентиляционной струи 0,6 м/с. Сравнение позволило установить, что полученные расчетным методом результаты аналогичны экспериментальным данным распределения температуры пожарных газов по длине штольни. Следовательно, представляется возможным определять скорость изменения температуры пожарных газов в горной выработке на определенном расстоянии от очага пожара.

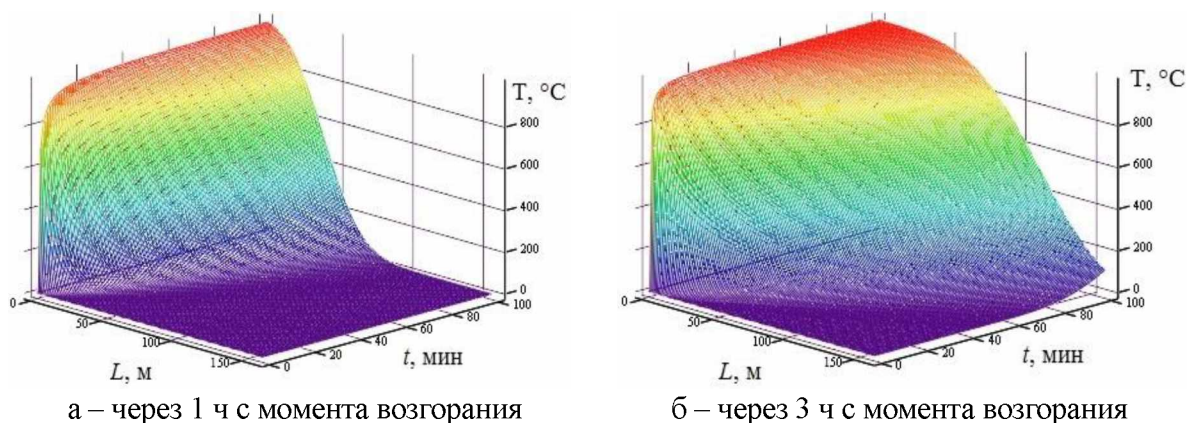


Рис. 1. Зависимости температуры воздуха от времени и расстояния от очага пожара

В работе [10] приведены зависимости концентраций метана и оксида углерода от времени и расстояния от очага пожара, полученные на основе экспериментальных данных и в результате расчетов. Соответственно, актуальным является установление зависимостей концентраций водорода, диоксида углерода и кислорода от времени и расстояния от очага пожара. Поэтому в табл. 1–3 представлены результаты восьми экспериментов об изменении состава (распространении) газов на различных расстояниях по длине выработки от очага пожара (усредненные по совокупности экспериментов) [11, 12]. Относительная погрешность измерений, по результатам усреднения, не превышает 15 %. Выполнен теоретический расчет динамики концентраций пожарных газов по длине выработки. Обработка данных экспериментов и расчет выполнены для каждого из газов. На рис. 2–4 графически представлены экспериментальные результаты измерений концентраций газов (водорода, диоксида углерода и кислорода) во времени на различных расстояниях по длине выработки от очага пожара и расчетные кривые. Расчет выполнен согласно формуле (1).

Иллюстрация результатов расчета распространения пожарных газов по выработке при скорости вентиляционной струи 0,6 м/с представлена на рис. 5. Установлено, что для повышения концентраций пожарных газов с момента их появления из источника газовой выработки до максимальных значений в целом достаточно 1 ч. Для заполнения пожарными газами выработки длиной 150 м достаточно 3 ч.

Скорость распространения пожарных газов зависит (в основном) от режима проветривания, и в небольшой (меньшей) степени – от коэффициентов диффузии отдельных газов. Заметное влияние коэффициентов диффузии сказывается на начальном этапе повышения концентраций газов в определенном месте выработки, то есть – на границе фронта продвижения газов.

Таблица 1

Изменение концентраций водорода в штольне

Время, мин	Длина штольни, м								
	10	15	30	50	80	100	130	150	165
0	5,3	3,1	3,4	2,5	2,3	2,48	2,2	2,52	2,25
10	3,09	4,27	1,49	1,89	2,05	2,19	2,35	2,8	2,67
20	3,5	3,7	3,3	2,96	2,79	2,91	3,1	2,62	3,11
30	2,57	2,5	3,57	3,02	2,91	3,28	3,27	3,38	3,19
40	0,12	1,77	3,38	2,96	2,85	3,2	3,44	5,0	3,02
50	0,14	0,8	2,06	3,77	2,62	3,35	3,2	3,83	2,92
60	0,14	0,15	0,67	3,17	2,25	4,4	4,3	3,43	4,4
70	0	0,12	0,23	3,15	3,16	3,2	4,5	4,16	4,0
80	0	0,1	0,59	5,3	3,1	3,3	2,93	4,16	2,43
90	0	0,1	0,1	6,0	4,85	3,05	1,77	3,37	2,29
100	0	0	0,1	3,4	3,3	3,4	3,1	2,16	1,82
110	0	0	0	0,36	5,5	4,2	3,55	3,12	2,92
120	0	0	0	0	6,4	2,35	4,0	3,08	2,83
150	0	0	0	0	5,9	2,0	0,74	1,35	1,2
180	0	0	0	0	0,14	2,1	1,7	2,2	1,1
210	0	0	0	0	0	0,16	0,26	0,24	0,2

Таблица 2

Изменение концентраций диоксида углерода в штольне

Время, мин	Длина штольни, м								
	10	15	30	50	80	100	130	150	165
0	4,7	3,45	4,5	4,17	4,37	4,3	4,15	5,3	4,93
10	11,9	11,95	10,42	10,22	12,12	12	11,1	11,92	10,76
20	12,38	15,2	16,34	16,36	16,78	16,4	16,68	16,89	16,64
30	9,04	11,74	13,48	15,35	16,62	15,94	16,56	17,07	16,88
40	5,8	15	11,7	14,84	16,04	16,24	16,56	17	16,18
50	4,44	6,7	12,64	15,94	17,26	16,94	16,36	16,98	17,02
60	3,85	4,66	11,08	13,06	14,4	14,44	15,1	15,9	14,58
70	2,98	4,27	6,52	11,08	12,85	13,4	14,16	14,58	14,07
80	2,48	2,58	6,3	8,22	7,8	11,36	12,12	12,86	13,58
90	1,38	2,34	5,6	7,38	9,15	9,76	11,05	13,02	12,4
100	1,22	1,56	2,98	6,24	8,2	8,48	11,48	12,12	10,3
110	1,42	1,25	2,42	5,44	7,26	7,18	9,88	11,18	9,08
120	0,28	0,94	1,82	4,06	5,72	7,8	8,58	10,17	8,23
150	0,6	0,75	2,1	3,2	6,9	9,16	12,03	16,35	10,6
180	5	5,2	2,85	3,75	4,05	6,65	7,99	14,3	14,9
210	0,5	0,5	6,1	4,9	6,6	7,5	10	11,2	8,4

Таблица 3

Изменение концентраций кислорода в штольне

Время, мин	Длина штольни, м								
	10	15	30	50	80	100	130	150	165
0	15,07	16,77	15,57	15,82	15,52	16,0	16,02	14,7	14,7
10	6,0	6,65	8,5	8,2	6,68	6,66	7,46	6,72	8,16
20	5,7	3,76	2,72	1,72	1,22	1,24	1,26	0,8	1,98
30	8,4	5,65	3,22	2,52	1,24	1,82	1,1	0,6	1,78
40	13,92	10,3	4,0	1,62	1,34	1,64	1,1	0,66	1,94
50	15,36	12,62	4,07	1,77	1,6	2,06	1,46	1,05	0,85
60	16,25	14,88	5,77	2,8	2,34	2,86	2,33	2,05	3,36
70	16,92	15,7	11,02	6,06	4,21	4,38	5,1	4,55	4,1
80	17,74	17,26	11,86	10,36	8,87	6,97	6,36	6,57	6,77
90	19,14	18,04	13,78	10,94	7,74	8,26	6,67	3,85	5,6
100	19,32	18,76	16,72	12,72	9,64	10,92	7,94	5,1	6,39
110	19,08	19,24	16,26	13,58	11,82	9,4	8,48	6,92	10,06
120	19,32	19,26	17,96	15,48	12,52	9,64	8,82	7,2	8,64
150	20,3	20,3	18,0	17,36	12,23	5,66	0,55	0,7	3,5
180	19,6	13,3	12,8	11,8	9,9	4,5	0,2	0,4	1,3
210	20,2	20,1	12,0	13,2	10,7	10,2	7,0	6,5	8,0

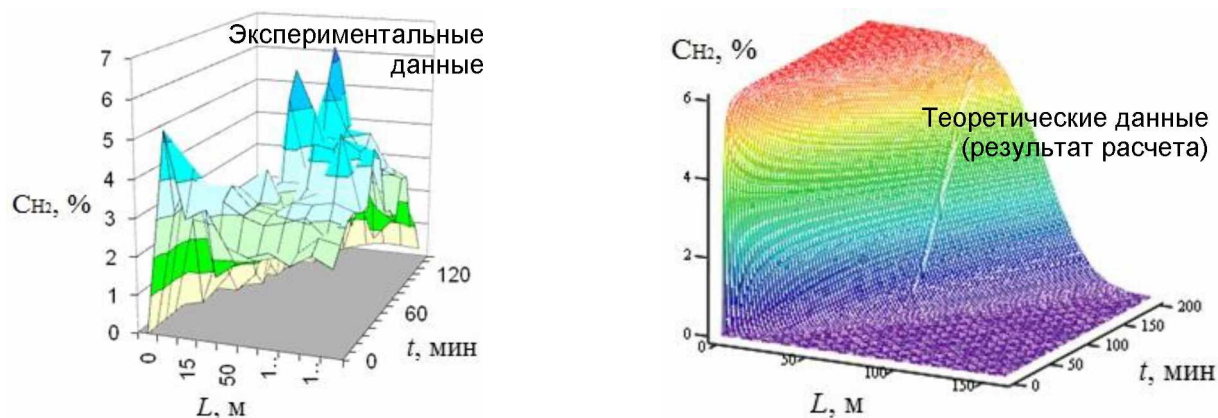


Рис. 2. Зависимость концентраций водорода от времени и расстояния от очага пожара

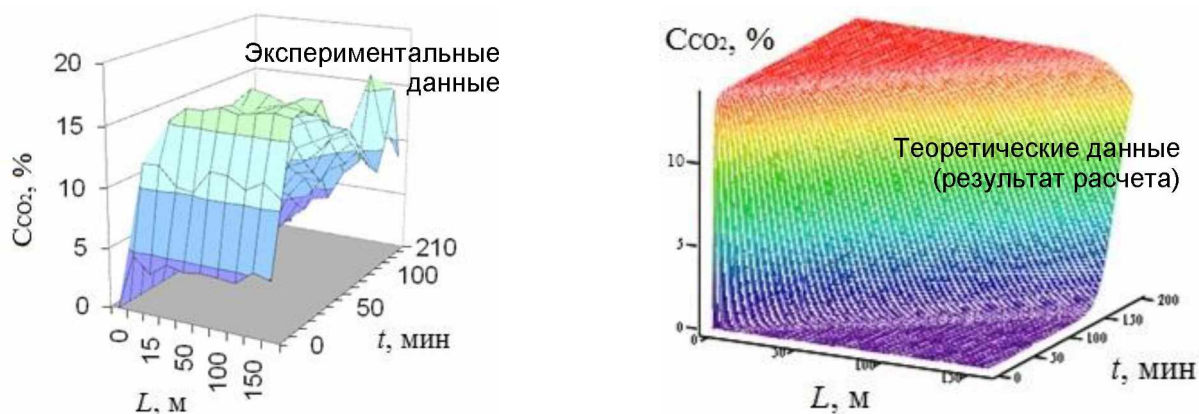


Рис. 3. Зависимость концентраций диоксида углерода от времени и расстояния от очага пожара

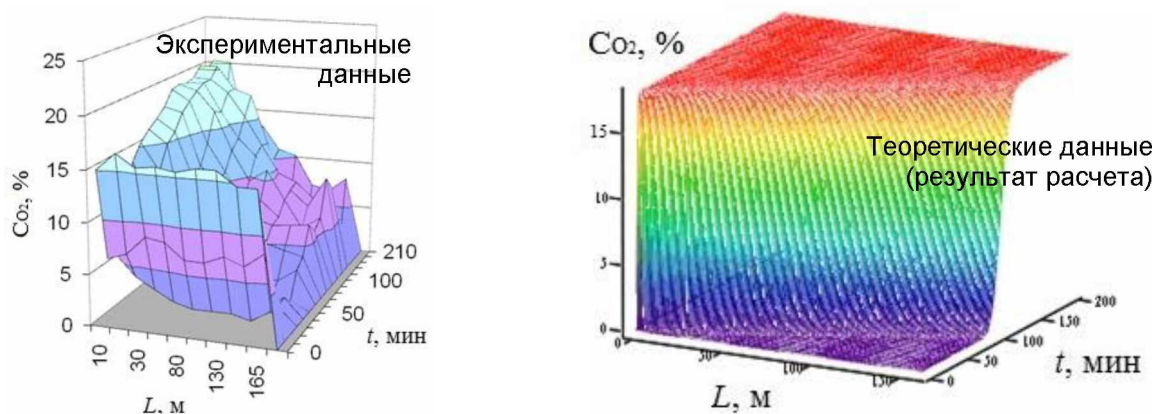


Рис. 4. Зависимость концентраций кислорода от времени и расстояния от очага пожара

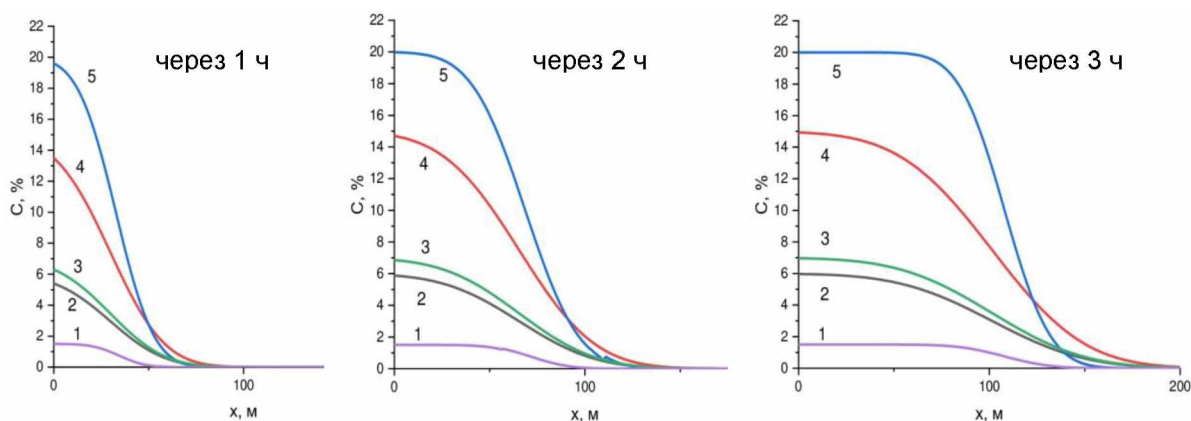


Рис. 5. Зависимости концентраций газов от длины выработки и времени после начала возгорания древесины: 1 – метан; 2 – водород; 3 – оксид углерода; 4 – диоксид углерода; 5 – кислород

Результаты экспериментов позволяют наглядно проиллюстрировать ход процесса и выявить закономерности распространения газов по длине штольни. На рис. 6 показано, как с течением времени изменяется газовая обстановка на различных расстояниях штольни. Для иллюстрации были выбраны данные второго из десяти экспериментов [11, 12], чтобы представить целостную картину распространения газов в штольне. В остальных экспериментах ситуация была аналогичной.

Анализируя графики на рис. 5 и рис. 6 можно отметить, что повышение концентраций всех газов в объеме выработки при наличии очага пожара (за исключением кислорода) происходит практически с одинаковой скоростью. Наибольших значений достигают максимальные концентрации оксида и диоксида углерода, при этом максимальная концентрация диоксида углерода (15...20 %) более чем в шесть раз превосходит концентрацию водорода и метана, и более чем в три раза превосходит концентрацию оксида углерода. Кроме того, зона высокой (сравнимой с максимальной) концентрации оксида углерода в два раза меньше, чем соответствующая зона для диоксида углерода. Наблюдаемые отличия от теоретических расчетов связаны с тем, что ранее представленная математическая модель переноса тепла и газов [10] не предусматривает учет химических превращений газов в зоне горения и за ее пределами, описывая закономерности массопереноса в выработке, как доминирующего процесса.

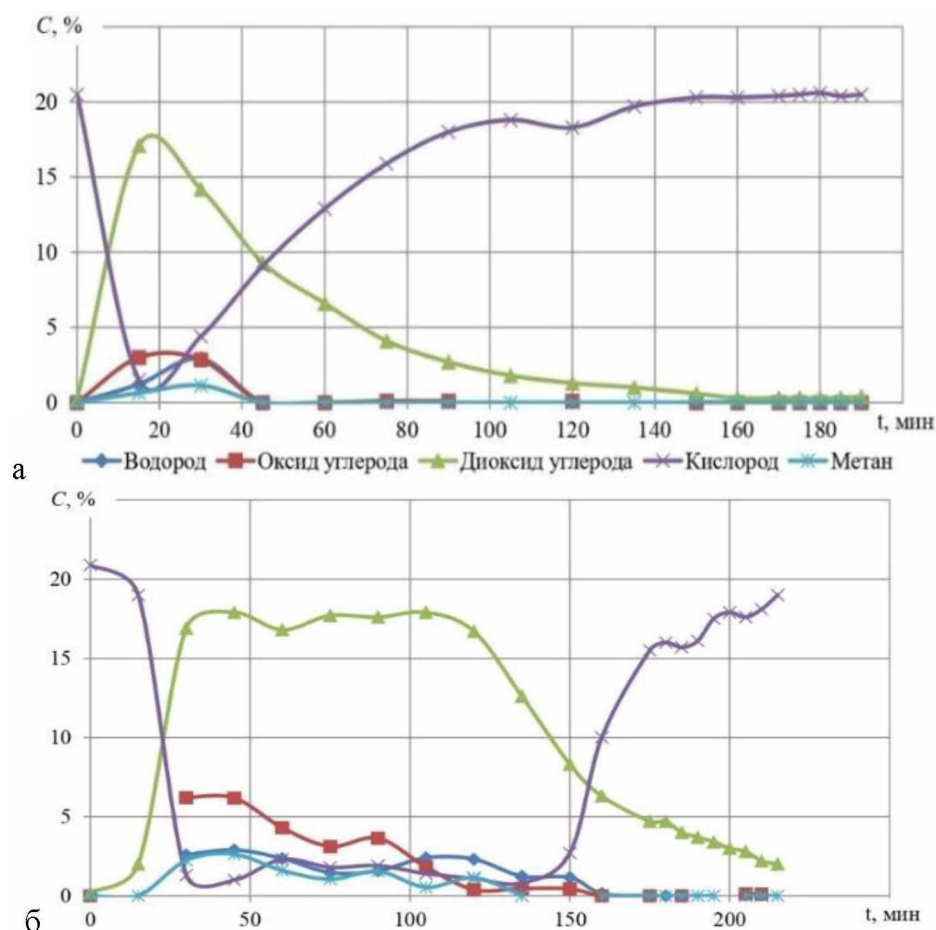


Рис. 6. Зависимости концентраций газов от времени на расстоянии 15 м (а) и 80 м (б) от очага пожара при проведении экспериментальных исследований

Согласно данным на рис. 1–6, результаты расчета в целом совпадают с данными, полученными при выполнении экспериментов. Расхождения находятся в пределах относительной погрешности и обусловлены зависимостью результатов измерений концентраций газов от условий проведения эксперимента, которые сложно воспроизвести идентично. На результаты измерений в каждом конкретном эксперименте оказывают влияние такие условия, как температура, скорость и направление воздуха, а также другие [10–12]. Поэтому наблюдаемые расхождения объяснимы (обоснованы) и не снижают возможности определения скорости распространения пожарных газов при возникновении очага пожара в выработке.

Результаты анализа восьми экспериментов в штольне [11, 12] предоставили значительный объем информации об изменении температуры пожарных газов по высоте и длине выработки при развитии пожара, а также изменении концентраций газов (метана, оксида и диоксида углерода, водорода и кислорода) во времени на различных расстояниях по длине горной выработки от очага пожара. Сравнение теоретических данных с результатами экспериментов позволило подтвердить достоверность математических моделей переноса тепла и газов [10], и установить, что максимальная относительная погрешность не превышает 15 %.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, установлены зависимости скорости распространения пожарных газов (концентраций газов и температуры) при нестационарных и стационарных процессах тепломассопереноса в горной выработке с учетом ее геометрических размеров

(геометрии), условий (режимов) проветривания, а также коэффициентов тепло- и массопереноса при подземном пожаре экзогенного происхождения.

Перспективное направление дальнейших исследований – разработка трехмерных моделей тепломассообменных процессов в горных выработках шахт и рудников при авариях и аварийных ситуациях, а также сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований в условиях опытных полигонов и горных предприятий.

Список литературы / References

1. Федоренко, Е. И. Проблема подземных пожаров и их тушения на больших глубинах в угольных шахтах / Е. И. Федоренко, С. С. Кобылкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S7. – С. 197–207. – EDN ONBWTF.

Fedorenko, E. I., Kobylkin, S. S. *Problema podzemnykh pozharov i ikh tushenie na bolshikh glubinakh v ugolnykh shakhtakh* [The problem of underground fires and their extinguishing at great depths in coal mines]. Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal), 2011, no. S7, pp. 197–207. (In Russian)

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

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

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

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

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

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

5. Брюм, В. З. Методика расчёта параметров подземного пожара по данным мониторинга / В. З. Брюм // Горноспасательное дело. – 2014. – № 1(51). – С. 106–115. – EDN WAEVVB.

Bryum, V. Z. *Metodika rascheta parametrov podzemnogo pozhara po dannym monitoringa* [Methods of calculation of parameters of an underground fire according to monitoring data]. Mining rescue work, 2014, no. 1(51), pp. 106–115. (In Russian)

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

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

7. Пашковский, П. С. Единый подход к решению задач теплогазообмена при пожарах на различных объектах / П. С. Пашковский, С. П. Греков, И. Н. Зинченко // Bezpieczenstwo

i Technika Pozarnicza. – 2016. – Т. 44, № 4. – С. 83–88. – DOI 10.12845/bitp.44.4.2016.6. – EDN YMDAOV

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

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

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

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

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

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

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

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

Pashkovsky, P. S., Lebedev, V. I. *Provetrivanie shaht pri podzemnykh pozharah* [Ventilation of mines in case of underground fires]. Donetsk, Private enterprise Arpi, 2012, 448 p. (In Russian)

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

Simonov, A. M., Agarkov, A. V. *Eksperimental'nye issledovaniya distancionnogo kontrolya shahtnoj sredy v usloviyakh shtol'ni i podzemnogo poligona* [Experimental studies on remote control of the mining environment in the conditions of the shuttle and underground range]. Civil Defence Academy Journal, 2021, no. 2 (26), pp. 74–83. (In Russian)

Дата поступления рукописи 14.04.2026
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым

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

Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 332-78-39

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

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Donetsk Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia»

283050, Donetsk, Rosa Luxembourg St., 34A. Phone: +7 (949) 300-37-29

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

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia»

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

Alexander Nikolaevich Chovan, *Post-graduate student, Head specialist;* e-mail: sasha.chovan@mail.ru
The Main Directorate of the Russian Ministry of Emergency Situations in the Donetsk People's Republic
283050, Donetsk, Shchorsa St., 60. Phone: +7 (949) 317-92-22

EMPIRICAL STUDIES OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A MINING WORKING DURING A FIRE

Purpose. Conducting empirical studies of heat and mass transfer processes in a mine working during a fire to establish the dependencies of temperature and gas concentrations during non-stationary and stationary propagation of heat and gases, taking into account the conditions (modes) of ventilation, heat and mass transfer coefficients, as well as the geometric dimensions (geometry) of the workings of the emergency section of the coal mine.

Methods. Analytical, theoretical and experimental methods were used to study heat and mass transfer processes with the results being processed using the software packages Microsoft Office (Excel), Mathcad, Origin and others.

Results. A comparison of theoretical data with the results of experimental studies of the dynamics of underground fires in adit conditions made it possible to confirm the reliability of mathematical models of heat and gas transfer in a mine working in the presence of a fire source with a maximum relative error not exceeding (no more than) 15 %.

Scientific novelty. The dependences of the rate of propagation of fire gases (gas concentrations and temperature) during non-stationary and stationary processes of heat and mass transfer in a mine working are established, taking into account its geometric dimensions (geometry), ventilation conditions (modes), as well as heat and mass transfer coefficients during an underground fire of exogenous origin.

Practical value. Obtaining reliable data on gas dynamics throughout a mine working with sources of gas emission during a fire will improve the safety of mine rescuers and the effectiveness of emergency rescue operations.

Keywords: *mine working; experimental adit; underground fire; heat and mass transfer process; empirical research.*

For citation. Agarkov A. I., Efimenko V. L., Evteev D. S., Chovan A. N. Empirical studies of heat and mass transfer processes in a mine working during a fire. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 33-43. EDN RCUEMK

II. Безопасность труда

УДК 622.281.42:666.971.16

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ШАХТНЫХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

Цель. Исследование влияния суперпластификатора на физико-механические свойства быстротвердеющего материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек с применением технологии послойной укладки.

Методы. Оценку подвижности раствора выполняли методом расплыва конуса. Определение сроков схватывания раствора, предела прочности на сжатие и изгиб отвержденного материала проводили с применением стандартных методов.

Результаты. Исследовано влияние пластифицирующей добавки карбоксил ПК-3 на физико-механические свойства быстротвердеющего материала. Экспериментально обосновано рациональное содержание пластифицирующей добавки в цементно-шлаковой смеси при водовязущем отношении 0,37.

Научная новизна. Впервые установлена зависимость влияния пластифицирующей добавки карбоксил ПК-3 на изменение диаметра расплыва цементно-шлакового раствора на основе сырьевых материалов Донецкого региона – портландцемента и доменного шлака металлургического завода.

Практическая значимость. Результаты экспериментальных исследований позволили обосновать выбор модифицирующих добавок в части улучшения физико-механических свойств материала для возведения в шахтах взрывоустойчивых перемычек и оптимизировать его компонентный состав.

Ключевые слова: диаметр расплыва; прочность на сжатие и при изгибе; карбоксилатный суперпластификатор; подвижность раствора; сроки схватывания раствора; цементная смесь.

Для цитирования: Агеев В. Г., Лебедева В. В., Храпоненко О. В., Щербакова О. Н. Оценка влияния пластифицирующей добавки на свойства материала шахтных взрывоустойчивых перемычек // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 44–50. – EDN SPMODV

Постановка проблемы. Изоляция горных выработок опасных в отношении взрывов газовоздушной смеси может быть обеспечена путем возведения взрывоустойчивых перемычек послойной укладкой раствора без опалубки. Особенности безопалубочного способа позволяют уменьшить трудозатраты, сократить сроки возведения перемычки и повысить уровень безопасности работ. Такой способ возведения предполагает использование материалов, свойства которых соответствуют специфике послойной или аддитивной технологии [1] и в значительной мере зависят от физико-химических свойств сырьевых компонентов [2]. Технологические параметры растворных смесей регулируют химическими добавками, к которым относят супер- и гиперпластификаторы на основе поликарбоксилатов [3–5]. Такие добавки обеспечивают необходимую подвижность и сроки схватывания раствора без снижения прочности затвердевшего материала.

Эффективность пластифицирующих добавок во многом зависит от химического состава и механизма пластификации, вида вяжущей системы, условий твердения, совместимости компонентов растворной смеси и от других факторов [6–9]. Из этого следует, что для конкретной вяжущей системы и технологии возведения взрывоустойчивых перемычек пластифицирующую добавку целесообразно подбирать экспериментальным путем в соответствии с требуемыми свойствами материала перемычки.

Анализ последних исследований и публикаций. Изучению эффективности современных поликарбоксилатных пластифицирующих добавок в бетонах на портландцементе посвящены работы [10–12]. Поскольку минералогический состав и свойства портландцементов различных производителей значительно отличаются [13], универсального пластифицирующего модификатора в технологии строительных смесей не существует, что подтверждается результатами исследований различных классов добавок – лигносульфонатов, поликарбоксилатных эфиров и нанодобавок [14]. Поэтому исследование влияния суперпластификатора на свойства вяжущей системы, содержащей портландцемент и доменный шлак, представляет актуальную научно-практическую задачу.

Цель работы. Исследование влияния суперпластификатора на физико-механические свойства быстротвердеющего материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек с применением технологии послойной укладки.

Методика эксперимента. В исследованиях использованы материалы:

- бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5Н;
- доменный шлак металлургического производства;
- ускоритель твердения;
- карбоксил ПК-3 – химическая суперпластифицирующая добавка на основе ускорителя набора прочности и поликарбоксилатовых полимеров с длинной боковой цепью;
- метакраолин ВМК-45 – активная минеральная добавка.

Подвижность цементно-шлакового раствора определяли согласно [9], сроки схватывания, прочность на изгиб и сжатие образцов – согласно стандартным методикам. Расчет концентрации карбоксила ПК-3 и воды затворения производили от суммарной массы портландцемента и метакраолина. Пластифицирующую добавку и ускоритель твердения вводили в смесь в виде водного раствора. К важным свойствам, изменяющим кинетику гидратации растворной смеси, относят начало и окончание схватывания [15]. Поэтому были исследованы процессы схватывания раствора на основе контрольного состава – без карбоксила ПК-3, и с введением различных концентраций пластифицирующей добавки в цементно-шлаковую смесь.

Результаты исследований. Регулирование физико-механических свойств раствора с достижением высокой ранней прочности материала проводили через 5...6 ч твердения. Получение высоких прочностных показателей через 3...28 сут твердения материала не являлось первостепенной задачей настоящего исследования.

Повышенную вязкость раствора, вызванную введением в смесь мелкодисперсного метакраолина, можно снизить двумя путями – увеличением содержания воды затворения или применением суперпластификатора. Поскольку увеличение водотвердого отношения приводит к значительному снижению механической прочности материала, исследовали влияние пластифицирующей добавки на физико-механические свойства. Среди большого многообразия

современных пластифицирующих добавок для исследований выбран карбоксил ПК-3 – суперпластифицирующая и суперводоредуцирующая добавка с эффектом ускорения процесса твердения бетонов, которая наиболее эффективно работает с бездобавочными цементами и цементами I и II группы. Кроме того, согласно технологическому описанию завода-изготовителя, карбоксил ПК-3 относится к малоопасным веществам (4-й класс опасности) и не является взрывопожароопасной жидкостью. Такие характеристики позволяют использовать добавку в подземных условиях угольных шахт.

Влияние содержания карбоксила ПК-3 в растворной смеси на физико-механические свойства, в том числе на сроки схватывания раствора, исследовано в диапазоне концентраций добавки 1,5...3,5 % от массы цемента и метакеолина (табл. 1).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Содержание карбоксила ПК-3 в растворной смеси, масс. %	Сроки схватывания, мин		Время твердения, мин	В / (Ц + М)*
	начало	конец		
1,5	120	149	29	0,37
1,7	128	185	57	0,37
2,0	130	215	85	0,37
2,5	205	225	75	0,36
3,5	220	260	40	0,35

Примечание. * В / (Ц + М) – водовязущее отношение (отношение массы воды к массе цемента и метакеолина).

С повышением содержания карбоксила ПК-3 от 1,5 до 3,5 масс. % в растворной смеси сроки схватывания увеличивались при практически одинаковом водосодержании ~0,36...0,37. Наиболее короткий период времени схватывания установлен для растворной смеси, содержащей 1,5 масс. % карбоксила ПК-3 при водовязущем отношении 0,37, и 3,5 масс. % – при 0,35. Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили целесообразность выбора содержания пластифицирующей добавки – 1,5 масс. % в смеси при водовязущем отношении 0,37, обусловленного конечным эффектом ее воздействия.

Влияние содержания карбоксила ПК-3 на подвижность раствора оценивали по изменению диаметра расплыва миниконуса (рис.). Увеличение содержания карбоксила ПК-3 в растворной смеси от 1,5 до 3,5 масс. % привело к существенному повышению подвижности раствора – значение диаметра расплыва увеличилось с 73 до 80 мм.

Для сравнительной оценки физико-механических свойств составов с карбоксилем ПК-3 и без пластифицирующей добавки проведены дополнительные экспериментальные исследования. Физико-механические свойства включали такой важный параметр, как тиксотропия раствора – свойство вяжущей системы обратимо восстанавливать свою исходную структуру, разрушенную механическим воздействием. Оценку способности раствора к тиксотропии проводили с использованием метода расплыва конуса по изменению значения диаметра

расплыва через 1 мин, 5 мин и 10 мин после снятия формы-конуса. Диаметр расплыва измеряли после снятия формы в двух перпендикулярных направлениях (наибольший и наименьший размер распространения расплыва) и вычисляли среднее из двух полученных значений (табл. 2).

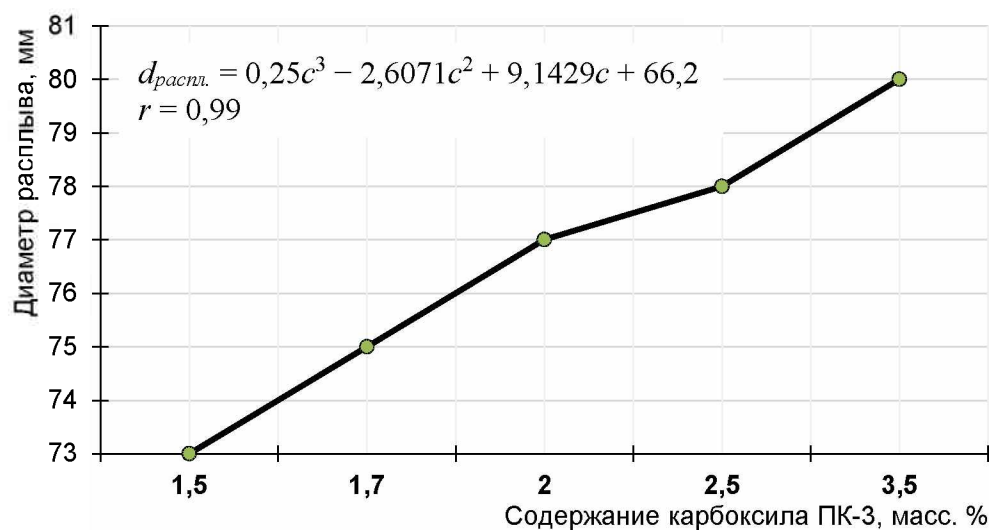


Рис. Изменение диаметра расплыва от содержания карбоксила ПК-3 в растворяющей смеси

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Показатель		Состав	
		контрольный	с карбоксилом ПК-3
Диаметр расплыва, мм	через 1 мин	80	73
	через 5 мин	83	73
	через 10 мин	83	73
Сроки схватывания, мин	начало	100	128
	конец	139	157
Время твердения, мин		39	29
Прочность при изгибе, МПа	через 4 ч твердения	0,6	1,2
	через 5 ч твердения	0,8	1,8
	через 6 ч твердения	1,1	2,7
Предел прочности при сжатии, МПа	через 4 ч твердения	1,2	1,5
	через 5 ч твердения	1,8	3,6
	через 6 ч твердения	2,7	5,8
В / (Ц + М)*		0,43	0,37

Примечание. * В / (Ц + М) – водовязующее отношение (отношение массы воды к массе цемента и метаксаолина).

Введение пластифицирующей добавки способствовало увеличению времени начала схватывания и улучшению тиксотропных свойств раствора, а также сокращению времени набора ранней прочности по сравнению с контрольным составом (табл. 2). После 5...6 ч выдержки экспериментальных образцов в условиях естественного твердения¹ пределы прочности при сжатии и изгибе пластифицированного материала увеличились в два раза по сравнению с контрольным составом. Прочность на сжатие пластифицированного материала составила 3,6...5,8 МПа, что соответствует требованиям к материалам для возведения в шахтах взрывоустойчивых перемычек, ранняя прочность на одноосное сжатие которых должна быть не менее 3 МПа.

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование поликарбоксилатного суперпластификатора карбоксил ПК-3 в сочетании с активной минеральной добавкой – метакеолином – позволяет добиться улучшения физико-механических свойств растворной смеси.

Кроме того, такая наполненная система обладает более выраженной тиксотропностью по сравнению с контрольным ненаполненным составом, что является важным преимуществом материала для послойного безопалубочного возведения перемычки. Время начала схватывания пластифицированной растворной смеси позволяет транспортировать ее по трубопроводу на значительные расстояния к месту возведения перемычки. В дальнейшем в течение 30 мин раствор схватывается и начинает интенсивно твердеть.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Результаты экспериментальных исследований позволили установить оптимальное содержание карбоксила ПК-3 в цементно-шлаковом составе, при котором происходит ускорение процесса набора необходимой прочности на ранних стадиях твердения.

Физико-механические свойства пластифицированного цементно-шлакового состава позволяют рассматривать его как основу эффективного быстротвердеющего материала для шахтных взрывоустойчивых перемычек путем дополнительной модификации различными функциональными добавками.

Список литературы / References

1. Коротеев, Д. Д. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью / Д. Д. Коротеев, А. И. Коренева // Системные технологии. – 2021. – № 2 (39). – С. 21–30.

Koroteev, D. D., Koreneva, A. I. [An experimental study of the additive manufacturing technology application in the construction industry using the example of 3D-model design and printing]. System Technologies, 2021, no. 2(39), pp. 21-30. (In Russian)

2. Влияние активных пуццолановых наполнителей на свойства мелкозернистого цементного бетона / С. В. Макаренко, Б. М. Лозовский, О. В. Хозряков, В. Г. Хозин // Известия Казанского архитектурно-строительного университета. – 2020. – № 3 (53). – С. 39–46.

Makarenko, S. V., Lozovskiy, B. M., Khozryakov, O. V., Khozin, V. G. [The effect of active pozzolanic fillers on the properties of fine-grained cement concrete]. News Kazan State University of Architecture and Engineering, 2020, no. 3(53), pp. 39-46. (In Russian)

3. Тараканов, О. В. Химические добавки в растворы и бетоны / О. В. Тараканов. – Пенза : ПГУАС, 2016. – 156 с.

¹ ГОСТ 31357-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия»

Tarakanov, O. V. [Chemical Additives in Solutions and Concretes]. Penza, PGUAS Publ., 2016, 156 p. (In Russian)

4. Виноградова, Л. А. Исследование влияния суперпластификатора СП-2ВУ на строительно-технологические показатели бетона / Л. А. Виноградова, Ю. П. Русакова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 3. – С. 93–99.

Vinogradova, L. A., Rusakova, Yu. P. [The effect of superplasticizer SP-2VU on construction and engineering properties of concrete]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 93–99. (In Russian)

5. Майоров, А. Г. Модифицирующие добавки для бетона: виды, применение / А. Г. Майоров, Ш. А. Нурмагомедов // Актуальные исследования. – 2022. – №50 (129), ч. I. – С. 63–70.

Mayorov, A. G., Nurmagomedov, Sh. A. [Modifying additives for concrete: types, application]. Current Research, 2022, no. 50 (129), part I, pp. 63–70. (In Russian)

6. Юхневский, П. И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П. И. Юхневский. – Минск : БНТУ, 2013. – 310 с. – ISBN 978-985-550-224-2.

Yukhnevsky, P. I. [The Influence of the Chemical Nature of Additives on Concrete Properties]. Minsk, BNTU Publ., 2013, 310 p. ISBN 978-985-550-224-2. (In Russian)

7. Мухаметрахимов, Р. Х. Влияние портландцементов с различным минералогическим составом на основные свойства композитов, сформированных методом послойного экструдирования (3D-печати) / Р. Х. Мухаметрахимов, Л. В. Лукманова // Известия Казанского архитектурно-строительного университета. – 2021. – № 2 (56). – С. 37–49. – DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37.

Mukhametrakhimov, R. Kh., Lukmanova, L. V. [Influence of portland cements with different mineralogical composition on basic properties of 3D-printed composites]. News Kazan State University of Architecture and Engineering, 2021, no. 2(56), pp. 37–50. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. (In Russian)

8. Mukhametrakhimov, R. K., Lukmanova, L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021; no. 102 (2). pp. 102–106. DOI:10.34910/MCE.102.6. (In English)

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

Lebedeva, V. V., Khraponenko, O. V., Shcherbakova, O. N. [Influence of metakaolin on the properties of fast-setting material explosive-resistant sealings]. Scientific Bulletin of the NII «Respirator», 2025, no. 4 (62), pp. 58–63. EDN PHMDUK (In Russian)

10. Мухаметрахимов, Р. Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати / Р. Х. Мухаметрахимов // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 42–58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58.

Mukhametrakhimov, R. Kh. [Investigation of plasticizing additives based on polycarboxylate esters on the properties of concretes formed by 3D-printing]. Construction Materials and Products, 2022, vol. 5, no. 5, pp. 42–58. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58. (In Russian)

11. Lei, L., Plank, J. A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance. Cement and Concrete Research. 2012; no. 10(42), pp. 1299–1306. (In English)

12. Schröfl, C., Gruber, M., Plank, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). Cement and Concrete Research. 2012; no. 10(42), pp. 1401–1408. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.08.013. (In English)

13. Морозова, Н. Н. Влияние цементов разных производителей на свойства ячеисто-бетонной смеси автоклавного газобетона / Н. Н. Морозова, Г. В. Кузнецова, А. К. Голосов // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 49–51.

Morozova, N. N., Kuznetsova, G. V., Golosov, A. K. [Influence of cements from different producers on properties of cellular-concrete mix of autoclaved gas concrete]. *Stroitel'nye Materialy*, 2014, no. 5, pp. 49-51. (In Russian)

14. Оценка эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона // В. Н. Тарасов [и др.] // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 1–12.

Tarasov, V. N., Gusev, B. V., Petrunin, S. Yu., Korotkova, N. P., Garnosov, A. P. [Performance assessment of polycarboxylate superplasticizers for concrete manufacturing]. *Journal of Science and Education of North-West Russia*, 2018, no. 1 (4), pp. 1-12. (In Russian)

15. Лебедева, В. В. Быстротвердеющий материал для возведения околострековых полос / В. В. Лебедева // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 3 (62). – С. 59–65. – EDN POOLMG

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. (In Russian)

Дата поступления рукописи 06.02.2026

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

Vladimir Grigorievich Ageev, Dr. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: v.ageev@80.mchs.gov.ru

Victoria Valentinovna Lebedeva, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru

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

Oksana Nikolaevna Shcherbakova, Research Associate; e-mail: o.shcherbakova@80.mchs.gov.ru

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

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

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF A PLASTICIZING ADDITIVE ON THE PROPERTIES OF A MATERIAL FOR MINE EXPLOSION-PROOF CROSSCUTS

Objective. Experimental studies of the effect of a superplasticizer on the physical and mechanical properties of a fast-hardening material for the construction of mine explosion-resistant lintels using layer-by-layer technology.

Methods. Determination of normal consistency and flow of mortar by the truncated mini-cone slump test. Standard methods for determining the setting time, flexural strength, and compressive strength of hardened material.

Results. The influence of the plasticizing additive carboxyl PC-3 on the physico-mechanical properties of a rapid-hardening material was investigated. The rational content of the plasticizing additive in a cement-slag mixture at a water-binder ratio of 0.37 was experimentally substantiated.

Scientific novelty. The dependence of the plasticizing additive carboxyl PC-3 on the change in the flow diameter of cement-slag mortar, based on raw materials from the Donetsk region – Portland cement and blast furnace slag from a metallurgical plant – has been established

Practical significance. The results of experimental studies made it possible to substantiate the choice of modifying additives for improving the physicomachanical properties of the material used for constructing explosion-proof stoppings in mines, and to optimize its component composition

Keywords: *slump diameter; compressive and flexural strength; carboxylate superplasticizer; mortar workability; setting time; cementitious mixture.*

For citation: Ageev V. G., Lebedeva V. V., Khraponenko O. V., Shcherbakova O. N. Assessment of the impact of a plasticizing additive on the properties of a material for mine explosion-proof crosscuts. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 44-50. EDN SPMODV

УДК 331.45

Анатолий Иосифович Фомин, д-р техн. наук, профессор кафедры; e-mail: fai.aotp@kuzstu.ru
Александр Иванович Копытов, д-р техн. наук, профессор кафедры; e-mail: kai.spssh@kuzstu.ru
Владимир Геннадьевич Михайлов, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой;
e-mail: mvg.eohp@kuzstu.ru

Ренат Рашитович Рафиков, аспирант, e-mail: renat_rafikov@bk.ru

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»
650000, Кемеровская область, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел.: +7 (3842) 39-63-70*

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРЕЗ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЗМА ПЕРСОНАЛА

Цель. Исследовать процессы воздействия вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса на параметры организма работников, осуществляющих трудовую функцию для оптимизации безопасного поведения персонала на производстве.

Методы. Исследование базируется на современных представлениях о безопасном или опасном поведении работника на рабочих местах при осуществлении трудовой деятельности.

Результаты. Проведенные исследования позволяют оптимизировать и улучшать условия труда на рабочих местах, снижать уровень аварийности, травматизма, потери рабочего времени, создать комфортные условия для сохранения жизни и здоровья персонала

Научная новизна. Предложен способ оперативного определения местоположения работника и воздействие на него вредных и опасных факторов, что позволит на основе применения интегрированной технологии позиционирования и мониторинга параметров организма персонала выявлять потенциальные опасности в реальном времени и оперативно принимать управляющие действия для снижения профессионального риска работников, повышения безопасности производства.

Практическая значимость. Внедрение интегрированной системы позволяет точно позиционировать работников на производственном объекте и осуществлять мониторинг параметров его организма на рабочих местах с вредными и опасными производственными факторами в реальном времени для снижения профессионального риска, эффективного управления безопасностью производства.

Ключевые слова: позиционирование, вредные производственные факторы, мониторинг организма, умные браслеты, оперативное управление, интегрированные технологии, безопасность труда

Для цитирования: Фомин А. И., Копытов А. И., Михайлов В. Г., Рафиков Р. Р. Повышение безопасности производства через позиционирование и мониторинг параметров организма персонала // Научный вестник НИИ «Респиратор» – 2026. – № 2 (63). – С. 51–57. – EDN SVOQTM

Постановка проблемы. В современных условиях индустриального развития, обеспечение безопасности труда на производстве становится ключевым аспектом, требующим комплексного подхода и инновационных решений. Причиной большинства инцидентов, аварий, травм является сам человек, его состояние, компетентность, умение реагировать на нештатные, аварийные ситуации [1–3]. Поэтому применение интегрированных технологий, объединяющих точное позиционирование и мониторинг параметров организма сотрудников на рабочих местах с повышенным риском, является перспективным научным направлением.

Анализ последних исследований. В последние годы в научной литературе усилилось внимание к вопросам предупреждения профессиональных рисков, связанных не только с воздействием вредных и опасных производственных

факторов, но и с состоянием самого работника в процессе труда. Так, в работе [1] рассмотрены возможности телемедицинских технологий в гигиене труда и профпатологии и показано, что дистанционный контроль показателей здоровья расширяет возможности раннего выявления неблагоприятных изменений состояния работников. Однако в данной работе не рассмотрено сопряжение этих данных с конкретным местоположением работника в производственной среде.

Предложены критерии и алгоритмы установления связи нарушений здоровья с трудовой деятельностью [2]. Это исследование важно с точки зрения диагностики и экспертной оценки профессионально обусловленных нарушений, однако оно ориентировано преимущественно на установление уже сформировавшейся связи «работа – нарушение здоровья» и в меньшей степени затрагивает задачи оперативного предупреждения риска в реальном времени.

Рассмотрены современные технологии сохранения здоровья работников с учетом актуальных профессиональных рисков [3]. Авторы подчеркивают значимость цифровых решений и профилактической направленности охраны труда, но вопросы интеграции мониторинга физиологических параметров с системой позиционирования персонала в опасных производственных зонах раскрыты лишь в общем виде.

Исследована роль человеческого фактора в обеспечении промышленной безопасности на предприятиях угольной промышленности [4]. Авторы обоснованно показывают, что именно поведение, состояние и готовность работника к безопасным действиям нередко становятся определяющими при возникновении инцидентов. Вместе с тем, инструмент, позволяющий одновременно учитывать местонахождение работника и текущие физиологические показатели для оперативного управления риском, в работе не предложен.

Рассмотрено формирование личной системы управления охраной труда работника [5]. Этот подход усиливает субъектную роль самого работника в обеспечении безопасности, однако не решает в полной мере задачу автоматизированного контроля производственной обстановки и состояния персонала на опасных участках.

Ошибкам человека как фактору производственного риска в горнодобывающей промышленности посвящена работа [6], где автор показывает, что значительная часть производственных угроз связана с поведенческими и организационными причинами. Данное положение подтверждает необходимость перехода от реактивных мер к проактивному управлению безопасностью на основе объективных данных о работнике и условиях его пребывания в производственной среде.

Таким образом, анализ представленных публикаций показывает, что в научной литературе достаточно подробно раскрыты отдельные аспекты проблемы: медицинский контроль состояния работников, оценка связи нарушений здоровья с условиями труда, влияние человеческого фактора на безопасность производства, а также профилактика профессиональных рисков. Вместе с тем недостаточно проработан вопрос интеграции технологий позиционирования персонала и мониторинга параметров организма в единую систему оперативного управления безопасностью производства.

Цель исследования. Исследовать процессы воздействия вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса на параметры организма работников, осуществляющих трудовую функцию, для оптимизации безопасного поведения персонала на производстве.

Материалы и результаты исследования. Интеграция позиционирования и мониторинга параметров организма представляет собой взаимодействие двух ключевых технологий для создания комплексной системы мониторинга безопасности и комфорта работников на производстве.

Позиционирование включает в себя использование различных технологий, таких как GPS, RFID, Bluetooth и других, для точного определения местоположения работников на производственном объекте. Эта информация предоставляет данные о перемещении персонала, их нахождении в зонах повышенного риска, а также может использоваться для оптимизации планирования и координации рабочих процессов [7].

Мониторинг параметров организма включает использование «умных браслетов» или других носимых устройств, способных непрерывно измерять различные физиологические показатели сотрудников: частоту сердечных сокращений, уровень стресса, температуру тела и другие параметры, которые отражают состояние здоровья и комфорт человека.

Интеграция этих двух технологий позволяет создать систему, в которой данные о местоположении сотрудников сопрягаются с информацией об их физиологическом состоянии: операторы системы могут не только отслеживать, где находятся сотрудники, но и понимать, как факторы окружающей среды воздействуют на их организм. Применительно к безопасности на производстве такая интеграция позволяет операторам установить места, где сотрудники подвергаются наибольшему воздействию вредных факторов, например, повышенной температуре или вибрации. Эти данные становятся основой для оперативных мер по оптимизации условий труда, а также для разработки проактивных стратегий предотвращения потенциальных опасностей.

Анализ воздействия вредных факторов представляет собой системный процесс, направленный на изучение и оценку воздействия различных негативных факторов на организм работников на производстве, который осуществляют для определения потенциальных угроз здоровью сотрудников и разработки эффективных мер по их предотвращению [6–8]:

- идентификация вредных факторов на производственном объекте – химические вещества, шум, вибрация, высокие или низкие температуры, радиационные излучения и другие;
- оценка уровней экспозиции каждого из факторов на рабочих местах включает в себя измерения концентрации вредных веществ, уровней шума, вибрации и других параметров;
- оценка воздействия на организм на основе изучения научных данных и медицинской литературы по профессиональным заболеваниям и воздействию на различные системы организма для определения последствий каждого вредного фактора для здоровья человека;
- идентификация чувствительных зон производственного объекта, где воздействие вредных факторов может оказаться наиболее опасным для работников, например, зоны с высокой концентрацией вредных веществ или высоким уровнем шума;
- оценка совокупного воздействия нескольких вредных факторов одновременно, поскольку их комбинированное воздействие может привести к более серьезным последствиям, чем отдельно взятый фактор;

- разработка мер по снижению рисков воздействия вредных факторов на организм работников с учетом технических инноваций, изменения в производственных процессах, использование средств индивидуальной защиты и другие меры;

- мониторинг уровней воздействия и здоровья работников, а также регулярное обновление мероприятий по снижению рисков в соответствии с изменениями в производственных условиях и требованиях безопасности.

Управление безопасностью представляет собой инновационный подход, основанный на систематическом сборе, анализе и использовании информации для принятия решений в области охраны труда. Этот подход направлен на эффективное управление рисками и обеспечение безопасности работников на производстве [9].

Регулярный и систематический сбор данных о безопасности на производстве включает информацию о происшествиях, условиях труда, параметрах организма работников, а также данных о точном позиционировании.

Интеграция данных из различных источников, таких как системы точного позиционирования, «умные браслеты», журналы инцидентов и другие обеспечивает комплексный обзор состояния безопасности на производстве.

Применение методов анализа данных для выявления трендов, закономерностей и потенциальных рисков, инцидентов и воздействия вредных факторов на здоровье позволяет выявить причины и прогнозировать возможные последствия.

Определение мест с наибольшим потенциалом опасности для работников на основе данных о точном позиционировании и воздействии вредных факторов позволяет выделить зоны повышенного риска и определить причины их возникновения.

На основе полученных данных разрабатывают и внедряют конкретные мероприятия по улучшению условий труда и снижению рисков. Это может включать в себя изменения в производственных процессах, обновление технических средств, внедрение новых технологий и т. д.

Установление системы обратной связи для постоянного мониторинга эффективности внедренных мероприятий позволяет адаптировать стратегию управления безопасностью на основе изменений в условиях производства и новых данных.

Переход от реактивного к проактивному подходу позволит управлять безопасностью на прогнозе потенциальных рисков и оперативных решениях на основе данных в реальном времени.

Развитие системы управления безопасностью на основе данных как процесса непрерывного улучшения, использование новых технологий и методов анализа будет способствовать повышению эффективности мероприятий и снижения рисков.

Внедрение системы интегрированных технологий, основанных на точном позиционировании и мониторинге параметров организма, открывает ряд практических применений и приносит заметные преимущества в области безопасности труда и эффективности производственных процессов [4, 6, 9].

Системы точного позиционирования позволяют операторам в режиме реального времени определять местоположение сотрудников, быстрое и эффективное реагирование в случае чрезвычайных ситуаций, позволяя быстро определить нахождение работников и направить необходимую помощь.

Анализ данных о воздействии вредных факторов на здоровье работников позволяет выявлять потенциальные опасности, создает основу для разработки проактивных стратегий предотвращения рисков и оптимизации условий труда, снижая вероятность происшествий и повышая общий уровень безопасности.

Интеграция технологий позиционирования и мониторинга позволяет анализировать данные о перемещениях и работе сотрудников, открывает возможности для оптимизации распределения рабочих ресурсов, улучшения эффективности производственных процессов и сокращения времени выполнения задач.

Мониторинг параметров организма в реальном времени предоставляет информацию о текущем физиологическом состоянии работников. Это помогает выявлять ситуации теплового стресса, переутомления или других неблагоприятных факторов, что в свою очередь позволяет принимать необходимые меры по улучшению условий труда и обеспечению комфорта персонала.

Благодаря предупреждению чрезвычайных ситуаций, оптимизации производственных процессов и управлению зонами повышенного риска, система интегрированных технологий способствует снижению производственных потерь, связанных с инцидентами, простоем и заболеваемостью персонала.

Использование современных технологий в области безопасности труда способствует соблюдению нормативных требований и стандартов в сфере промышленной безопасности, что важно для поддержания репутации предприятия и предотвращения возможных юридических последствий.

Система управления безопасностью на основе данных, помимо своего основного предназначения в области охраны труда, также способствует общему повышению эффективности предприятия за счет оптимизации процессов, улучшения условий труда и снижения рисков производственной деятельности.

Выводы. Внедрение системы интегрированных технологий, базирующихся на точном позиционировании и мониторинге параметров организма работников, представляет собой значимый шаг в области обеспечения безопасности труда и повышения эффективности производства. Эти технологии не только предоставляют возможность точно отслеживать местоположение сотрудников, но и собирать данные о воздействии вредных факторов на их здоровье.

Проактивный характер системы управления безопасностью на основе данных открывает новые перспективы для предупреждения чрезвычайных ситуаций, оптимизации условий труда и повышения общего уровня безопасности на производстве. Эффективное управление рисками, основанное на анализе данных, позволяет не только соблюдать стандарты промышленной безопасности, но и создавать благоприятные условия для повышения производительности и улучшения качества труда на предприятии.

Практическое применение интегрированных технологий содействует соблюдению нормативов, становится ключевым фактором в повышении общей эффективности предприятия. Эти технологии вносят существенный вклад в снижение производственных потерь, оптимизацию процессов и улучшение условий труда, способствует повышению конкурентоспособности предприятия на рынке труда и укреплению его статуса ответственного участника промышленного сообщества.

Список литературы / References

1. Телемедицинские технологии в гигиене труда и профпатологии. Гигиена и санитария / С. А. Сайганов, В. И. Мазуров, В. В. Шилов, С. А. Горбанев // Гигиена и санитария. – 2020. – № 9. – С. 961–967.
Saiganov, S. A., Mazurov, V. I., Shilov, V. V., Gorbanev, S. A. [Telemedicine technologies in occupational health and pathology]. Hygiene and Sanitation, Russian Journal, 2020, no. 9, pp. 961-967. (In Russian)
2. Критерии и алгоритмы установления связи нарушений здоровья с работой / И. В. Бухтияров [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. 2018. – № 8. – С. 4–12.
Bukhtiyarov, I. V., Denisov, E. I., Lagutina, G. N., Pfaff, V. F., Chesalin, P. V., Stepanyan, I. V. [Criteria and algorithms of work-relatedness assessment of workers' health disorders]. Russian journal of occupational medicine and industrial ecology, 2018, no. 8, pp. 4-12. (In Russian)
3. Лапко, И. В. Современные технологии сохранения здоровья работников с учётом актуальных профессиональных рисков / И. В. Лапко, И. В. Яцына // Здравоохранение Российской Федерации. – 2022. – № 5. – С. 390–394.
Lapko, I. V., Yatsyna, I. V. [Modern technologies for preserving the health of employees taking into account current occupational risks]. Health Care of the Russian Federation, 2022, no. 5, pp. 390-394. (In Russian)
4. Фомин, А. И. Человеческий фактор в обеспечении промышленной безопасности на предприятиях угольной промышленности / А. И. Фомин, Е. А. Волгина // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2024. – № S1. – С. 49–55.
Fomin, A. I., Volgina, E. A. [Human factor in ensuring industrial safety at coal industry enterprises]. Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety, 2024, no. S1, pp. 49-55. (In Russian)
5. Обеспечение безопасного поведения работника на производстве путем формирования его личной системы управления охраной труда / А. И. Фомин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 3. – С. 90–96.
Fomin, A. I., Trubitsyn, A. A., Trubitsina, N. V., Popov, K. V., Voroshilova, E. S. [Ensuring safe behavior of production employees by establishing their personal occupational safety management system]. Occupational Safety in Industry, 2025, no. 3, pp. 90-96. (In Russian)
6. Виноградова, О. В. Ошибки человека как фактор производственного риска в горнодобывающей промышленности / О. В. Виноградова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6-1. – С. 137–145.
Vinogradova, O. V. [Human errors as a factor of production risk in the mining industry]. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2020, no. 6-1, pp. 137-145. (In Russian)
7. Оценка риска загрязнения окружающей среды для здоровья населения как инструмент муниципальной политики в Московской области / С. Л. Авалиани [и др.]. – М. : Библиотека газеты «Ежедневные новости. Подмосковье», 2010. – 309 с.
Avaliani, S.L., Revich, B.M., Balter, B.M., Gildenskiold, S.R., Mishina, A.L., Klikushina, E.G. [Assessment of environmental pollution risk for public health as a tool of municipal environmental policy in the Moscow region]. Moscow, Library of the daily news newspaper «Moscow region» Publ., 2010, 311 p. (In Russian)
8. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник / С. В. Белов. – М. : «Юрайт», 2011. – 680 с.
Belov S.V. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti i zashhita okruzhajushhej sredy (tehnosfernaja bezopasnost')*: *uchebnik* [Life safety and environmental protection (technosphere safety): textbook]. Moscow, Yurait Publ., 2011, 680 p. (In Russian)

9. Бенгфорт, Б. Прикладной анализ текстовых данных на Python. Машинное обучение и создание приложений обработки естественного языка / Б. Бенгфорт. – СПб. : Питер. – 2016. – 400 с.

Bengfort. B. *Prikladnoy analiz tekstovykh dannykh na Python. Mashinnoe obuchenie i sozdanie prilozheniy obrabotki estestvennogo jazyka* [Applied Analysis of Text Data in Python. Machine Learning and Natural Language Processing Applications]. St. Petersburg, Peter Publ., 2016, 400 p. (In Russian)

Дата поступления рукописи 29.01.2026
Рекомендовано к публикации профессором кафедры
горных машин и комплексов ФГБОУ ВО КузГТУ,
д-ром техн. наук, профессором А. А. Хорешком

Anatoly Iosifovich Fomin, Dr. of Tech. Sci., Professor of the Department; e-mail: fai.aotp@kuzstu.ru

Alexander Ivanovich Kopytov, Dr. of Tech. Sci., Professor of the Department; e-mail: kai.spssh@kuzstu.ru

*Vladimir Gennadievich Mikhailov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department;
e-mail: mvg.eohp@kuzstu.ru*

Renat Rashitovich Rafikov, Postgraduate Student, e-mail: renat_rafikov@bk.ru

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

650000, Kemerovo, Vesennyaya St., 28. Phone: +7 (3842) 39-63-70

IMPROVING PRODUCTION SAFETY THROUGH BODY POSITIONING AND MONITORING

Objective. Determining the possibility of using integrated technology and smart bracelets to reduce the risks of exposure to harmful and dangerous factors in the production environment and the work process, improve working conditions, and reduce the level of general and occupational morbidity,

Methods. The study is based on modern ideas about the safe or dangerous behavior of employees in the workplace.

Results. The conducted studies make it possible to optimize and improve working conditions in the workplace, reduce the level of accidents, injuries, and loss of working time, and create comfortable conditions for preserving the life and health of the staff

Scientific novelty. A method has been developed for quickly determining an employee's location and exposure to harmful and dangerous factors. It has been established that the use of integrated technology allows for real-time identification of potential hazards and prompt implementation of control measures to reduce risk and improve production safety.

Practical value. The implementation of an integrated system allows for the precise positioning of workers at production facilities and the real-time monitoring of their body parameters in workplaces with harmful and dangerous production factors, in order to reduce occupational risk and effectively manage production safety.

Keywords: *positioning; harmful production factors; body monitoring; smart bracelets; operational management; integrated technologies; occupational safety.*

For citation: Fomin A. I., Kopytov A. I., Mikhailov V. G., Rafikov R. R. Improving production safety through body positioning and monitoring. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 51-57. EDN SVOQTM

УДК 622.272.633

Валерий Дмитриевич Ашихмин, ст. науч. сотр.; e-mail: dmitrievich.valery@yandex.ru

Государственное бюджетное учреждение «Макеевский научно-исследовательский

институт по безопасности работ в горной промышленности»

286132, г. Макеевка, ул. Лихачева, 60. Тел.: +7 (949) 442-54-59

Роман Александрович Тишин, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: r.tishin@80.mchs.gov.ru

Александр Викторович Мавроди, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: a.mavrodi@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-43

София Романовна Тишина, студ.; e-mail: sr.tish@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +7 (856) 301-07-09

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕГАЗАЦИИ НЕРАЗГРУЖЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПОСЛЕ НАГНЕТАНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель. Оценка результатов лабораторных исследований фактической эффективности дегазации неразгруженных пластов высокометаморфизованного угля после предварительного гидровоздействия.

Методы. Анализ и обобщение результатов теоретических и натурных исследований по определению эффективности дегазации на угольных шахтах Донбасса.

Результаты. Проведены практические исследования, направленные на оценку эффективности дегазации угольного пласта с предварительным нагнетанием жидкости в скважины и периодом дренирования угольного массива не более 100 суток.

Научная новизна. Теоретически определено, что нагнетание жидкости в пласт позволяет получить требуемое снижение метановыделения в горные выработки за меньший период, чем при предварительной дегазации, что позволяет существенно сократить сроки подготовки новых горизонтов шахт.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят повысить эффективность дегазации после предварительного нагнетания жидкости в массив через дегазационные скважины, а также повысить безопасность ведения горных работ на угольных шахтах.

Ключевые слова: неразгруженные пласты угля; эффективность дегазации; скважины; нагнетание жидкости.

Для цитирования: Ашихмин В. Д., Тишин Р. А., Мавроди А. В., Тишина С. Р. Эффективность дегазации неразгруженных угольных пластов после нагнетания жидкости // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 58–67. – EDN UAWODR

Постановка задачи. Одним из основных и сложных методов борьбы с газом в шахтах является дегазация неразгруженных угольных пластов от горного давления. Дегазация является одним из главных технологических процессов, обеспечивающих безопасность горных работ наравне с вентиляцией. Этот процесс позволяет существенно снизить риск внезапных выбросов угля и газа, а также уменьшить метановыделение в очистные и подготовительные выработки, что в свою очередь предотвращает возможность воспламенения метана в лавах, доля которых составляет до 40 % от общего количества аварий и аварийных ситуаций в угольных шахтах [1].

С помощью дегазации из пластов-спутников и выработанного пространства отводится до 60 % метана, а при комплексной дегазации до 80 % метана [1, 2]. Обильное газовыделение на выемочных участках шахт Донбасса и низкая эффективность предварительной дегазации заставляют обращать особое внимание

на данную проблему. В связи с этим для горно-геологических условий ряда шахт даже при комплексной дегазации требуются дополнительные мероприятия, направленные на обеспечение безопасности ведения горных работ.

Достичь таких показателей дегазацией на стадии подготовки и отработки выемочного участка затруднительно, особенно, если она проводится без применения дополнительных мероприятий, направленных на повышение проницаемости деггазируемого угольного пласта.

Анализ последних исследований. В начале 80-х гг. XX в. предложен ряд способов снижения метановыделения из разрабатываемых пластов, однако в промышленных масштабах на угольных шахтах Донбасса применяется в основном только предварительная дегазация скважинами [2]. Другие способы находятся на стадии изучения, опытно-промышленной проверки или отклонены из-за низкой эффективности, невозможности их реализации при достигнутом технологическом уровне. Многочисленные научные исследования и опыт ведения дегазационных работ показали, что дегазация неразгруженных угольных пластов скважинами имеет высокую эффективность только при достаточно высокой газопроницаемости угля [3–6].

На больших глубинах разработки (1000 м и более) газопроницаемость угольных пластов настолько низка, что не позволяет эффективно дренировать угольный массив скважинами без дополнительных мероприятий по изменению его фильтрующих свойств. Поэтому большое внимание уделяется разработке способов искусственного повышения газопроницаемости угольных пластов и интенсификации метановыделения из пластовых дегазационных скважин. Исследования ведут по различным направлениям, выполняются работы по разработке способов изменения состояния угольного массива путем создания повышенного давления в скважинах (торпедирование, гидроразрыв, гидрорасчленение) и нагнетания в угольный массив химически активных веществ [3, 5].

При исследовании этих процессов было установлено, что увлажнение углей различной стадии метаморфизма вызывает качественно различные эффекты. Во время пропитки водой коксующихся углей молекулы воды, проникая между структурными элементами угля, раздвигают их, что приводит к новому периоду повторяемости в структуре и изменению энергии взаимодействия. Вследствие этого отдельные звенья структурных элементов имеют возможность изменять свое положение в пространстве. Макромолекулы принимают большое количество различных форм (конформаций), т. к. после раздвигания они меньше мешают друг другу и ранее не возможные комбинации становятся реализуемыми. Увеличение конформационного набора приводит к образованию изотопной структуры. Преимущественная ориентация нарушается, что не позволяет получить увеличение газо- и водопроницаемости.

В углях высокой степени метаморфизма процесс структурной перестройки при их увлажнении представлен следующим образом. Вода, проникая между надмолекулярными образованиями, играет роль межструктурной смазки, повышая их взаимную подвижность. Вследствие этого происходит процесс ориентационной вытяжки отдельных структурных элементов, надмолекулярные образования располагаются более параллельно и однородно, что способствует повышению проницаемости угля.

Установлено, что растворы ряда низкомолекулярных веществ оказывают большое влияние на перестройку структуры угля, чем вода [5]. Исследованы

свойства наиболее перспективных растворов с точки зрения их проникающей способности и химической природы взаимодействия с углем. Наиболее подходящими оказались водные растворы этиленгликоля и диацетонового спирта. Данные растворы являются равноценными, но раствор этиленгликоля считается более эффективным, т. к. поглощение его углем вызывает интенсивное набухание, что способствует увеличению трещиноватости за счет хрупкого разрушения угольного массива.

Цель. Оценка результатов лабораторных исследований фактической эффективности дегазации неразгруженных пластов высокометаморфизованного угля после предварительного гидровоздействия.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели проанализирована зависимость коэффициента эффективности дегазации от влияющих на него горнотехнических факторов.

Для проведения натурных исследований выполнено следующее:

- выбран экспериментальный участок 8-й северной лавы пласта k_1 шахты «Красная Звезда»;
- определены параметры экспериментальных скважин, технология и параметры нагнетания жидкости в угольный массив;
- произведен замер метановыделения из скважин, пробуренных в неразгруженном угольном массиве до и после нагнетания жидкости;
- установлено влияние нагнетания в массив воды и растворимых пластификаторов на величину коэффициента эффективности дегазации.

Обязательным условием при выборе участка было наличие достаточного опережения подготовительных выработок. Это позволяло заблаговременно, до подхода очистного забоя, пробурить скважины, произвести нагнетание раствора и определить динамику метановыделения до и после обработки угольного пласта.

Одним из условий, предъявляемых к экспериментальному участку, было наличие дополнительного резерва воздуха для разбавления метана, выделяющегося из скважин, а также обеспечение возможности ведения горных работ при повышении ПДК паров этиленгликоля в шахтной атмосфере.

Угольный пласт k_1 простого строения, угол падения 4–6°, мощность пласта составляла 0,46–0,60 м, среднепластовая зольность ($A_{пл}^c$) – 8,8 %; влажность угля ($W_{об}$) – 4,0 %; плотность угля (γ) – 1,4 т/м³. Длина лавы – 150 м, управление кровлей – полное обрушение. В кровле пласта k_1 находилась зона невыдержанного по мощности глинистого сланца, выше которого на расстоянии 1,7 м от пласта залегал песчаник, затем прослойка антрацита мощностью 0,17–0,25 м. Других сближенных угольных пластов и пропластков в пределах участка не было.

Предварительно до проведения испытаний установлено, что из пробуренных по пласту скважин выделяется газ с объемной долей метана 93 %, метаносность пласта составляла 16,32 м³/т. г. м., следовательно, экспериментальный участок находился в метановой зоне.

Для оценки эффективности предлагаемого метода нагнетания жидкости необходимо сравнить метановыделение из разрабатываемого пласта при работе лавы в недегазируемом массиве, в зоне обработанной водой и растворами пластификатора. Для этого бурили две группы скважин, в одну из которых нагнеталась вода, в другую – раствор этиленгликоля или диацетонового спирта.

Дегазация пласта скважинами без нагнетания жидкости может быть эффективной при периоде дренирования не менее 2 месяцев и расстояния между ними не более 10 м [3, 5]. Это определило выбор расстояния между скважинами и период наблюдения за метановыделением из них до и после нагнетания жидкости. При таких параметрах скважин удобно сопоставлять эффективности испытуемого способа и дегазации пласта скважинами необработанным раствором или водой.

Для предварительной дегазации неразгруженных угольных платов бурят скважины диаметром 150–160 мм [2]. Поэтому для нагнетания раствора принят диаметр скважин в этом интервале, что также необходимо для сопоставимости эффективности испытуемого способа с известными.

Схема расположения экспериментальных скважин, в которые нагнеталась жидкость приведена на рис. 1. Место бурения скважин выбирали с таким расчетом, чтобы время момента обработки массива раствором до подхода к нему очистного забоя было не менее 1,5–2 месяца (период времени необходимый для структурной перестройки в угле). При вскрытии скважин лавой фиксировались точки пресечения их с очистным забоем, по которым было установлено фактическое направление скважин.

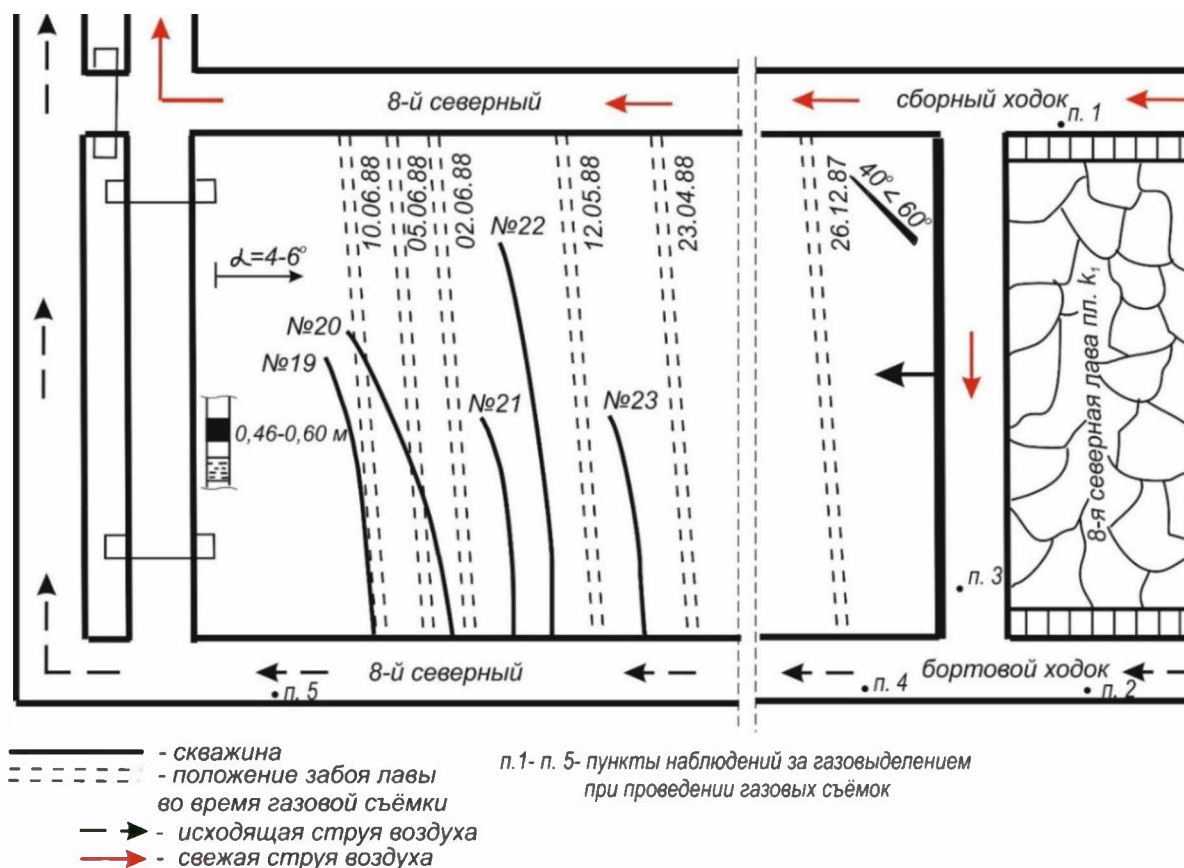


Рис. 1. Схема расположения экспериментальных скважин

Нагнетание жидкости в скважины производилось в таком порядке: № 23, 21, 19, 22 и 20. В скважины № 23 и 22 нагнеталась вода, а 2,5 %-ный водный раствор этиленгликоля – в скважины № 21, 19 и 20.

Характеристика экспериментальных скважин, в которые нагнеталась жидкость, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика экспериментальных скважин

№ скважины	Длительность бурения скважины, сут.	Закачанная жидкость	Длина скважины, м	Расстояние между скважинами, м
19	2,5	ЭГ	102	10,0
20	2,5	ЭГ	102	13,7
21	1,6	ЭГ	81	13,5
22	2,4	В	102	10,5
23	1,7	В	74	

Примечание. ЭГ – 2,5 %-ный р-р этиленгликоля; В – вода.

Эффективность дегазации определяли для условий работы лавы в зоне пласта, увлажненной водой и в зоне, обработанной 2,5 %-ным раствором этиленгликоля. Для определения исходных данных, необходимых при расчете коэффициентов эффективности дегазации, на экспериментальном участке проводили газовые съемки, отбирали пробы угля для определения в нем остаточного содержания метана, его зольности и влажности (табл. 2).

Таблица 2

Результаты проведения газовой съёмки на участке 8-й северной лавы пласта k_1 ш. «Красная Звезда»

Показатель			№ скважины				
			23	22	21	20	19
Вид нагнетаемой жидкости*			В	В	ЭГ	ЭГ	ЭГ
Среднее расстояние от забоя до скважины, м			7	7	5	1515	3
Длина лавы, м			149	149	149	151	151
Среднее за общее время наблюдений:	C – объемная доля метана в воздухе, %	п. 1	0,072	0,086	0,100	0,120	0,140
		п. 2	0,520	0,479	0,620	0,530	0,220
		п. 4	0,370	0,400	0,480	0,430	0,340
	Q – расход воздуха, м ³ /мин	п. 2	43	37	6	81	344
		п. 4	240	268	246	239	485
	I_d – каптаж метана, м ³ /мин	п. 2	0,224	0,464	0,038	0,429	0,756
		п. 4	0,889	1,071	1,180	1,170	1,648

Примечания. * В – вода; ЭГ – 2,5 %-ный р-р этиленгликоля;
п. 1, п. 2, п. 4 – пункты наблюдения за газовыделением.

Дебит метана (I_d), м³/мин, определяли по формуле:

$$I_d = \frac{2,16Q_n \cdot C}{100 \sqrt{[1,085(1-C/100)+C/100] \frac{P_r}{273+t_0}}}, \quad (1)$$

где Q_n – расход воздуха через диафрагму, м³/мин;

C – объемная доля метана из скважины, %;

P_r – давление газа, мм рт. ст.;

t_0 – температура газа, °C.

Давление газа (P_r) определяли по формуле:

$$P_r = P_{б.в} + \frac{h_{ст}}{13,6}, \quad (2)$$

где $P_{б.в}$ – барометрическое давление в выработке, из которой пробурены скважины, мм рт. ст.;

$h_{ст}$ – статическое давление газа в скважине при замере ее дебита, мм рт. ст.

После нагнетания жидкости в пласт метановыделение из скважин не увеличилось, а, наоборот, уменьшилось, особенно из скважин, в которые закачивался раствор этиленгликоля. Это показывает, что эффект структурной перестройки угля, установленный в лабораторных исследованиях, не проявляется при отработке раствором этиленгликоля неразгруженного от горного давления угольного массива. Вместо увеличения газоотдачи угля произошла закупорка метана в порах или, как обычно называют это явление, «консервация» газа. Одной из причин, препятствующей изменению структуры пласта, является тот факт, что в натурных условиях невозможно набухание угля и его растрескивание, которое имело место при проведении лабораторных опытов по обработке отбитого угля растворами.

Коэффициент эффективности дегазации (k_d) любого источника метановыделения (разрабатываемого пласта, его спутников и выработанного пространства) оценивают степень снижения метановыделения в горные выработки [1, 2, 4] и определяют по формуле:

$$k_d = \frac{q_1 - q_2}{q_1}, \quad (3)$$

где q_1 и q_2 – метановыделение из дегазируемого источника до и после применения дегазации, м³/мин.

Выражение (3) отражает степень снижения метановыделения в горные выработки, если скорость подвигания очистного забоя и природная метаноносность пласта на экспериментальном участке постоянны. Изменение этих факторов при определении коэффициентов эффективности дегазации можно было бы учесть, используя известные зависимости между газоносностью угля и газовыделением в выработки, а также зависимость относительного метановыделения из разрабатываемого пласта от скорости подвигания очистного забоя [1, 4]. Но точность расчета по этим формулам невысокая, что вносит большие погрешности в определение коэффициента эффективности дегазации.

Эффективность дегазации разрабатываемых угольных пластов (и других источников метановыделения) необходимо определять таким образом, чтобы исключить влияние изменения метаноносности угля и скорости подвигания очистного забоя. Это может быть достигнуто путём расчёта эффективности дегазации по природной и остаточной метаноносности. Сущность способа заключается в бурении на экспериментальном участке скважин длиной равной примерно половине длине лавы. После окончания бурения и герметизации устьев скважин производят систематический замер их работы.

Если в выражении (3) метановыделение выразить как разность между природной и остаточной метаноносностью, то коэффициент эффективности дегазации принимает вид:

$$k_d = \frac{(x-x_0)-(x^1-x_0^1)}{x-x_0}, \quad (4)$$

где x – природная метаноносность пласта, м³/т г. м.;

x_0 – остаточное содержание метана в угле, выдаваемое за пределы выемочного участка, м³/т г. м.;

x^1, x_0^1 – метаноносность пласта, остаточная метаноносность угля в зоне дегазации и обработки жидкостью, соответственно, м³/т г. м.

Природную метаноносность пласта определяют как сумму трёх величин:

$$x = q_{пл} + q_c + \bar{x}_0, \quad (5)$$

где $q_{пл}$ – относительное метановыделение из разрабатываемого пласта в лаву при работе его в зоне обработки угольного массива жидкостью, м³/т г. м.;

q_c – метановыделение из скважин, отнесенное к тонне дегазируемых запасов угля, м³/т г. м.;

$\bar{x}_0$ – среднее по длине лавы остаточное содержание метана в угле, выдаваемое за пределы выемочного участка, м³/т г. м.

Относительное метановыделение $q_{пл}$ определяют по формуле:

$$q_{пл} = \frac{I_{пл} \cdot 1440}{D} \cdot \frac{L}{L-2\Gamma} \cdot \frac{100}{100-A_p^c - W_p}, \quad (6)$$

где $I_{пл}$ – среднее метановыделение из разрабатываемого пласта в лаву в зоне дегазации и обработки угля жидкостью, м³/мин;

D – средняя добыча угля в лаве, т/сут;

L – длина лавы, м;

Γ – условный пояс дренирования пласта подготовительной выработкой, м;

A_p^c и W_p – рабочая зольность и влажность угля, соответственно, %.

Метановыделение из разрабатываемого пласта определяли с помощью газовых съемок.

Относительное метановыделение из скважин определяют по формуле:

$$q_c = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{(L-2\Gamma) \cdot a \cdot \gamma \cdot m \cdot n} \cdot \frac{100}{100-A_{пл}^c - W_{пл}}, \quad (7)$$

где Q_i – суммарное количество метана, выделившееся из i -й скважины до и после нагнетания жидкости, м³;

n – количество скважин;

a – расстояние между скважинами, м;

γ – объемный вес среднепластовой пробы угля, м³/т;

m – мощность пласта, м;

$A_{пл}^c$ и $W_{пл}$ – среднепластовая зольность и влажность угля, соответственно, %.

Величины $\bar{x}_0$ и x_0^1 определяют по формулам:

$$\bar{x}_0 = \frac{x_0 (L-l_c - \Gamma) + x_0^1 (l_c - \Gamma)}{L-2\Gamma}, \quad (8)$$

где l_c – средняя длина скважины, м;

$$x_0^1 = x - q_c^1, \quad (9)$$

$$q_c^1 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{(l_c - \Gamma) a \cdot \gamma \cdot m \cdot n} \cdot \frac{100}{100 - A_{пл}^c - W_{пл}}, \quad (10)$$

Коэффициент эффективности k_d , рассчитанный по формуле (4), характеризует общее снижение метановыделения из пласта за счет дегазации и «консервации» газа. Тогда коэффициент эффективности дегазации, характеризующий снижение метановыделения из скважин (k_d^1), определяют по формуле:

$$k_d^1 = \frac{q_c}{x - x_0} \quad (11)$$

Коэффициент, характеризующий степень снижения метановыделения из разрабатываемого пласта в горные выработки за счет «консервации» газа, определяют как разность между k_d и k_d^1 . В табл. 3. приведены результаты расчета коэффициентов, характеризующих эффективность дегазации пласта при нагнетании жидкости в скважины.

Таблица 3

Влияние нагнетания жидкости в пласт k_d
на метановыделение и эффективность дегазации

Показатели		Место замера		
		Вне зоны дегазации и обработки пласта	В зоне дегазации и обработки пласта	
			В	ЭГ
Длительность газовыделения, сут.	до нагнетания	—	28	42
	после нагнетания	—	38	58
Среднее кол-во метана, выделившееся из скважины, м ³	до нагнетания	—	72	20
	после нагнетания	—	44	278
Среднее метановыделение из разрабатываемого пласта, $I_{пл}$, м ³ /мин		4,65	4,48	3,15
Средняя остаточная метаноносность угля в зоне дегазации и обработки пласта жидкостью, x_0^1 , м ³ /т г. м		—	8,60	7,56
Остаточное содержание метана в угле вне зоны дегазации, x_0 , м ³ /т г. м.		11,67	7,50	6,96
Коэффициент эффективности дегазации пласта, k_d		—	0,42	0,31
Коэффициент эффективности дегазации, характеризующий снижение метановыделение из скважин, k_d^1		—	0,04	0,08
Коэффициент эффективности предварительной дегазации пласта при периоде дренирования		—	0,20	0,25

Примечание. В – вода; ЭГ – 2,5 %-ный р-р этиленгликоля.

Из анализа таблицы 3 следует, что снижение метановыделения в горные выработки 8-й северной лавы произошло, в основном, за счет «консервации» метана в угле, т. к. величины k_d значительно больше k_d^1 .

Таким образом, результаты оценки эффективности метода по величинам коэффициента дегазации не противоречат выводам, полученным на основании изучения динамики метановыделения из скважин с нагнетанием жидкости. Нагнетание жидкости в скважины, пробуренные в высокометаморфизированных угольных пластах, не приводит к увеличению метановыделения, как это предполагалось на основании лабораторных опытов, а, наоборот, способствует «консервации» метана и снижению дебита скважин до 30 %.

В обработанной водой зоне пласта коэффициент эффективности дегазации несколько выше, чем в зоне нагнетания раствора этиленгликоля. Но из этого не следует вывод, что применение воды способствует более сильному проявлению эффекта «консервации», поскольку полученные величины k_d для воды и раствора этиленгликоля одного порядка. Кроме того, период дегазации и количество выделившегося метана из скважин в зоне увлажнения водой и в обработанной раствором этиленгликоля зоне несколько отличается, что могло повлиять на процесс «закупорки» газа в угле.

Выводы. В ходе проведенных исследований установлено, что дегазация угольного пласта скважинами с последующим нагнетанием в них жидкости эффективнее предварительной дегазации при периоде дренирования угольного массива не более 100 суток. Это важно с практической точки зрения, т. к. нагнетание жидкости в пласт позволяет получить требуемое снижение метановыделения в горные выработки за меньший период, чем при предварительной дегазации, что позволяет существенно сократить сроки подготовки новых горизонтов шахт, а также повысить безопасность ведения горных работ на угольных шахтах.

Список литературы / References

1. Звягильский, Е. Л. Управление метановыделением на выемочных участках угольных шахт / Е. Л. Звягильский, В. Б. Бокий, О. И. Касимов. – Донецк : «Ноулидж», 2013. – 124 с.
Zvyagilskiy, E. L., Boki, V. B., Kasimov, O. I. [Management of Methane Emission in Longwall Mining Areas of Coal Mines]. Donetsk, Noulidzh Publ., 2013. 124 p. (In Russian).
2. Пашковский, П. С. Проветривание выемочных участков при отключении систем дегазации / П. С. Пашковский, Н. В. Карнаух, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 1 (54). – С. 85–93.
Pashkovsky, P. S., Karnaukh, N. V., Mavrodi, A. V. [Ventilation of excavation districts by cutout of degassing systems]. Scientific bulletin of NIIGD «Respirator», 2017, no. 1 (54). pp. 85-93. (In Russian)
3. Шахтные испытания усовершенствованной технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва / С. В. Сластунов [и др.] // Уголь. – 2016. – № 11. – С. 32–37.
Slastunov, S. V., Yutyaev, E. P., Mazanik, E. V., Sadov, A. P., Ponizov, A. V. [Mine test improved technology underground reservoir degassing with the use of hydraulic fracturing]. Ugol, 2016, no. 11, pp. 32-37. (In Russian)
4. Ашихмин, В. Д. Оценка эффективности дегазации в условиях столбовой системы разработки / В. Д. Ашихмин, Р. А. Тишин, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 64–76.

Ashikhmin, V. D., Tishin, R. A., Mavrodi, A. V. [Evaluation of the efficiency of degassing in the conditions of the pillar mining system]. Scientific Bulletin of the NII «Respirator», 2025, no. 4 (62), pp. 64-76. (In Russian)

5. Антипов, И. В. Определение параметров нагнетания жидкости в углепородный массив для интенсификации дегазации угольного пласта / И. В. Антипов, С. В. Балов // Труды РАНМИ. – 2016. – № 1 (16). – С. 131–137.

Antipov, I. V., Balov, S. V. [Determination of parameters for fluid injection into coal-rock mass to stimulate coal seam degassing]. Transactions of RANIMI, 2016, no. 1 (16), pp. 131-137. (In Russian)

6. Влияние параметров скважин на эффективность дегазации / В.Д. Ашихмин, Р.А. Тишин, С.С. Матвеев, О.В. Плаксиенко, И.И. Москвина // Проблемы горного дела: сб. науч. тр. I междунар. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, г. Донецк, 8–10 апр. 2020 г. – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 178–188.

Ashikhmin, V. D., Tishin, R. A., Matveev, S. S., Plaksienko, O. V., Moskvina, I. I. [The influence of well parameters on degassing efficiency]. Problems of mining: Collection of scientific papers of the 1st International Forum of Students, Postgraduates and Young Mining Scientists, Donetsk, 8–10 Apr. 2020. Donetsk: DONNTU Publ., 2020, pp. 178-188. (In Russian)

Дата поступления рукописи 26.03.2026

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

Valery Dmitrievich Ashikhmin, Senior Researcher; e-mail: dmitrievich.valery@yandex.ru

State Budgetary Institution «Makeyevka Research Institute for Safety in the Mining Industry»

286132, Makeyevka, Likhacheva St., 60. Phone: +7 (949) 442-54-59

Roman Aleksandrovich Tishin, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: r.tishin@80.mchs.gov.ru

Aleksandr Viktorovich Mavrodi, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru

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

283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-43

Sofia Romanovna Tishina, student; e-mail: sr.tish@yandex.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Donetsk National Technical University»

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

EFFECTIVENESS OF DEGASATION OF UNLOADED COAL SEAMS AFTER LIQUID INJECTION

Purpose. Evaluation of the results obtained under laboratory conditions concerning the determination of the actual effectiveness of degassing of unloaded high-metamorphosed coal seams after preliminary treatment with solutions.

Methods. Analysis and generalization of the results of theoretical and archival field studies on determining the effectiveness of degassing of coal mines in Donbass.

Results. Practical studies have been conducted to assess the effectiveness of coal seam degassing with pre-injection of liquid into wells and a coal massif drainage period of no more than 100 days.

Scientific novelty. It has been theoretically determined that fluid injection into the seam makes it possible to achieve the required reduction of methane emission into mine workings in a shorter period than during preliminary degassing, which allows significantly reducing the time required for preparing new mine horizons.

Practical significance. The obtained results will improve the effectiveness of degassing after preliminary solution injection into the coal mass through degassing boreholes, as well as enhance the safety of mining operations in coal mines.

Keywords: *unloaded coal seams; degassing efficiency; boreholes; fluid injection.*

For citation: Ashikhmin V. D., Tishin R. A., Mavrodi A. V., Tishina S. R. Effectiveness of degasation of unloaded coal seams after liquid injection. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 58-67. EDN UAWODR

УДК 331.45

*Анна Владимировна Александрова, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹;
e-mail: alexanna@mail.ru*

*Дмитрий Алексеевич Пуцин, аспирант кафедры¹, руководитель группы специалистов²;
e-mail: puschin.dima2016@yandex.ru*

Никита Сергеевич Панкратов, аспирант кафедры¹; e-mail: n.s.pankratov@gmail.com

Александра Александровна Левчук, канд. техн. наук, доцент кафедры¹; e-mail: naukabzh@mail.ru

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Кубанский государственный технологический университет»

350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2. Тел.: 8(861)274-57-18

²Филиал Яблоновское управление аварийно-восстановительных работ

Общества с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Краснодар»

385141, Республика Адыгея, пгт. Яблоновский, ул. Ленина, 47. Тел.: 8(877)719-20-26

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ПРЕДПРИЯТИИ, ВЫПОЛНЯЮЩЕМ АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Цель. Улучшение профилактической направленности функционирования системы управления производственной безопасностью (СУПБ) на основе проактивных и реактивных показателей эффективности.

Методы. Комплексный метод исследования включал анализ источников нормативно-правовой и научно-технической литературы, а также стандартов в предметной области, применен балльный метод и экспертная оценка для оценки эффективности СУПБ математическим путем.

Результаты. С учетом контекста организации разработан комплекс проактивных показателей и индикаторов, а также предложена методика оценки эффективности СУПБ. С использованием разработанных рекомендаций проведена оценка эффективности СУПБ в филиале Яблоновское управление аварийно-восстановительных работ (ЯУАВР) ООО «Газпром трансгаз Краснодар». В качестве примера приведены результаты оценки эффективности СУПБ филиала ЯУАВР.

Научная новизна. Методология позволяет систематизировать характеристики функционирования процессов СУПБ в виде количественных показателей, визуализировать результат и научно обосновать принятие управленческих решений по митигации рисков производственной деятельности, влияющих на достижение целей по сохранению жизни и здоровья работников, развитию культуры безопасности труда.

Практическая значимость. Результаты исследования предназначены для научных работников, обучающихся и специалистов сферы эксплуатации объектов нефтегазового комплекса (специалисты в области охраны труда, промышленной и пожарной безопасности промышленных предприятий, а также работники, непосредственно эксплуатирующие опасные производственные объекты). Разработанные рекомендации могут быть адаптированы для решения аналогичных задач в других сферах экономической деятельности.

Ключевые слова: система управления производственной безопасностью; оценка эффективности; проактивные показатели; работник; метод; эффективность; мероприятия по улучшению условий труда.

Для цитирования: Александрова А. В., Пуцин Д. А., Панкратов Н. С., Левчук А. А. Анализ функционирования системы управления производственной безопасностью на предприятии, выполняющем аварийно-восстановительные работы // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 68–77. – EDN UXQFIW

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. В связи с совершенствованием российского трудового законодательства перед современным работодателем поставлены задачи обеспечения более высокого уровня организации менеджмента безопасности,

контроля и постоянного мониторинга эффективности системы управления производственной безопасностью. Система управления производственной безопасностью (СУПБ) – это комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых для обеспечения требований производственной безопасности. СУПБ должна встраиваться в основные технологические процессы, обеспечивать их устойчивость и развитие. Для достижения этих целей необходимы превентивные инструменты управления производственной безопасностью, которые невозможны без анализа большого массива данных, учета их влияния в реальном времени и прогнозирования будущих ситуаций [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что установленная работодателем политика в области производственной безопасности, в том числе по охране труда – это стратегия, нацеленная на предупреждение несчастных случаев на производстве, основанная на убеждении, что любые аварии можно предотвратить и выстроить производственную деятельность без смертельных и тяжелых несчастных случаев. Она способствует развитию культуры безопасности и приверженности охране труда со стороны всех сотрудников [3–5].

Совершенствование технологий, цифровизация производственных процессов и оборудования делают инновационные разработки доступнее и открывают новые возможности и подходы к решению задачи обеспечения производственной безопасности, особенно в условиях географической разобщенности структурных подразделений [6–10].

Организационную основу для выполнения обязанностей работодателя в области безопасности труда в Российской Федерации составляет обязательное функционирование системы управления охраной труда, которая объединяет ряд элементов (процессов и процедур), представляет их в структурированном и документированном виде. Такая система управления должны быть выстроена на базе политики и целей в области охраны труда (ОТ) у конкретного работодателя и обеспечиваться реализацией установленных локальными нормативно-правовыми актами процедурами, которые учитывают контекст организации: численность работников, вид экономической деятельности, особенности рисков, воздействующих на работников в штатных и в аварийных ситуациях, и т. д. Таким образом, для успешного управления рисками повреждения здоровья работников и нарушения обязательных требований охраны труда работодатель должен обеспечивать не только создание и функционирование системы управления охраной труда, а также ее актуализацию и постоянное совершенствование [11–14].

В Приказе Минтруда России от 29.10.2021 г. № 776н работодателю рекомендуется разработать порядок контроля и оценки результативности функционирования системы управления, который предусматривает определение объекта контроля, методов контроля показателей, критерии их оценки, а также виды контроля, позволяющих получение объективной информации для принятия решений по дальнейшему совершенствованию работы.

Цель. Улучшение профилактической направленности функционирования системы управления производственной безопасностью на основе проактивных и реактивных показателей эффективности.

Результаты исследований. Для достижения цели в процессе исследования необходимо было разработать и апробировать в производственной деятельности рекомендации по совершенствованию оценки эффективности СУПБ на уровне

работодателя в организации, осуществляющей капитальный ремонт и строительство объектов транспорта газа, выполнить интеграцию методики оценки эффективности в существующую систему управления производственной безопасностью. В задачи исследования входило выполнить анализ современных требований и рекомендаций в части обязанности работодателя по обеспечению функционирования СУПБ, оценке ее эффективности и результативности и дать рекомендации по совершенствованию процедуры оценки эффективности функционирования процессов СУПБ на основе проактивных показателей эффективности.

Оценка эффективности СУПБ – это процесс, в ходе которого, наряду с анализом социального аспекта, устанавливают экономические характеристики, показывающие, насколько рациональна система и как соотносится общий вклад и расходы, связанные с системой [15]. Также оценка эффективности – это действия, включающие в себя формирование системы показателей эффективности; разработку стандартов (нормативов и процедур) эффективности (методики оценки эффективности); сопоставление фактического состояния эффективности требованиям этих стандартов.

Стандарты менеджмента безопасности труда и охраны здоровья серии ИСО построены на принципе «непрерывного улучшения» – цикле PDCA (*Plan (планируй) – Do (действуй) – Check (проверяй) – Act (корректируй)*), призванного выстраивать процессы и формировать эффективные системы с последующей их корректировкой. Процесс совершенствования СУПБ целесообразно подчинять циклу PDCA (рис. 1).

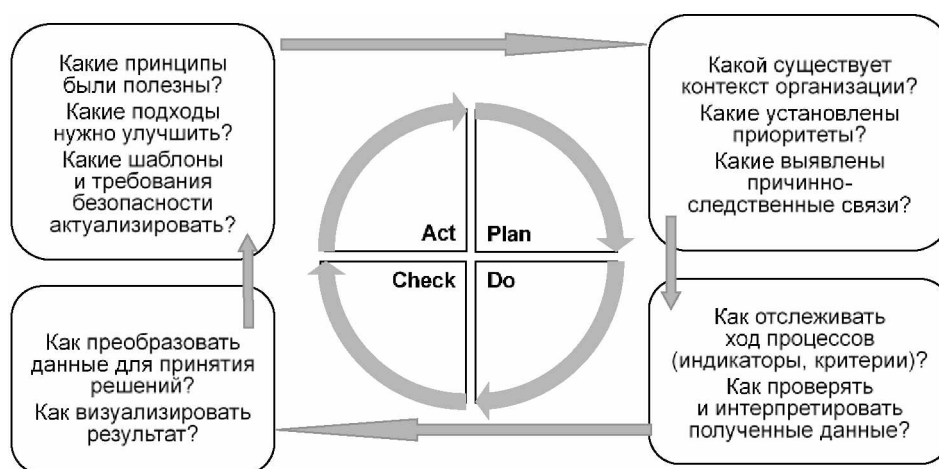


Рис. 1. Цикл непрерывного улучшения на примере СУПБ работодателя (составлено авторами с применением ГОСТ Р ИСО 45001-2020)

Для реализации поставленных целей разработан комплекс проактивных показателей эффективности, который основан на ведущей роли профилактики реализации рисков в области охраны труда, интеграции положений ГОСТ Р ИСО 45001-2020 и содержания X раздела «Охрана труда» Трудового кодекса РФ (табл. 1). Проактивные индикаторы отражают состояние системы «в данный момент времени» и направлены на оценку текущих непрерывных процессов, а также позволяют создавать условия для постоянного улучшения системы: предвидения рисков на ранних стадиях, стимулирования и развития у работников культуры безопасности, а также внедрение инновационных подходов и программ в области обучения по охране труда.

Таблица 1

Комплекс проактивных показателей

Направление ГОСТ Р ИСО 45001-2020	X раздел Трудового кодекса	Проактивные индикаторы
Контекст организации	Ст. 209.1 Основные принципы обеспечения безопасности труда	Личная активная и последовательная демонстрация руководителя приверженности приоритету безопасности; компетентное руководство; включение оценки рисков безопасности труда, охраны здоровья в должностные инструкции руководителей; тренинги для руководителей по вопросам ОТ; личные систематические встречи руководителей с работниками; оценка работниками деятельности руководителей по ОТ; личные обязательства руководителей в области ОТ; проведение совещаний по производственной безопасности
Лидерство и участие работников	Ст. 214. Обязанности работодателя в области ОТ	
Обеспечение	Ст. 214. Обязанности работодателя в области ОТ Ст. 216.1. Право работника на получение информации об условиях и охране труда Ст. 218. Профессиональные риски Ст. 226. Микроповреждения (микротравмы) Ст. 228. Обязанности работодателя при несчастном случае	Рассмотрение инцидентов, микротравм; обучение по результатам анализа обстоятельств и причин нежелательных событий; анализ коренных причин происшествий, оценка эффективности и актуальности мер управления рисками; своевременное и систематическое выявление опасностей и рисков; приоритет разработки инженерных и административных мер над выдачей средств индивидуальной защиты (учет иерархии мер защиты)
Планирование	Ст. 209.1 Основные принципы обеспечения безопасности труда Ст. 214.1 Запрет на работу в опасных условиях труда	Компетентность обучающихся по ОТ (вводный и первичный инструктаж на рабочем месте); адресные программы обучения по отдельным вопросам ОТ (аудит, процессы СУПБ, средства защиты и т. п.); планирование работы по ОТ; учет уровня и специфики рисков в подборе целевых индикаторов достижения целей работодателя; включение вопросов ОТ в процесс ознакомления нового работника с рабочим местом; информирование работников о показателях эффективности в области ОТ; бенчмаркинг
Функционирование	Ст. 214. Обязанности работодателя обязанности работника	Контакт руководителей и работников по вопросам ОТ (особенно перед началом работ); осведомленность работников о видении работодателя краткосрочных и долгосрочных целей

Направление ГОСТ Р ИСО 45001-2020	Х раздел Трудового кодекса	Проактивные индикаторы
	Ст. 217. Система управления ОТ у работодателя Ст. 216.1 Гарантии права работников на труд в условиях, соответствующих требованиям ОТ Ст. 223. Служба ОТ у работодателя Ст. 225. Финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда	по ОТ; планирование и организация работы на основе четких должностных ролей, полномочий и ресурсов для достижения целей по ОТ; консультации по вопросам ОТ с работниками и их участие в планировании и организации работы на их рабочих местах; привлечение независимых специалистов для консультаций по вопросам ОТ (внешний аудит); организационные и технические инновации в средствах индивидуальной защиты от проектирования до эксплуатации; четкие документированные обязательства руководителей по использованию инноваций в ОТ; систематическое финансирование мер по ОТ; выбор подрядных организаций, которые привержены безопасности труда; проверка безопасного состояния оборудования, товаров, услуг; включение мер по безопасности применения оборудования, инструментов, сырья в программы обучения
Оценка результатов деятельности	Ст. 219. Обучение по ОТ	Актуализация программ обучения по ОТ; учет практических аспектов в программах обучения; система непрерывного обучения в процессе трудовой деятельности; развитие института наставничества; применение современных педагогических технологий в обучении по ОТ
Улучшение	Ст. 216. Права работника в области ОТ Ст. 224. Комитеты (комиссии) по ОТ	Стимулирование вовлечения работников в улучшение ОТ (сообщения о происшествиях, проблемах); адекватный учет мнения работников; своевременное и ощутимое поощрение линейных работников за положительные результаты по ОТ; стимулирование распространения положительного опыта по ОТ на других рабочих мест и в подразделениях; сбор, анализ и внедрение рационализаторских предложений по ОТ, включение уполномоченных по ОТ в СУПБ

На основе изучения контекста целесообразно проводить выбор значимости направлений с учетом уровня формирования СУПБ путем установления условных весов экспертным путем.

Для оценки критерии могут применяться различные критерии: счетные, процентные, основанные на фактах, измеряемые при помощи чек-листов и т. д. В табл. 2 представлены исходные данные для расчетов эффективности СУПБ, основанные на проактивных показателях эффективности.

Таблица 2

Исходные данные для расчета эффективности СУПБ (с учетом анализа осуществляемой деятельности филиала Яблоновское УАВР ООО «Газпром трансгаз Краснодар»)

Направление	Проактивный индикатор (пример, фрагмент)	Условный вес (1–10)
Контекст организации Лидерство и участие работников	Личная активная и последовательная демонстрация руководителя приверженности приоритету безопасности; компетентное руководство	4
	Включение оценки рисков безопасности труда, охраны здоровья в должностные инструкции руководителей	5
Обеспечение	Рассмотрение инцидентов, микротравм	8
	Обучение по результатам анализа обстоятельств и причин нежелательных событий	7
	Оценка эффективности и актуальности мер управления рисками	3
Планирование	Включение вопросов ОТ, в процесс ознакомления нового работника с рабочим местом	8
	Информирование работников о показателях эффективности работ в области ОТ	4
Функционирование	Организационные и технические инновации в средствах защиты от опасных и вредных факторов от проектирования до эксплуатации	8
	Четкие документированные обязательства руководителей по использованию инноваций в ОТ	5
Оценка результатов деятельности	Система непрерывного обучения в процессе трудовой деятельности; развитие института наставничества;	6
Улучшение	Стимулирование вовлечения работников в улучшение ОТ (сообщения о происшествиях, проблемах)	3
	Адекватный учет мнения работников	6

Оценка по каждому разделу может быть осуществлена по формуле:

$$M_j = \{(\sum_{i=1}^n S_i \times W_i) \times 10\}, \quad (1)$$

где M_j – результат оценки и расчета по j -му разделу;

S_i – результат оценки и расчета по подразделу;

W_i – вес подраздела в разделе;

$i = 1 \div N$, где N – количество подразделов в разделе.

В итоге оценка по каждому разделу может составлять от 0 до 10 баллов.

Перед расчетом общего уровня эффективности, вводится коэффициент неравномерности, чтобы несколько снизить субъективность в оценке по некоторым направлениям.

Коэффициент неравномерности рассчитывают по формуле:

$$K = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^V (M_j - \bar{M})^2}{(V-1) \sum_{j=1}^V M_j}}, \quad (2)$$

где $\bar{M}$ – среднее значение оценки по разделам в баллах;

V – количество направлений оценки СУПБ.

Общую оценку уровня эффективности СУПБ (Ξ) определяют по формуле:

$$\Xi = \{(\sum_{j=1}^V M_j) \times K\}. \quad (3)$$

Она может составлять от 0 до 70 (по 10 баллов за каждое направление) баллов со следующими уровнями оценки эффективности СУПБ:

- 1) 0–14 баллов – «очень низкий»;
- 2) 15–29 баллов – «низкий»;
- 3) 30–44 балла – «средний»;
- 4) 45–59 баллов – «высокий»;
- 5) 60–70 баллов – «очень высокий».

Таким образом, с помощью представленной методики можно провести оценку эффективности СУПБ основанную, как на проактивных показателях эффективности, так и комплексную оценку эффективности, используя одновременно и проактивные и реактивные показатели (индикаторы) эффективности СУПБ.

На основе исходных данных СУПБ филиала Яблоновское УАВР ООО «Газпром трансгаз Краснодар» разработана диаграмма результатов оценки ее эффективности (рис. 2).



Рис. 2. Результирующая диаграмма оценки эффективности СУПБ филиала Яблоновское УАВР ООО «Газпром трансгаз Краснодар»

Таким образом, согласно разработанной методике, результаты оценки эффективности СУПБ можно представить в графическом виде. Динамический способ демонстрации результатов оценки позволит работодателю разработать

соответствующие мероприятия по улучшению и модернизации существующей СУПБ, а в дальнейшем перейти на более высокий уровень ее организации.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Для формирования методической основы, внедрения и совершенствования процесса оценки эффективности СУПБ выполнен анализ современных требований и рекомендаций в части обязанности работодателя по обеспечению функционирования СУПБ, оценке ее эффективности и результативности и даны рекомендации по совершенствованию процедуры оценки эффективности функционирования процессов СУПБ на основе проактивных показателей эффективности.

Представленный комплекс проактивных показателей и методика оценки эффективности, основанная на данных показателях (индикаторах), удовлетворяют современным требованиям трудового законодательства Российской Федерации, просты к восприятию и имеют возможность графического представления результатов.

Результаты исследования помогут работодателю самостоятельно провести оценку эффективности СУПБ в учреждении, что в свою очередь влияет на управленческие решения в целях сохранения жизни, здоровья работников. Благодаря формированию практических знаний и информативных ресурсов возможно расширение исследовательской деятельности в данном направлении по построению информационно-аналитической системы.

Список литературы / References

1. Пути повышения эффективности систем управления охраной труда / Е. Е. Галкина [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 3. – С. 73–79. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-3-73-79. – EDN KJBVXX

Galkina, E. E., Sorokin, A. E., Dainov, M. I., Golovanova, T.V., Kovtun, M.A. [The methods to improve the efficiency of occupational safety management systems]. Occupational Safety in Industry, 2024, no. 3. pp. 73-79. (In Russian)

2. Шабанова, Д. Н. Совершенствование системы управления охраной труда предприятий на основе риск-ориентированного подхода / Д. Н. Шабанова, А. В. Александрова // Вестник НЦБЖД. – 2018. – № 3 (37). – С. 127–133.

Shabanova, D. N., Aleksandrova, A. V. [Improvement of the control system of labor protection of enterprises on the basis of risk-oriented approach]. Vestnik NTsBZhD, 2018, no. 3 (37). pp. 127-133. (In Russian)

3. Проблемы управления безопасностью труда в контексте реализации концепции нулевого травматизма / И. П. Карначев, С. П. Левашов, Н. К. Смирнова, П. И. Карначев // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 8. – С. 27–34.

Karnachev, I. P., Levashov, S. P., Smirnova, N. K., Karnachev, P. I. [Problems of Occupational Safety Management in the Context of Implementation of the Vision Zero Concept]. Industrial Safety, 2021, no. 8. pp. 27–34. (In Russian)

4. Rantala, M., Lindholm, M., Tappura, S. Supporting occupational health and safety risk assessment skills: A case study of five companies. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022; no. 19(3) doi:10.3390/ijerph19031720. (In English)

5. Евсеев, С. В. Промышленная безопасность: актуальные проблемы и современные решения / С. В. Евсеев // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 6. – С. 92–96.

Evseev, S. V. *Promyshlennaya bezopasnost: aktualnye problemy i sovremennye resheniya* [Industrial safety: Current Issues and Modern Solutions]. Occupational Safety in Industry, 2022, no. 6. pp. 92-96. (In Russian)

6. Балашов, А. М. Тенденции цифровизации производственных процессов в горном деле / А. М. Балашов // Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 134–137. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-134-137.

Balashov, A.M. [Trends in digitalization of production processes in mining]. Mining Industry Journal, 2023, no. 3, pp. 134-137. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-134-137. (In Russian)

7. Позднеев, Б. М. Цифровые инновации – основа формирования нового облика отечественного машиностроения / Б. М. Позднеев // Стандарты и качество. – 2021. – № 3. – С. 50–52.

Pozdneev, B. M. [Digital innovations: a basis for the formation of a new image of Russian mechanical engineering]. Standards and Quality, 2021, no. 3. pp. 50-52. (In Russian)

8. Дюкина, В. М. Опыт российских металлургических компаний в области цифровизации охраны труда / В. М. Дюкина, М. А. Исаков // Черные металлы. – 2024. – № 8. – С. 92–96. – DOI 10.17580/chm.2024.08.12.

Dyukina, V. M., Isakov, M. A. *Opyt rossiyskikh metallurgicheskikh kompaniy v oblasti tsifrovizatsii okhrany truda* [Experience of Russian Metallurgical Companies in the Field of Occupational Health and Safety Digitalization]. Chernye Metally, 2024, no 8. pp. 92-96. – DOI: 10.17580/chm.2024.08.12. (In Russian)

9. Применение цифровых технологий в области контроля за соблюдением требований производственной безопасности / Д. В. Селиверстов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 208–217. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-3-208-217.

Seliverstov, D. V., Volokhina, A. T., Glebova, E. V., Ivanova, M. V., Khafizov, I. F., Azevich, M. P. [Application of digital technologies in the field of control of compliance with production safety requirements]. Petroleum Engineering, 2025, vol. 23, no. 3, pp. 208-217. – DOI 10.17122/ngdelo-2025-3-208-217. (In Russian)

10. Булычев, С. Н. Обзор программных комплексов в области охраны труда / С. Н. Булычев, С. И. Горбачев // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 9. – С. 82–88. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-9-82-88.

Bulychev, S. N., Gorbachev, S. I. [Review of occupational safety software suites]. Occupational Safety in Industry, 2024, no. 9. pp. 82-88. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-9-82-88. (In Russian)

11. Sevastyanov, B., Shadrin, R., Dolinina, I. Development of tools for managing professional risk at enterprises and reducing the possibility of threats to employees' health. Nexo Revista Científica. 2022; vol. 35, no. 01, pp. 120-132. – DOI 10.5377/nexo.v35i01.13923. (In English)

12. Шабанова, Д. Н. Управление охраной труда на предприятии на основе системы индикаторных показателей / Д. Н. Шабанова, А. В. Александрова // Стандарты и качество. – 2020. – № 12. – С. 62–67.

Shabanova, D. N., Aleksandrova, A. V. [Occupational safety management based on the system of indicatorS]. Standards and Quality, 2020, no. 12. pp. 62-67. (In Russian)

13. Проблемы и перспективы формирования системы проактивного мониторинга безопасности работников предприятий горнодобывающей отрасли / И. П. Карначев, С. П. Левашов, Н. К. Смирнова, П. И. Карначев // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 48–54. – DOI 10.24000/0409-2961-2020-10-48-54.

Karnachev, I. P., Levashov, S. P., Smirnova, N. K., Karnachev, P. I. [Problems and prospects of forming a system of proactive monitoring of safety for the employees in mining industry]. Occupational Safety in Industry, 2020, no. 10. pp 48-54. – DOI 10.24000/0409-2961-2020-10-48-54. (In Russian)

14. Александрова, А. В. Система управления охраной труда на промышленном предприятии: построение и оценка функционирования, основанные на анализе риска / А. В. Александрова, Д. Н. Шабанова, В. В. Новиков. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2020. – 171 с.

Aleksandrova, A. V., Shabanova, D. N., Novikov, V. V. *Sistema upravleniya okhranoy truda na promyshlennom predpriyatii: postroenie i otsenka funktsionirovaniya, osnovannye na analize*

riska [Occupational Health and Safety Management System at an Industrial Enterprise: Design and Performance Assessment Based on Risk Analysis Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Kuban State Technological University]. Krasnodar, Kuban State Technological University Publ., 2020, 171 p. (In Russian)

15. Оценка результативности системы управления охраной труда в отраслях промышленности / А. А. Порошин, Е. В. Бобринев, Е. Ю. Удавцова, А. А. Кондашов // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 51–56. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-1-51-56.

Poroshin, A. A., Bobrinev, E. V., Udavtsova, E. Yu., Kondashov, A. A. [Assessment of the efficiency of the occupational health and safety management system in the industrial sectors]. Occupational Safety in Industry, 2022, no. 1. pp. 51-56. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-1-51-56. (In Russian)

Дата поступления рукописи 08.12.2025

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

Anna Vladimirovna Aleksandrova, Cand. Of Tech. Sci., Associate Professor¹; e-mail: alexanna@mail.ru

Dmitry Alekseevich Pushchin, Postgraduate Student, Head of the Specialist Group²;

e-mail: puschin.dima2016@yandex.ru

Nikita Sergeevich Pankratov, Postgraduate Student¹; e-mail: n.s.pankratov@gmail.com

Alexandra Aleksandrovna Levchuk, Cand. Of Tech. Sci., Associate Professor¹; email: naukabzh@mail.ru

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Kuban State Technological University»

350072, Krasnodar, Moskovskaya St., 2. Phone: +7 (918) 2333179

²Yablonovskoye UAVR Branch, Gazprom Transgaz Krasnodar LLC

385141, Republic of Adygea, Yablonovskiy UTS, Lenin St., 47. Phone: 8 (877) 719-20-26

ANALYSIS OF THE FUNCTIONING OF THE INDUSTRIAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM AT AN ENTERPRISE PERFORMING EMERGENCY RECOVERY WORK

Objective. The improvement of the preventive orientation of the functioning of the Occupational Safety Management System (OSMS).

Methods. The comprehensive research method included the analysis of regulatory and literary sources, as well as standards in the relevant field. A scoring method and expert assessment were applied to evaluate the effectiveness of the OSMS using mathematical approaches.

Results. Taking into account the organizational context, a set of proactive indicators was developed, along with a methodology for assessing the effectiveness of the OSMS. Using the developed recommendations, the effectiveness of the OSMS was assessed at the Yablonovskoye Emergency Recovery Operations Department (YEVROD) branch of Gazprom Transgaz Krasnodar LLC. As an example, the results of the OSMS effectiveness assessment for the YEVROD branch are provided.

Scientific novelty. The methodology makes it possible to systematize functional process characteristics of the OSMS in the form of quantitative indicators, visualize results, and increase the effectiveness of management decision-making aimed at mitigating industrial activity risks that affect the achievement of goals related to preserving the life and health of employees and developing a safety culture.

Practical value. The article is intended for researchers, students, and specialists involved in the operation of oil and gas complex facilities (specialists in occupational health and safety, industrial and fire safety at industrial enterprises, as well as employees directly operating hazardous production facilities). The developed recommendations can be adapted for solving similar challenges in other areas of economic activity.

Keywords: Unified Industrial Safety Management System; effectiveness assessment; proactive indicators; employee; method; efficiency; measures to improve working conditions.

For citation: Aleksandrova A. V., Pushchin D. A., Pankratov N. S., Levchuk A. A. Analysis of the functioning of the industrial safety management system at an enterprise performing emergency recovery work. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 68-77. EDN UXQFIW

УДК 62-752.2

Александра Александровна Порческо, ст. преподаватель; e-mail: aap@rgups.ru
Александр Николаевич Чукарин, д-р техн. наук, профессор; e-mail: chukarin2021@bk.ru
Татьяна Анатольевна Финоченко, канд. техн. наук, заведующая кафедрой; e-mail: fta09@bk.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»
344038, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского
Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2. Тел.: +7 (928) 279-56-14

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГИХ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

Цель. Влияние основных параметров (давление воздуха, нагрузка, частота и амплитуда колебаний) на эффективность виброзащитных свойств пневмоэлементов для повышения безопасности труда операторов машин.

Методы. Для проведения экспериментальных исследований был разработан вибрационный стенд консольного типа, имитирующий условия работы техники, в качестве объекта испытаний использовалась однокамерная воздушная подушка из полибутадиеновый каучука, толщиной 2 мм и рабочей поверхности 400 × 400 мм.

Результаты. Испытания однокамерной воздушной подушки показали, что она может являться демпфером колебаний и рассматриваться в качестве рабочего элемента виброизолятора.

Научная новизна. Впервые предложено использовать пневматические баллоны с воздушным наполнением в роли виброизолирующих элементов для технических устройств снижения вибрации при сравнительно небольших нагрузках.

Практическая значимость. Разработанная конструкция обладает преимуществами автономной работы (не требует постоянного подключения к источнику сжатого воздуха); минимальными требованиями к техническому обслуживанию; возможностью применения для защиты рабочих мест операторов; высокой эффективностью в средне- и высокочастотном диапазонах; относительно низкой статической жесткостью пневматических баллонов при малых нагрузках, что существенно ограничивает эффективность виброизоляции.

Ключевые слова: *вибрация; виброизоляторы; упругие пневмоэлементы; воздушная подушка; вибрационный стол.*

Для цитирования: *Порческо А. А., Чукарин А. Н., Финоченко Т. А. Эффективность использования упругих пневмоэлементов в качестве виброизоляторов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 78–85. – EDN YABGTN*

Постановка проблемы. Одним из наиболее распространенных способов создания демпфера вибрации является использование виброизоляторов. Известно, что детали и узлы виброизоляторов, а также материалы для их изготовления должны обладать упругими и демпфирующими свойствами. Наиболее широко в качестве упругих элементов используют пружины различной модификации, а в качестве демпферов – резину, которая наряду с упругими свойствами, обладает способностью к частичному поглощению энергии в процессе деформации. Однако использование только резины в качестве упругого элемента в основном не эффективно ввиду ее ограниченной возможности к деформации под воздействием внешних сил.

Наряду с пружинами (цилиндрические, конические, тарельчатые и др.), которые используют в виброизоляторах, известны примеры использования других элементов, обладающих упругими свойствами, таких, как наполненные сжатым воздухом резиновые баллоны [1, 2]. Примеры использования сжатого воздуха при создании виброизоляционных конструкций представлены в ряде патентов. Такие

виброизоляторы, как правило, обладают низкой частотой собственных колебаний (2–4 Гц), сочетают упругие и частично демпфирующие свойства. Однако сложность существующих конструкций и, зачастую большие размеры, а также проблемы, возникающие при их эксплуатации, пока ограничивают возможность их применения.

В данной работе представлены результаты исследования эффективности использования в качестве виброизоляторов для технических объектов накачанных воздухом пневматических баллонов, требующих виброзащиты и работающих под относительно небольшой нагрузкой (до 1–1,5 кН), а также влияния величины давления воздуха в камерах, воздействия внешней нагрузки, частоты и амплитуды колебаний, передаваемых от источника вибрации, на виброзащитные свойства [3, 4].

Цель – исследование влияния основных параметров (давление воздуха, нагрузка, частота и амплитуда колебаний) на эффективность виброзащитных свойств пневмоэлементов для повышения безопасности труда операторов машин.

Методика эксперимента. На лабораторном вибрационном стенде консольного типа (рис. 1), генерирующем колебания с параметрами (частоты, амплитуды) аналогичными тем, которые возникают в кабинах машин в процессе их эксплуатации, осуществляли регистрацию амплитуды колебаний, распространяющихся от опорной площадки на корб.

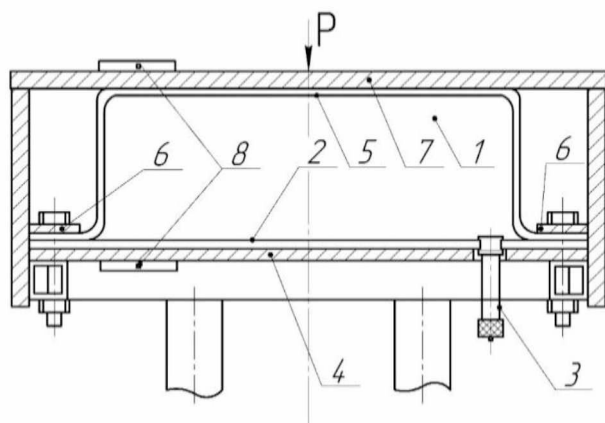


Рис. 1. Общий вид вибрационного стенда

Для измерения уровня колебаний на основание и корпус крепили акселерометры с магнитными держателями, поставляемые с измерительным комплексом шума и вибрации «Ассистент», ОКТАВА-101ВМ. Полученные результаты передавались с датчиков на экран устройства.

Исследовано влияние пневматических резиновых амортизаторов (воздушных подушек) разных конструкций, установленных между вибрирующей платформой (генератором вибрации) и имитацией кабины машиниста (коробом, закрывающим камеру). Испытания проводили в диапазоне частот 1,5–50 Гц, с амплитудой колебаний 0,84–1,6 мм и нагрузке на корб 225–800 Н.

Для исследования возможности использования воздушной подушки, наполненной сжатым воздухом, в качестве виброизолятора изготовлена однокамерная конструкция (рис. 2).



- 1 – воздушная подушка,
- 2 – нижний резиновый лист воздушной подушки,
- 3 – клапан,
- 4 – опорная площадка,
- 5 – верхний резиновый лист воздушной подушки,
- 6 – стальные полосы,
- 7 – корпус,
- 8 – акселерометры

Рис. 2. Схема устройства воздушной подушки

На вибростенд устанавливали воздушную подушку, размеры которой выбирали с учетом возможности ее размещения под креслом машиниста снегоуборочной машины и параметров кресел существующих конструкций. Воздушная подушка 1 образовывалась в полости между двумя листами резины размером 400×400 мм, из полибутадиенового каучука толщиной 2 мм. В нижний лист резины 2 устанавливали резинометаллический клапан от автомобильной камеры 3, который выводился наружу через отверстие в опорной площадке 4. Наложённые друг на друга резиновые листы прижимали через стальные полосы 6 шириной 20 мм и толщиной 3 мм по периметру опорной площадки с помощью болтов М6, обеспечивая герметичность соединения. При проведении испытаний воздушную подушку накачивали воздухом автомобильным насосом. Величину давления воздуха в ней регистрировали водяным манометром с точностью 0,02 кПа при отсутствии внешней нагрузки на корпус. Непосредственно при проведении испытаний на корпус устанавливали металлические блины для создания внешней нагрузки 182,3 Н. На опорной площадке вибростенда создавали колебания с частотой 3,3 Гц, 5,0 Гц и 6,7 Гц и амплитудой 0,32 мм. При проведении испытаний в подушке создавалось давление от 101,4 кПа до 104,73 кПа.

Результаты испытаний. Результаты испытаний, при которых в воздушной камере создавалось давление воздуха в 101,4 кПа, 102,73 кПа, 104,73 кПа, а уровень вибрации L_v (дБ) регистрировался на вибростенде, представлены на рис. 3.

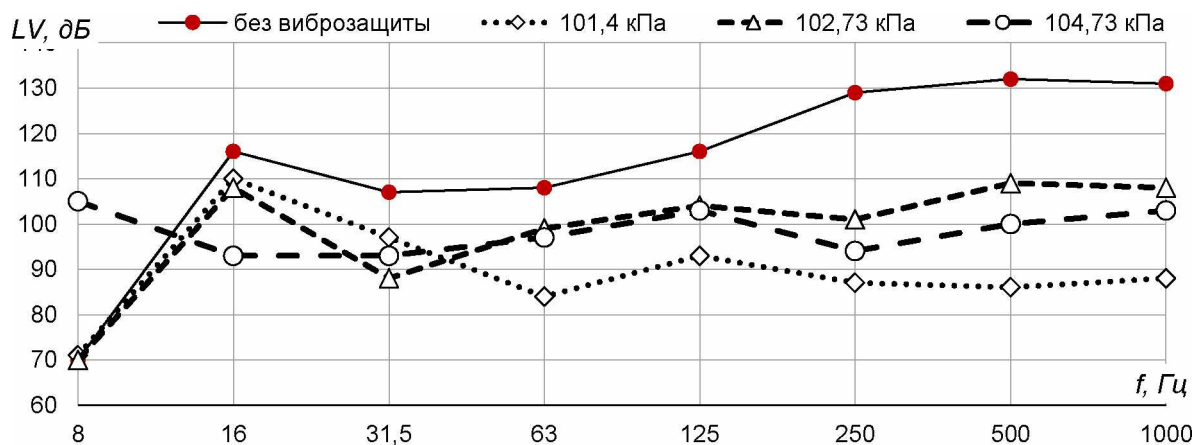


Рис. 3. Уровни вибраций при давлении в воздушной камере 101,4 кПа, 102,73 кПа, 104,73 кПа

Анализ полученных результатов исследований показывает, что наличие пневмовиброзащиты в целом способствует снижению уровня колебаний в среднечастотном и высокочастотном диапазонах, которое проявляется с достаточной стабильностью. Использование виброзащиты позволяет снизить уровень виброскорости в этом диапазоне при различных режимах испытаний на величину от 7 до 36 дБ. Некоторое снижение интенсивности вибрации частично происходит и в низкочастотном диапазоне (8–31,5 Гц), однако, как видно из представленных результатов, в ряде случаев наряду со снижением уровня колебаний, регистрировался и некоторый рост от 1 до 11 дБ.

Как показали проведенные исследования, наименьшая эффективность виброзащиты, особенно в низкочастотном диапазоне, проявлялась при создании давления в пневмокамере 102,73 кПа.

Рост уровня колебаний при использовании различных конструкций виброзащиты в ряде случаев регистрировался и другими исследователями [5, 6]. Это объяснялось наступлением резонанса, вызванного совпадением частоты колебаний в конкретном диапазоне с собственной частотой колебаний используемого виброизолятора. Поэтому собственную частоту колебаний предлагаемой пневмовиброзащиты определяли по формуле [5]:

$$f_0 = \frac{5}{\sqrt{x_{ст}}},$$

где $x_{ст}$ – статический прогиб при воздействии нагрузки, см.

Определяли зависимость частоты собственных колебаний испытываемой виброзащиты от величины воздействующей на нее внешней нагрузки. Пневмокамеру нагружали стальными блинами весом от 88 Н до 930 Н. При определении частоты собственных колебаний в пневмокамере создавали давление 102; 103,5 и 104 кПа. Результаты исследований представлены на рис. 4.

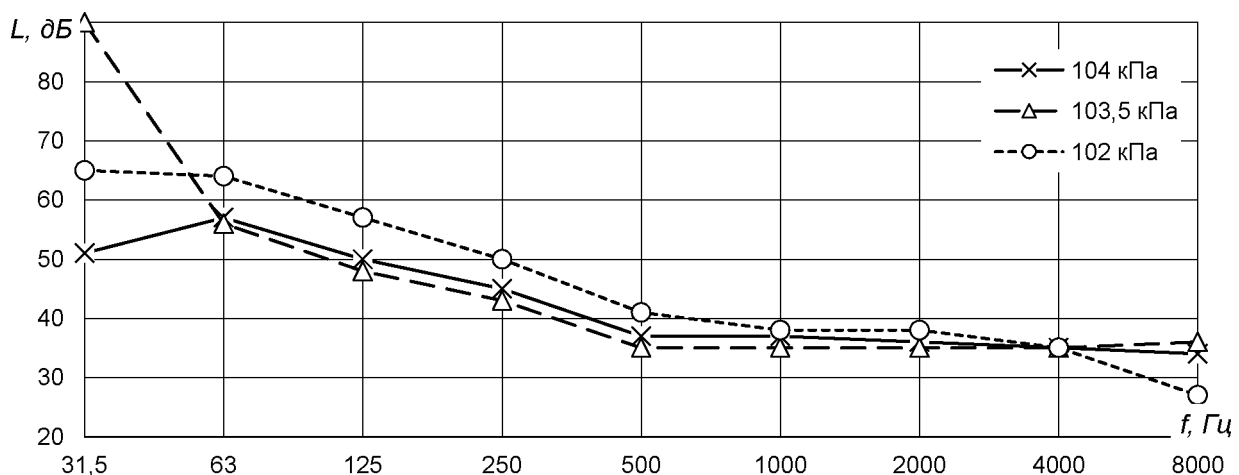


Рис. 4. Зависимость частоты собственных колебаний однокамерного пневмо-виброизолятора от величины нагрузки при давлении в пневмокамере

Из анализа представленных результатов видно, что характер зависимости частоты собственных колебаний пневмо-виброизолятора, начиная с нагрузки 180 Н, существенно не зависит от величины давления воздуха в камере. Вибрационные испытания, результаты которых представлены выше, проводились при нагрузке

183,8 Н. Частота собственных колебаний при такой нагрузке и ниже, в зависимости от созданного в камере давления, находится в пределах 5–9 Гц. Это объясняет отсутствие стабильного виброзащитного эффекта в первой – третьей октавах, то есть в интервале частот 8–31,5 Гц.

Коэффициент ослабления вибрации (K) при использовании виброзащиты определяли по формуле:

$$K = 10^{0,05(L_2 - L_1)},$$

где L_1 – уровни виброскорости на вибростенде, дБ;

L_2 – уровни виброскорости при виброзащите, дБ.

Значения коэффициентов ослабления вибраций, проявляющихся при соответствующих частотах колебаний опорной площадки и давлении в пневмокамере, представлены в таблице.

Таблица

Значения коэффициентов ослабления вибраций K
при испытаниях однокамерной пневмо-виброзащиты

Давление в воздушной камере, кПа	Частота колебаний опорной площадки, Гц	Частота, Гц							
		8	16	31,5	63	125	250	500	1000
101,4	3,3	3,3	1,12	0,5	1,99	1,58	8,91	4,0	2,51
	5,0	1,58	1,58	3,16	3,98	2,0	19,95	25,12	22,39
	6,7	1,26	3,98	3,96	6,31	2,82	25,12	35,48	50,12
101,7	3,3	0,63	0,89	1,26	1,41	1,0	5,62	2,51	2,51
	5,0	1,41	1,58	4,47	2,82	2,51	15,85	8,91	14,13
	6,7	0,1	2,0	2,0	0,89	2,51	2,51	2,51	1,58
102,7	3,3	0,63	0,56	1,58	2,24	1,58	5,01	4,46	2,82
	5,0	1,26	2,82	2,0	3,16	0,35	5,62	2,82	3,98
	6,7	0,79	3,16	4,46	1,58	1,58	11,22	6,31	7,08
104,7	3,3	0,56	0,18	1,78	3,16	3,16	7,08	10,0	11,22
	5,0	0,28	39,81	19,95	7,94	7,08	63,1	39,8	31,62
	6,7	0,5	6,31	3,98	3,55	28,18	31,62	15,85	28,18

Анализ и выводы. Анализ значений коэффициентов ослабления вибраций приводит к аналогичным выводам, которые были сделаны выше при анализе воздействия пневмо-виброизолятора на регистрируемые спектры уровня вибрации. Наблюдается рост эффективности виброзащиты с увеличением давления в воздушной камере до 104 кПа. Наименее эффективно виброзащита проявляет себя при частоте возбуждающих колебаний 3,3 Гц, а в низкочастотном диапазоне,

особенно в первой и второй октавах, коэффициент ослабления вибраций частично регистрируется в диапазоне меньше 1,0. В этом случае наличие виброзащиты может способствовать не снижению, а увеличению колебаний.

Таким образом, полученные результаты испытаний однокамерной воздушной подушки показали, что она может являться демпфером на пути распространения колебаний и рассматриваться в качестве рабочего элемента виброизолятора. Однако достаточно эффективные виброизоляционные свойства при ее использовании проявлялись только в среднечастотном и высокочастотном диапазонах. Коэффициент ослабления вибрации в этих диапазонах, в основном, находился в диапазоне от 2 до 40 единиц.

В низкочастотном диапазоне колебаний устойчивой способности к снижению уровня вибрации данная конструкция не проявила. Возможно, причиной ограниченного виброзащитного эффекта является то, что при проявлении в такой конструкции достаточно высоких свойств как упругого элемента, она обладает относительно низкой способностью к демпфированию колебаний.

К преимуществам пневмо-виброзащиты данной конструкции можно отнести то, что она не требует систематического обслуживания и подключения к постоянно работающему источнику сжатого воздуха и может использоваться в качестве виброизолятора рабочего места машиниста для создания безопасных условий его труда.

Для улучшения вибрационных характеристик пневматических виброизоляторов предпринимались различные подходы. Одним из наиболее перспективных является использование дополнительных демпфирующих элементов, интегрированных в конструкцию баллона. Внедрение демпфирования позволяет снизить амплитуду колебаний вблизи резонансной частоты и расширить эффективный диапазон виброизоляции в область низких частот. Кроме того, регулировка демпфирующих свойств даёт возможность адаптировать характеристики виброизолятора к конкретным условиям эксплуатации и параметрам изолируемого оборудования.

Другим направлением дальнейших исследований является обоснованный выбор геометрии и материалов пневматических баллонов. Изменение формы оболочки баллона, применение армированных материалов или использование многослойных конструкций позволяет повысить статическую жесткость и сохраняя при этом необходимую грузоподъемность. Этот подход требует обоснованного математического моделирования и экспериментальной проверки для достижения оптимального сочетания жесткости, демпфирования и долговечности [7].

Использование пневматических упругих элементов в качестве виброизоляторов является перспективным решением для защиты от вибрации. Несмотря на некоторые ограничения в низкочастотном диапазоне, конструкция демонстрирует хорошие показатели защиты в средних и высоких частотах, что делает её применимой для широкого спектра технических задач.

Список литературы / References

1. Вибрация в технике: Справочник. В 6 томах. Т.6. Защита от вибрации и ударов / под общ. ред. В. М. Челомея. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.

Chelomey, V. M., gen. ed. *Vibratsiya v tekhnike: Spravochnik. V 6 tomakh. T.6. Zashchita ot vibratsii i udarov* [Vibration in Engineering: Handbook. In 6 Volumes. Vol. 6. Protection from Vibration and Shock]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 456 p. (In Russian)

2. Виноградов, Б. В. Гидропневмобаллонная упруговязкая система / Б. В. Виноградов // Вибрации в технике и технологиях. – 2011. – № 1 (61). – С. 15–19.

Vinogradov B. V. *Gidropnevmoballonnaya uprugovyazkaya sistema* [Hydropneumatic gallbladder elastic system]. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2011, no. 1 (61), pp. 15-19. (In Russian)

3. Стенд для исследования комбинированной системы виброзащиты оператора транспортно-технологических машин / Ю. А. Бурьян, В. Н. Сорокин, Н. В. Захаренков, А. Ф. Зелов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 6(52). – С. 13–19. – EDN XRULDP.

Buriyan, Y. A., Sorokin, V. N., Zakharenkov, N. V., Zelov, A. F. *Stend dlya issledovaniya kombinirovannoy vibrozashchitnoy sistemy* [Experimental complex for research of vibration protection combined system of transportation and technological machines operator]. *The Siberian State Automobile and Highway University (SIBADI)*. 2016, no. 6 (52), pp. 13-19. (In Russian)

4. Колесников, И. В. Способы снижения шума и вибрации при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников, С. С. Подуст, А. Н. Чукарин. – М. : ВИНТИ РАН, 2015. – 216 с. – EDN WOBVJH

Kolesnikov, I. V., Podust, S. S., Chukarin, A. N. *Sposoby snizheniya shuma i vibratsii pri proyektirovanii, proizvodstve i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Methods for reducing noise and vibration in the design, production and operation of railway rolling stock], Moscow, VINITI RAN Publ., 2015, 216 p. (In Russian)

5. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. – Москва : Логос, 2017. – 432 с.

Ivanov, N. I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. Moscow, Logos Publ., 2017, 432 p. (In Russian)

6. Косков, М. А. Демпфер на основе эластомера с порошковым наполнителем из магнитомягкого материала / М. А. Косков, Г. В. Степанов, А. С. Иванов // Вестник Пермского университета. Физика. – 2019. – № 4. – С. 5–10. – DOI 10.17072/1994-3598-2019-4-05-10. – EDN SGYXNQ

Koskov, M. A., Stepanov, G. V., Ivanov A. S. *Dempfer na osnove elastomera s poroshkovym napolnitelem iz magnitomyagkogo materiala* [Dampfer based on an elastomer with a powder filler made of a soft magnetic material]. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 5-10. DOI 10.17072/1994-3598-2019-4-05-10 – EDN SGYXNQ (In Russian)

7. Пневматический виброизолятор кабин перспективных транспортно-технологических комплексов сельскохозяйственного назначения / М. М. Жилейкин [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 175. – С. 246–262. – DOI 10.21515/1990-4665-175-021. – EDN WUBAZZ

Zhileikin, M. M., Sirotin, P. V., Chernenko, A. B., Sysoev, M. I., Cherkashin, V. V. *Pnevmaticheskiy vibrozolyator kabin perspektivnykh transportno-tehnologicheskikh kompleksov sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Pneumatic vibration isolator of cabins of promising transport and technological complexes for agricultural purposes]. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 2022, no. 175, pp. 246-262. – DOI 10.21515/1990-4665-175-021 – EDN WUBAZZ. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Р. А. Тишиным
Дата поступления рукописи 05.12.2025

Alexandra Aleksandrovna Porchesko, Senior Lecturer; e-mail: aap@rgups.ru
Aleksandr Nikolaevich Chukarin, Dr. of Tech. Sci., Professor; e-mail: chukarin2021@bk.ru
Tatyana Anatolyevna Finochenko, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: fta09@bk.ru
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Rostov State Transport University»
344038, Rostov region, Rostov-on-Don, Sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka
Narodnogo Opolcheniya, 2. Phone: +7 (928) 279-56-14

EFFICIENCY OF USING ELASTIC PNEUMATIC ELEMENTS AS VIBRATION ISOLATORS

Objective. To study the influence of key parameters (air pressure, load, frequency, and vibration amplitude) on the effectiveness of the vibration-isolating properties of pneumatic elements.

Methods. A cantilever-type vibration rig simulating equipment operating conditions was developed for the experimental studies. A single-chamber air cushion made of polybutadiene rubber, 2 mm thick and with a working surface size of 400 x 400 mm, was used as the test object. The sealing system consisted of bolted steel strips.

Results. Testing of the single-chamber air cushion showed that it can act as an obstacle to vibration propagation and be considered as the working element of a vibration isolator.

Scientific novelty. This is a scientific innovation in the use of air-filled pneumatic cylinders as vibration-isolating elements for technical devices requiring vibration reduction and operating under relatively light loads.

Practical Significance. The developed design offers advantages such as autonomous operation (no constant connection to a compressed air source required); minimal maintenance requirements; the ability to protect operator workstations; and high efficiency in the mid- and high-frequency ranges. This is due to the relatively low static stiffness of pneumatic cylinders under light loads, which significantly limits the effectiveness of vibration isolation.

Keywords: *vibration; vibration isolators; elastic pneumatic elements; air cushion; vibration table.*

For citation: Porchesko A. A., Chukarin A. N., Finochenko T. A. Efficiency of using elastic pneumatic elements as vibration isolators. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 78-85. EDN YABGTN

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [547.53:543-414]; 544.723

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

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

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

Анастасия Александровна Добровольскене, магистрант; e-mail: povetkina0303@mail.ru

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2. Тел.: +7 (949) 407-36-00

ОЦЕНКА СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Исследования сорбционной способности золы-уноса и опилок древесных хвойных пород по отношению к бензолу для использования в качестве компонентов недорогих углеродных сорбентов.

Методы. Оценка сорбционной емкости материалов путем моделирования зависимости между переменными методом линейной регрессии.

Результаты. На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что наибольшей сорбционной емкостью по бензолу обладают опилки древесные хвойных пород. Золу-уноса в сочетании с опилками древесными можно использовать в качестве компонента композиций природных пористых материалов для нейтрализации (засыпки) проливов аварийно химически опасных веществ. Проведена аппроксимация экспериментальных данных, в результате получено уравнение регрессии зависимости сорбционной емкости от массового содержания золы-уноса и опилок древесных.

Научная новизна. Получено уравнение двухфакторной линейной регрессии, описывающее влияние массового содержания золы-уноса и опилок древесных на сорбционную емкость по бензолу в статических условиях.

Практическая значимость. Результаты исследований показали, что опилки древесные хвойных пород и золу-уноса можно использовать в качестве компонентов недорогих углеродных сорбентов для локализации зоны пролива и снижения времени испарения химически опасных веществ в окружающую среду при авариях техногенного характера.

Ключевые слова: *весовой метод; двухфакторная регрессионная модель; зола-уноса; опилки древесные; регрессионный анализ; сорбционная емкость по бензолу.*

Для цитирования: *Мамаев В. В., Лебедева В. В., Храпоненко О. В., Добровольскене А. А. Оценка сорбционной способности природных материалов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 86–91. – EDN VCMNHJ*

Постановка проблемы. Один из эффективных способов снижения времени испарения паров химически опасных веществ с твердой поверхности в окружающую среду заключается в засыпке аварийной зоны пролива сорбентами. Для ликвидации масштабных проливов применение материалов с высокой сорбционной емкостью таких как полимерные сорбенты и активированные угли не рентабельно ввиду их высокой стоимости и дефицита. В связи с этим исследование поглощающей способности промышленных отходов предприятий Донецкого региона относительно их возможного применения в качестве доступных сорбентов представляет актуальную научно-практическую задачу с экологической и экономической точки зрения.

Анализ последних исследований и публикаций. Результаты анализа современных научных публикаций свидетельствуют о широком применении природных материалов в качестве эффективных сорбентов для решения экологических проблем [1–4]. В научной литературе приведены результаты многочисленных исследований по созданию сорбентов на основе промышленных отходов для ликвидации нефтяных разливов [5, 6]. Авторы исследований [7] считают, что непосредственный сбор пролитых веществ с использованием природных поглощающих материалов – главный этап мероприятий при ликвидации масштабных аварийных проливах токсичных веществ. Однако свойства и возможности использования таких материалов в качестве сорбентов требуют дальнейших исследований.

Цель работы – исследование поглощающей способности золы-уноса и опилок древесных хвойных пород по отношению к бензолу для использования в качестве компонентов недорогих природных сорбентов.

Результаты исследований. Объектом исследования выбраны зола-уноса Зуевской ТЭС и опилки древесные хвойных пород как материалы, имеющие потенциал для применения в качестве природных сорбентов [8]. Изучение и оптимизацию сорбционных свойств материалов можно осуществить, используя экспериментально-статистические методы, в частности, метод регрессионного анализа.

Входными факторами приняты индивидуальные вещества – x_1 (зола-уноса), x_2 (опилки древесные) и их двухкомпонентные смеси. Выходным фактором является среднее арифметическое значение сорбционной емкости трех параллельных опытов i -го опыта $\bar{a}_i$, г/г. Так как между независимыми и зависимым факторами установлена линейная зависимость, аппроксимация результатов проведена с помощью множественной линейной регрессии следующего вида

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (1)$$

где y – значение зависимого фактора;

β_0 – свободный член модели;

β_1, β_2 – коэффициенты при независимых факторах;

x_1, x_2 – независимые факторы.

Поскольку параметры уравнения (1) $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ представляют собой числовой результат случайного эксперимента, определить их истинные значения по выборке невозможно. Поэтому вместо уравнения (1) выполнена оценка эмпирического уравнения регрессии

$$a = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2 – эмпирические коэффициенты регрессии.

При определении значений параметров уравнения регрессии (2) число экспериментов соответствовало условию

$$N \geq k + 1, \quad (3)$$

где N – число экспериментов, 1;

k – количество влияющих факторов, 1.

При условии $N = k + 1$ коэффициенты регрессии рассчитывают подстановкой значений влияющих факторов в выражение (2). Однако такое решение задачи является ненадежным, так как измеренные значения переменных содержат различные виды погрешностей.

Для получения более достоверных оценок параметров уравнения (2) выбрано $N = 5$, что удовлетворяет неравенству (3).

После выбора модели регрессии и расчета числа экспериментов определены модельные составы (табл. 1) для исследований по оценке параметров уравнения регрессии (2).

Таблица 1

Модельные составы для оценки параметров уравнения регрессии (2)

Показатель, ед. изм.		Номер опыта				
		1	2	3	4	5
Модельные составы, масс. доля	x_1 – зола-уноса	0,50	0,25	0,75	1,00	0
	x_2 – опилки древесные	0,50	0,75	0,25	0	1,00
Среднее арифметическое значение сорбционной емкости трех параллельных опытов i -го опыта $\bar{a}_i$, г/г		2,80	3,77	1,83	0,95	4,67

Результаты расчета дополнительных величин для определения и оценки параметров уравнения регрессии (2) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета дополнительных величин для определения и оценки параметров уравнения регрессии (2)

a^2	x_1^2	x_2^2	a_{x_1}	a_{x_2}	x_1x_2	$a_{x_1x_2}$	$a - a_{x_1x_2}$	$(a - a_{x_1x_2})^2$
7,84	0,25	0,25	1,40	1,40	0,25	2,804	-0,004	$16 \cdot 10^{-6}$
14,21	0,06	0,56	0,94	2,83	0,19	3,782	-0,012	$144 \cdot 10^{-6}$
3,35	0,56	0,06	1,37	0,46	0,19	1,827	0,003	$9 \cdot 10^{-6}$
0,90	1,00	0	0,95	0	0	0,849	0,101	$10201 \cdot 10^{-6}$
21,81	0	1,00	0	4,67	0	4,759	-0,089	$7921 \cdot 10^{-6}$

Для расчета коэффициентов уравнения регрессии (2) составлена система линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} 5b_0 + 2,5b_1 + 2,5b_2 &= 14,02 \\ 2,5b_0 + 0,38b_1 + 0,13b_2 &= 0,93 \\ 2,5b_0 + 0,13b_1 + 0,38b_2 &= 1,87 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Так как система (4) включает только линейные уравнения, для ее решения применен классический метод Гаусса. Сущность этого метода заключается в нахождении таких значений параметров, при которых сумма квадратов

отклонений экспериментальных значений от предсказанных моделью минимальна. В результате численных расчетов получены значения эмпирических коэффициентов регрессии: $b_0 = -0,001$; $b_1 = 0,85$; $b_2 = 4,76$. После подстановки коэффициентов регрессии в уравнение (2) получено уравнение двухфакторной регрессии, выражающее зависимость сорбционной емкости (a) от массового содержания золы-уноса (x_1) и опилок древесных (x_2) следующего вида:

$$a = 0,85x_1 + 4,76x_2 - 0,001. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) позволяет сделать вывод, что наиболее существенное влияние на сорбционную емкость оказывают опилки древесные (коэффициент при слагаемом x_2 максимальный). Адекватность полученной регрессионной модели (5) оценивали по критерию Фишера путем сравнения его расчетного значения с табличным при доверительном интервале $p = 0,05$.

Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч.}}$ определяют по формуле

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_0^2}, \quad (6)$$

где $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности;

S_0^2 – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсию адекватности рассчитывают по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N - k - 1} \cdot \sum_{i=1}^N (a_{x_1x_2} - \bar{a}_i)^2, \quad (7)$$

где m – число параллельных опытов в эксперименте, 1;

k – количество влияющих факторов, 1;

$a_{x_1x_2}$ – рассчитанное по уравнению регрессии (5) значение сорбционной емкости, г/г.

Расчетное значение критерия Фишера составило 4,97, табличное при $p = 0,05$, числе степеней свободы (при определении дисперсии адекватности) $f_1 = 2$ и $f_2 = 2$ (при определении дисперсии воспроизводимости) $F_{\text{табл.}} = 19$. Так как условие $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл.}}$ соблюдается, гипотеза о неадекватности регрессионной модели (5) отвергается.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что среди исследованных материалов наилучшими поглощающими свойствами обладают опилки древесные хвойных пород (4,67 г/г). Для сравнения, сорбционная емкость по бензолу образцов активированного угля марки АГН равна 1,32 г/г [9].

Золу-уноса, которая отличается от активированного угля АГН меньшими значениями сорбционной емкости, в сочетании с опилками древесными можно использовать в качестве компонента композиций на основе природных пористых материалов для нейтрализации аварийных проливов химически опасных веществ.

Применение недорогих природных сорбентов позволит сократить затраты при ликвидации аварий техногенного характера, связанных с масштабными проливами аварийно химически опасных веществ в окружающую среду.

Список литературы / References

1. Переработка бурых углей в эффективные сорбенты для решения задач охраны окружающей среды и повышения качества жизни / А. П. Козлов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 3 (127). – С. 93–101. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35745313> (дата обращения: 27.03.2026).
- Kozlov, A. P., Zikov, I. Yu., Dudnikova, Yu. N., Tsvetkov, V. E., Fedorova, N. I., Ismagilov, Z. R. [Processing of brown coals into effective sorbents for solving problems of environmental protection and improving the quality of life]. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2018, no. 3 (127), pp. 93-101. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35745313> (accessed on 27/03/2026). (In Russian)
2. Смирнова, Е. В. Влияние углеродных сорбентов на потенциальную способность почв к самоочищению от нефтяного загрязнения / Е. В. Смирнова, Р. В. Окунев, К. Г. Гиниятуллин // Георесурсы. – 2022. – № 24 (3). – С. 210–218.
- Smirnova, E. V., Okunev, R. V., Giniyatullin, K. G. [Influence of carbon sorbents on the potential ability of soils to self-cleaning from petroleum pollution]. Georesursy. 2022, no. 24 (3), pp. 210-218. (In Russian)
3. Петухова, Г. А. Перспективы применения шунгита как сорбента формальдегида в композитных материалах / Г. А. Петухова, Т. А. Кулькова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2021. – № 21 (1). – С. 100–110.
- Petukhova, G. A., Kulkova, T. A. [Prospects for the use of shungite as a formaldehyde sorbent in composite materials]. Sorption and Chromatographic Processes. 2021, no. 21 (1), pp. 100-110. (In Russian)
4. Jurgelane I., Locs J. Shungite application for treatment of drinking water – is it the right choice? Journal of Water and Health. 2021; 9:89-96. (In English)
5. Сорока, М. Л. Применение текстильных отходов в качестве сорбентов для ликвидации разливов нефтепродуктов на транспорте / М. Л. Сорока, Л. А. Ярышкина // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 31. – С. 129–135.
- Soroka, M. L., Yaryshkina, L. A. [Usage of textile waste as sorbents for elimination of oil spill caused by transport]. Automobile Transport. 2012, Issue 31, pp. 129-135. (In Russian)
6. Bilius F., Nikoli T., Kalderis D., Gasparatos, D. Towards a Soil Remediation Strategy Using Biochar: Effects on Soil Chemical Properties and Bioavailability of Potentially Toxic Elements. Toxics. 2021, 9(8):184. DOI: 10.3390/toxic (In English)
7. Сорбционная способность промышленных отходов и каменных углей / А. В. Агарков, А. А. Козлитин, В. В. Лебедева, О. Н. Щербакова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 3 (56). – С. 46–55.
- Agarkov, A. V., Lebedeva, V. V., Kozlitsin, A. A., Shcherbakova, O. N. [Sorption capacity of industrial waste and coal]. Scientific Bulletin of the NIIGD «Respirator». 2019, no. 3 (56), pp. 46-55. (In Russian)
8. Природные сорбенты для поглощения химически опасных веществ / А. В. Агарков, В. Г. Агеев, А. А. Козлитин, В. В. Лебедева // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2020. – № 3 (57). – С. 7–17.
- Agarkov, A. V., Ageev, V. G., Kozlitsin, A. A., Lebedeva, V. V. [Natural Sorbents for Absorption of Chemically Hazardous Substances]. Scientific Bulletin of the NIIGD «Respirator». 2020, no. 3 (57), pp. 7-17. (In Russian)
9. Способность пористых материалов поглощать аварийно химически опасные вещества / А. В. Агарков, А. А. Козлитин, В. В. Лебедева, О. Н. Щербакова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 1 (56). – С. 94–100.

Agarkov, A. V., Kozlitsin, A. A., Lebedeva, V. V., Shcherbakova, O. N. [The ability of porous materials to absorb hazardous chemicals]. *Scientific Bulletin of the NIIGD «Respirator»*. 2019, no. 1 (56), pp. 94–100. (In Russian)

Дата поступления рукописи 25.03.2026
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Азеевым

Valery Vladimirovich Mamaev, Dr. of Tech. Sci., Main Researcher; e-mail: v.mamaev@80.mchs.gov.ru
Victoria Valentinovna Lebedeva, Cand. of Tech. Sci., Head of Dep.; e-mail: v.lebedeva@80.mchs.gov.ru
Oleg Vladimirovich Khraponenko, Senior Researcher; e-mail: o.khraponenko@80.mchs.gov.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157, Phone: +7 (856) 252-78-55
Anastasia Aleksandrovna Dobrovolskene, Master's student; e-mail: povetkina0303@mail.ru
«Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture» – branch of the Federal
State Budget Educational Institution of Higher Education
«Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)»
286123, Makeyevka, Derzhavina St., 2. Phone: +7 (949) 407-36-00

ASSESSMENT OF SORPTION CAPACITY OF NATURAL MATERIALS

Objective. Experimental studies of the sorption capacity of fly ash and sawdust from coniferous wood in relation to benzene for use as components of cheap carbon sorbents.

Methods. Evaluation of the sorption capacity of materials by modeling the relationship between variables using linear regression.

Results. Based on the results of experimental studies, it has been established that sawdust from coniferous trees has the highest sorption capacity for benzene. Fly ash combined with sawdust can be used as a component of natural porous materials for neutralizing (filling) spills of hazardous chemicals. The experimental data were approximated, resulting in a regression equation that establishes the dependence of sorption capacity on the mass content of fly ash and sawdust.

Scientific novelty. A two-factor linear regression equation was obtained that describes the effect of the mass content of fly ash and sawdust on the sorption capacity for benzene under static conditions.

Practical significance. The research results showed that sawdust from coniferous trees and fly ash can be used as cheap carbon sorbents to localize the spill zone and reduce the time it takes for chemically hazardous substances to evaporate into the environment during man-made accidents.

Keywords: *weight method; two-factor regression model; fly ash; wood chips; regression analysis; benzene sorption capacity.*

For citation: Mamaev V. V., Lebedeva V. V., Khraponenko O. V., Dobrovolskene A. A. Assessment of Sorption Capacity of Natural Materials. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 86-91. EDN VCMHMJ

УДК 614.8.084:[628.4.047:536.46]:519.63

Юрий Витальевич Копец, канд. техн. наук, зав. кафедрой; e-mail: yura_87-87@mail.ru
Владимир Юрьевич Малкин, д-р экон. наук, профессор, директор Института гражданской защиты; e-mail: talkvi@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А. Тел.: +7 (959) 111-29-45
Анатолий Валерьевич Рыбаков, д-р техн. наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра; e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»
141435, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: +7 (929) 631-34-95

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА

Цель. Разработка физико-химической модели генерации опасных газообразных факторов при пиролизе твердых коммунальных отходов, основанной на системе дифференциальных уравнений в частных производных, с реализацией численного метода решения, оценкой устойчивости и обоснованием начальных и граничных условий для прогнозирования условий труда персонала.

Методы. Для решения задачи применяется численный метод конечных разностей на равномерной пространственной сетке с использованием комбинации явных и неявных схем.

Результаты. Модель представлена системой нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающих химические реакции первого порядка, диффузионный и конвективный перенос. Приведены начальные и граничные условия, отражающие режимы загрузки сырья и вентиляции рабочего пространства.

Научная новизна. Предложена физико-химическая модель, описывающая кинетику разложения органической компоненты твердых коммунальных отходов, тепломассоперенос в реакционной зоне и образование ключевых токсичных компонентов (СО, летучих органических соединений).

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют прогнозировать уровни профессионального риска и обосновывать приоритетные меры коллективной и индивидуальной защиты. Разработанная модель может быть интегрирована в системы управления охраной труда на предприятиях по обращению с отходами. На примере типового участка пиролиза показано распределение концентраций опасных веществ во времени и пространстве, установлены критические зоны превышения предельно допустимых концентраций.

Ключевые слова: пиролиз твердых коммунальных отходов; физико-химическое моделирование; дифференциальные уравнения; численное решение; прогнозирование условий труда; опасные факторы; устойчивость решения.

Для цитирования: Копец Ю. В., Малкин В. Ю., Рыбаков А. В. Физико-химическое моделирование генерации опасных факторов при пиролизе твердых коммунальных отходов для прогнозирования условий труда // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 92–97. – EDN VDRWOO

Постановка проблемы. Внедрение технологий высокотемпературной переработки твердых коммунальных отходов (далее – ТКО), в частности, пиролиза¹, сопровождается появлением новых профессиональных рисков связанных

¹ ГОСТ Р 58483-2019. Наилучшие доступные технологии. Обращение с отходами. Термическая переработка отходов. – Введ. 2019-12-01. – М.: Стандартинформ, 2019.

с выделением токсичных газов, паров и аэрозолей. В отличие от традиционных методов захоронения и сортировки, пиролиз характеризуется сложными физико-химическими процессами, в ходе которых образуются такие опасные вещества, как оксид углерода, водород, метан, летучие органические соединения (далее – ЛОС) и полициклические ароматические углеводороды [1–3].

Анализ последних исследований. Существующие подходы к оценке условий труда на объектах обращения с ТКО^{2,3} базируются в основном на натурных измерениях и статистических данных, что не позволяет прогнозировать динамику изменения опасных факторов в нештатных ситуациях или при изменении состава сырья. Методы системного анализа и логико-вероятностного моделирования [4, 5], эффективные для оценки интегральной защищенности, не дают численного описания пространственно-временного распределения вредных веществ, необходимого для обоснования систем вентиляции и средств индивидуальной защиты.

В связи с этим актуальным является разработка физико-химических моделей, позволяющих на основе фундаментальных законов сохранения массы и энергии, а также кинетики химических реакций, прогнозировать генерацию опасных факторов в рабочей зоне [6]. Такие модели должны учитывать нестационарность процессов, характерную для циклической загрузки пиролизных установок, и обеспечивать возможность оценки устойчивости решений к возмущениям параметров.

Цель исследования – разработка физико-химической модели генерации опасных газообразных факторов при пиролизе ТКО, основанной на системе дифференциальных уравнений в частных производных, с реализацией численного метода решения, оценкой устойчивости и обоснованием начальных и граничных условий для прогнозирования условий труда персонала.

Результаты исследования. Типовой участок пиролиза ТКО включает реактор периодического действия, зону выгрузки твердого остатка и систему газоотвода. В процессе пиролиза органическая составляющая отходов подвергается термическому разложению с образованием газообразных продуктов, которые могут поступать в рабочую зону через неплотности оборудования, при открытии загрузочных люков или в аварийных ситуациях.

Для описания процесса выделения и распространения опасных веществ примем следующие допущения. Органическая часть ТКО представлена эффективным компонентом, разлагающимся по реакции первого порядка с образованием газоносителя (СО) и летучих органических соединений [6]. Процесс теплопередачи в реакционной зоне описывается уравнением теплопроводности с внутренним источником тепла, обусловленным эндотермическим эффектом реакции. Перенос газообразных продуктов в рабочей зоне осуществляется за счет диффузии и конвекции, вызванной работой местной вытяжной вентиляции и естественной конвекцией. Температура в реакторе считается квазиоднородной по объему в силу интенсивного перемешивания [6].

Для математической постановки задачи по проведению исследования в области моделирования воздействия опасных факторов при пиролизе ТКО необходимо рассмотрение основных дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы (1) – (4):

² Методика оценки профессиональных рисков, утв. Приказом Минтруда России от 29.10.2021 № 771н.

³ Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005.

– *уравнение кинетики разложения органической массы:*

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -k(T) \cdot C_s, \quad (1)$$

где C_s – концентрация реагирующей органической фазы, кг/м³;

$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$ – константа скорости реакции, описываемая уравнением Аррениуса;

A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E_a – энергия активации, Дж/моль;

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

T – температура, К;

– *уравнение теплового баланса в реакционной зоне:*

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + Q_{\text{реак}} \cdot \frac{\partial C_s}{\partial t}, \quad (2)$$

где ρ , c_p , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность реакционной массы соответственно (кг/м³, Дж/(кг·К), Вт/(м·К));

$Q_{\text{реак}}$ – тепловой эффект реакции (эндотермический, $Q_{\text{реак}} < 0$);

∇^2 – оператор Лапласа используется в уравнении теплопроводности (член $\lambda \cdot \nabla^2 T$) и также в уравнении (3) переноса примеси (член $D \nabla^2 C_g$), описывая диффузионный перенос тепла и массы;

– *уравнение переноса газообразных продуктов (например, CO) в рабочей зоне:*

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + u \cdot \nabla C_g = D \nabla^2 C_g + S, \quad (3)$$

где C_g – концентрация газа в воздухе рабочей зоны, мг/м³;

u – поле скорости воздуха, м/с;

D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с;

S – источник, обусловленный выделением газа из реактора, мг/(м³·с).

Функцию источника (эмиссионный член) S определяют по формуле:

$$S = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{\partial C_s}{\partial t} \cdot \frac{V_{\text{реак}}}{V_{\text{зон}}} \cdot \delta \cdot (r - r_0), \quad (4)$$

где α – стехиометрический коэффициент (масса газа на массу разложившейся органики);

β – коэффициент протечек (доля выделившегося газа, поступающего в рабочую зону);

$V_{\text{реак}}$ и $V_{\text{зон}}$ – объемы реактора и рабочей зоны, соответственно, м³;

δ – дельта-функция Дирака, локализирующая источник в точке r_0 (место возможной разгерметизации или технологический проем);

– *уравнение движения воздуха* (осредненное по Рейнольдсу для турбулентного течения) в приближении потенциального течения или с использованием модели $k - \varepsilon$ [7] задается через начальные условия, включая поле скоростей, которое является стационарным, полученным из предварительного расчета вентиляции.

При $t = 0$: $C_s(0) = C_{s0}$ – начальная концентрация органики в загрузке (определяется морфологическим составом ТКО), $T(0) = T_{\text{среды}}$ – температура

окружающей среды, $C_g(r, 0) = C_{g, \text{фон}}$ – фоновые концентрации (обычно принимают равными нулю или ПДК).

Сформулируем задачу моделирования как определение пространственно-временных полей концентраций опасных газообразных компонентов $C_g(r, t)$ и температуры $T(r, t)$ в рабочей зоне, которые удовлетворяют системе дифференциальных уравнений (1) – (4). Количественной мерой потенциального воздействия на персонал предлагается интегральный функционал Φ как суммарная масса опасного вещества, поступившего в дыхательную зону за рассматриваемый период, либо нормированная дозовая нагрузка:

$$\Phi[T, C_g] = \int_0^{t_{\max}} \int_{\Omega_{\text{зоны}}} (\chi(r) \cdot C_g(r, t; T(r, t))) d\Omega dt, \quad (5)$$

где Ω – область рабочей зоны;

$\chi(r)$ – индикатор присутствия персонала (может быть принят равным 1 в местах выполнения операций и 0 в остальных зонах).

Данный функционал позволяет количественно сопоставить различные сценарии (режимы вентиляции, герметизации, состава сырья) по уровню интегральной опасности. Зависимость C_g от T подчёркивает, что температурное поле непосредственно определяет интенсивность генерации и пространственное распределение токсичных примесей.

Таким образом, задача сводится к нахождению функций $C_g(r, t)$ и $T(r, t)$, являющихся решением краевой задачи (1) – (4), и последующему вычислению функционала Φ . Устойчивость явной схемы для уравнения переноса определяется условием Куранта – Фридрихса – Леви [8], которое имеет вид:

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{\Delta x}{|u|_{\max}}, \frac{(\Delta x)^2}{2D} \right), \quad (6)$$

где $|u|_{\max}$ – максимальное значение скорости в расчётной области.

Неявная схема для теплопроводности безусловно устойчива, поэтому общий шаг Δt выбирается из условия (6).

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Разработанная физико-химическая модель может быть использована для прогнозной оценки условий труда на стадии проектирования новых пиролизных установок, позволяя определить необходимую производительность систем вентиляции и локализации выбросов; оценки эффективности планируемых мероприятий по снижению риска (например, герметизация оборудования, увеличение кратности воздухообмена) путем параметрических расчетов.

Дальнейшее развитие модели предполагает учет многокомпонентного состава газовой фазы, введение более детальной кинетической схемы (включая образование диоксинов и фуранов)^{4,5}, а также интеграцию с системами цифрового мониторинга в рамках концепции «цифрового двойника» участка пиролиза.

⁴ Методика оценки профессиональных рисков (утв. Приказом Минтруда России от 29.10.2021 № 771н)

⁵ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместо устаревшего Р 2.2.2006-05)

Список литературы/References

1. Повышение эффективности пиролизной переработки твердых коммунальных отходов / Габитов Р. Н., Колибаба О. Б., Долинин Д. А., Чижилова М. М. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – вып. 2. – С. 19–27.
Gabitov, R. N., Kolibaba, O. B., Dolinin, D. A., Chizhikova, M. M. [Improvement of efficiency of pyrolysis processing of municipal solid waste]. Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2023, no. 2, pp. 19-27. (In Russian)
2. Копец, Ю. В. Управление профессиональными рисками на промышленных предприятиях: современные подходы и инструменты / Ю. В. Копец, А. Т. Павленко // Безопасность труда в промышленности. – 2026. – № 1. – С. 78-83. – DOI 10.24000/0409-2961-2026-1-78-83. – EDN ZSBCRU.
Kopets, Iu. V., Pavlenko, A. T. [Professional Risk Management at Industrial Enterprises: Modern Approaches and Tools]. Occupational Safety in Industry, 2026, no 1, pp. 78-83, DOI 10.24000/0409-2961-2026-1-78-83. EDN ZSBCRU. (In Russian)
3. Копец, Ю. В. Логико-вероятностная модель оценки интегральной защищенности персонала предприятий по обращению с твердыми коммунальными отходами с использованием технологий пиролиза / Ю. В. Копец, А. Т. Павленко, В. Ю. Малкин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2025. – № 4(5). – С. 40-48.
Kopets, Iu. V., Pavlenko, A. T., Malkin, V. Yu. [A logical and probabilistic model for assessing the integral security of personnel of enterprises dealing with solid municipal waste using pyrolysis technologies]. Bulletin of Lugansk State University named after Vladimir Dahl, 2025, no. 4(5), pp. 40-48. (In Russian)
4. Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование: учебник и практикум для вузов / П. Г. Белов. – Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 721 с. – ISBN 978-5-534-17939-2.
Belov, P. G. [Risk management, system analysis and modeling: textbook and workshop for universities]. Moscow, URAIT Publ., 2026, 721 p. (In Russian)
5. Зализняк, В. Е. Математическое моделирование: учебник для вузов / В. Е. Зализняк, О. А. Золотов. – М.: Издательство Юрайт, 2026. – 125 с. – ISBN 978-5-534-20525-1.
Zaliznyak, V. E., Zolotov, O. A. [Mathematical modeling: a textbook for universities]. Moscow, URAIT Publ., 125 p. (In Russian)
6. Кузнецова, А. Н. Моделирование при анализе рисков химических аварий / А. Н. Кузнецова, Е. А. Хамидуллина // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – Т. 5, № 2. – С. 173–186.
Kuznetsova, A. N., Khamidullina, E. A. [Modeling for chemical accident risk assessment]. XXI century. Technosphere Safety, 2020, no. 5(2), pp. 173-186. (In Russian)
7. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2nd ed. Pearson, 2007. 503 p. (In English)
8. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. Res. Dev. 1967. Vol. 11. No. 2. P. 215–234. (In English)

*Дата поступления рукописи 02.04.2026
Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым*

Iuriy Vitalievich Kopets, Cand. of Tech. Sci., Head of the Department; e-mail: Yura_87-87@mail.ru
Vladimir Yuryevich Malkin, Dr. of Economics, Professor, Director of the Institute of Civil Defense;
e-mail: malkvu@mail.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Lugansk Vladimir Dahl State University»

291034, Lugansk, Molodezhnyy Kv., 20-a. Phone: +7 (959) 111-29-45

Anatoly Valerievich Rybakov, Dr. of Tech. Sci., Professor, Head of the Research Center;

e-mail: anatoll_rubakov@mail.ru

Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education

«The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia»

141435, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya St., 1A. Phone: +7 (929) 631-34-95

PHYSICO-CHEMICAL MODELING OF HAZARD GENERATION DURING PYROLYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE TO PREDICT WORKING CONDITIONS

Purpose. Development of a physico-chemical model for the generation of hazardous gaseous factors during pyrolysis of municipal solid waste, based on a system of partial differential equations, with the implementation of a numerical solution method, stability assessment and justification of initial and boundary conditions for predicting the working conditions of personnel.

Methods. A numerical method is used to solve the problem. To solve the system of equations, the finite difference method is applied on a uniform spatial grid using a combination of explicit and implicit schemes.

Results. The model is represented by a system of unsteady partial differential equations that take into account first-order chemical reactions, diffusion and convective transport. The initial and boundary conditions reflecting the modes of loading raw materials and ventilation of the workspace are given.

Scientific novelty. A physicochemical model is proposed that describes the kinetics of decomposition of the organic component of municipal solid waste, heat and mass transfer in the reaction zone, and the formation of key toxic components (CO, volatile organic compounds).

Practical value. Using the example of a typical pyrolysis site, the distribution of concentrations of hazardous substances in time and space is shown, and critical zones of exceeding the maximum permissible concentrations are established. The results obtained make it possible to predict occupational risk levels and justify priority measures of collective and individual protection. The developed model can be integrated into occupational health and safety management systems at waste management enterprises.

Keywords: *pyrolysis of municipal solid waste; physico-chemical modeling; differential equations; numerical solution; forecasting of working conditions; hazardous factors; stability of the solution.*

For citation: Kopets Iu. V., Malkin V. Yu., Rybakov A. V. Physico-chemical modeling of hazard generation during pyrolysis of municipal solid waste to predict working conditions. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 92-97. EDN VDRWOO

УДК 614.84:355.58

*Александр Викторович Кузьмин, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: avkuzmin16@gmail.com
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»
420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10. Тел.: +7 (843) 231-01-09*

Анатолий Анатольевич Кондратьев, адъюнкт; e-mail: kondratef@sky-lon.ru

Евгений Вячеславович Иванов, канд. техн. наук, доцент кафедры;

e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»

141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: +7 (498) 699-08-67

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ОБЪЕМА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ОТ ПОЖАРОВ

Цель. Формирование методического подхода к обоснованию рационального объема мероприятий по повышению уровня защищенности населения и территорий от природных пожаров.

Методы. Применен комплексный метод исследования, включающий анализ литературных источников, а также – существующего научно-методического аппарата обоснования перечня и объемов противопожарных мероприятий.

Результаты. Установлено, что увеличение финансирования мероприятий по защите от природных пожаров не обеспечивает стопроцентное достижение целевых показателей по количеству и параметрам природных пожаров.

Научная новизна. Разработанная методология обеспечивает наиболее рациональное распределение ресурсов и максимизацию итоговой эффективности системы защиты населения и территорий от природных пожаров.

Практическая значимость. Представленные практические рекомендации могут быть полезны с точки зрения обеспечения высокой готовности аварийно-спасательных служб к выполнению задач по предназначению.

Ключевые слова: природные пожары, система защиты населения, методический подход, научно-методический аппарат, оценка рисков.

Для цитирования: Кузьмин А. В., Кондратьев А. А., Иванов Е. В. Обоснование рационального объема мероприятий по повышению защищенности территории от пожаров // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2026. – № 2 (63). – С. 98–107. – EDN YHNOEC

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Актуальность проблемы защиты населения и территорий от природных пожаров в современных климатических и социально-экономических условиях трудно переоценить. Усиление проявлений засухи, рост плотности населения в пожароопасных зонах, изменение ландшафтов и человеческая деятельность, обуславливающая опасность возникновения природных пожаров, диктует необходимость формирования надежной и эффективной системы защиты населения и территорий от природных пожаров [1].

На основе анализа проблемной ситуации предложена гипотеза разработки научно-методического аппарата по обоснованию рациональных мероприятий защиты. Рассмотрен пример решения задачи обоснования перечня и объемов мероприятий по повышению защищенности населения и территорий от природных пожаров, а также направления дальнейшей апробации и интеграции в практику.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение некоторых проблем создает межвидовая разобщенность по планированию и реализации мероприятий защиты населения и территорий от природных пожаров, что требует формирования единых взаимосвязанных подходов к решению указанной задачи с четким распределением конкретных обязанностей по решаемым частным задачам [2].

Анализ известных научно-методических аппаратов в области обоснования подобных мероприятий показал, что повышение эффективности защиты населения и территорий от природных пожаров невозможно без разработки единого методического подхода, который позволит формализовать задачу обоснования перечня и объемов противопожарных мероприятий с учётом природных, техногенных и организационных ограничений [3].

Результаты анализа позволили сформулировать проблемную ситуацию, когда, несмотря на увеличение финансирования мероприятий по защите от природных пожаров, целевые показатели по количеству природных пожаров и сгоревшей площади достичь не удастся [2]. В связи с этим осуществлена формализованная постановка задачи, которая заключается в определении рационального перечня и объемов мероприятий по повышению защищенности населения и территории от природных пожаров с учетом ряда ограничений [4].

Для совершенствования научно-методического аппарата обеспечения защищенности населения и территории от природных пожаров предлагается разработать методический подход применения известных и новых методов посредством системной декомпозиции, что обеспечит научную и практическую ценность для органов власти субъектов Российской Федерации.

Цель исследования: Формирование методического подхода к обоснованию рационального объема мероприятий по повышению уровня защищенности населения и территорий от природных пожаров.

Постановка задачи исследования. В современной практике обеспечения пожарной безопасности отсутствует единая, согласованная и научно обоснованная методика, позволяющая на основе всестороннего анализа факторов и рисков сформировать рациональный перечень и объёмы мероприятий по защите населения и территорий от природных пожаров.

Существующие подходы во многих случаях фрагментарны: одни исследования концентрируются на детерминантах возникновения и распространения пожаров (классификация топлива, климатические и ландшафтные условия), другие – на оценке пожарной опасности и мониторинге с использованием дистанционных данных, или на оценке отдельных мероприятий (эвакуация, создание минерализованных полос, оборудование и ресурсы) без их системного объединения в модель поддержки управленческих решений [5].

На практике это проявляется в нескольких взаимосвязанных ограничениях:

- исходные данные по разным компонентам, обуславливающих пожарную опасность, часто неоднородны по пространственному покрытию и качеству (статистика возникших пожаров, метеорологические условия, сведения о лесных горючих материалах и антропогенной нагрузке), что затрудняет их интеграцию в единую аналитическую схему [5];
- нормативно-методическая база и методики оценки эффективности мероприятий разрознены или ориентированы на отдельные виды объектов и не снабжены механизмами количественной валидации и сопоставления альтернатив [6, 7].

В условиях ограниченности ресурсов и высокой пожарной нагрузки это приводит к тому, что распределение средств на меры защиты часто происходит не на базе комплексных научных расчётов, учитывающих множество критериев (экономических, социальных и экологических) реализуемых мероприятий, а основывается на эмпирическом подходе или на предписаниях ведомственных инструкций. Одновременно отмечается дефицит инструментов, позволяющих проводить комплексную оценку ожидаемого эффекта от совокупности мер (профилактика, мониторинг, инженерные барьеры, организация эвакуации), что препятствует разработке обоснованных программ защиты для регионов с различной спецификой (лесные, лесостепные, торфяные и др. зоны) [8].

Исходя из этого, актуальной является разработка целостного методического подхода, который бы объединял:

- стандартизированную систему сбора и валидации данных;
- многоуровневые модели оценки риска и распространения пожаров;
- критерии и оценку эффективности для всех типов мероприятий;
- алгоритмы многокритериальной оптимизации распределения ресурсов с учётом региональных особенностей и неопределённости исходных данных.

Такая методика позволит перейти от фрагментарных решений к научно обоснованному управлению рисками природных пожаров и повысит эффективность и транспарентность принимаемых мер в интересах защиты населения и территорий [9].

В качестве подхода к определению значений показателя эффективности системы защиты от природных пожаров предлагается рассматривать применение алгоритмов нечёткой логики, позволяющих учесть неопределённость, многокритериальность и взаимосвязь различных факторов. Этот подход особенно полезен, когда требуется оценить комплексную величину, которая зависит от множества частных функций (в рассматриваемом примере это мониторинг, оповещение, тушение, эвакуация) и внешних факторов (климат, антропогенное воздействие, география) [4].

Оценка состояния защищённости сводится к последовательному решению задач:

- определение входных параметров для оценки состояния подсистем, обеспечивающих защиту населения и территорий от природных пожаров [4];
- построение системы нечетких множеств для каждой подсистемы и системы в целом;
- формирование правил нечеткого вывода;
- агрегация входных данных;
- дефазификация;
- интерпретация полученного результата.

При этом, на этапе дефазификации появляется возможность количественного определения значений показателя защищённости k .

Дальнейшее решение рассматриваемой задачи заключается в оценке зависимости приращения показателя защищённости (величины Δk) при реализации определенных объемов конкретных мероприятий защиты, оказывающих влияние на входные параметры и обоснования такого распределения ограниченных ресурсов, которые приводят к максимуму величину показателя защищённости:

$$k = f \left((F(M_f); O(M_o); L(M_l); E(M_e); T_M) \middle| \theta \right)^M \rightarrow \max, \quad (1)$$

где F, O, L, E – функции, характеризующая эффективность (соответственно):

- системы мониторинга и прогнозирования пожарной обстановки;

- системы оповещения и информирования населения о пожарной обстановке;
- локализации и тушения природных пожаров;
- выполнения мероприятий по эвакуации населения из опасной зоны;

T_M – время, отводимое на реализацию мероприятий;

$M_{f,o,l,e}$ – мероприятия (в соответствии с выполняемыми функциями), реализуемые в рамках повышения защищенности населения и территории от природных пожаров;

Θ – факторы, оказывающие влияние на пожарную обстановку (климатические, антропогенные, географические и т. п.) [4].

При заданных Θ и с учетом ограничений на объемы выполняемых мероприятий (2) и времени на их реализацию (3):

$$\sum M_{f,o,l,e} \leq C_{\text{доп}}, \quad (2)$$

$$T_M < T_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{доп}}$ – допустимое время реализации мероприятий, направленных на повышение защищенности населения и территорий от природных пожаров;

$C_{\text{доп}}$ – максимальные объемы ресурсов, выделяемых на реализацию мероприятий защиты.

В качестве ограничения принимаем, что мероприятия повышения защищенности населения и территории от природных пожаров планируются в диапазоне от минимально необходимого до максимально допустимого уровня, что соответствует принципу «разумной достаточности» в управлении рисками

$$M_{f,o,l,e \min} \leq M_{f,o,l,e} < M_{f,o,l,e \max}, \quad (4)$$

где $M_{f,o,l,e \min}$, $M_{f,o,l,e \max}$ – минимально необходимые и максимально допустимые объемы мероприятий, реализуемых в рамках повышения защищенности населения и территории от природных пожаров (соответственно);

Полученное рациональное распределение ограниченных ресурсов по необходимым мероприятиям будет решением предложенной оптимизационной задачи и может быть положено в основу формируемого Плана предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, вызванных природными пожарами на территории субъекта Российской Федерации.

Результаты исследования. Каждая из рассматриваемых подсистем характеризуется своим набором показателей, позволяющим провести ее качественную оценку:

$$F = \langle f_1; f_2 \dots f_n \rangle; O = \langle o_1; o_2 \dots o_m \rangle; L = \langle l_1; l_2 \dots l_r \rangle; E = \langle e_1; e_2 \dots e_k \rangle.$$

Данные показатели являются входными параметрами для проведения оценки состояния подсистем, обеспечивающих защиту населения и территорий от природных пожаров. За счет выполнения мероприятий $M_{f,o,l,e}$ обеспечивается изменение показателей F , O , L , E на некоторую измеряемую величину Δ .

Задача вида (1) относится к классу оптимизационных задач, решение которой возможно за счет применения градиентных методов [10]. Оценка градиента позволяет обосновать рекомендации по изменению показателей F , O , L , E таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное приращение целевой функции Δk .

Тогда значения градиента по рассматриваемой функции будут иметь вид:

$$\frac{\partial k(M_{f,o,l,e})}{\partial M_{f,o,l,e}}. \quad (5)$$

Выбор конкретного показателя, который изменяется выполнением мероприятий, может быть осуществлен за счет найденной относительной величины приращений градиента (π_z) [11]:

$$\pi_z = \frac{\partial k(M_{f,o,l,e})}{\partial M_{f,o,l,e}} \cdot \left[\frac{\partial k(M_f)}{\partial M_f} + \frac{\partial k(M_o)}{\partial M_o} + \frac{\partial k(M_l)}{\partial M_l} + \frac{\partial k(M_e)}{\partial M_e} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Проранжировав и выбрав максимальные значения π_z , определяем приоритетные направления по используемым ресурсам с точки зрения получения приращения величины показателя защищенности.

Особенностью реализуемых мероприятий является их дискретность. То есть величины F , O , L , E могут быть изменены на некую известную, фиксированную, дискретную величину ΔF , ΔO , ΔL , ΔE , что будет сопряжено с выполнением конкретных мероприятий. Ряд мероприятий являются невозпроизводимыми повторно в силу своей однократной природы, т.к. их повторная реализация не приводит к повышению общей эффективности системы. Для корректного учета данного ограничения, в рамках упрощенной модели мероприятия предлагается формализовать как бинарные, что соответствует принципам целочисленного программирования (1 – мероприятие выполнено, 0 – не выполнено) [12]. Таким образом, в рамках предложенной модели такие мероприятия могут быть выполнены исключительно однократно, а их повторное включение в План является недопустимым.

Соответственно алгоритм определения рационального распределения ограниченных ресурсов состоит в итерационном выполнении следующих операций:

1. Определение величины $\pi_z = \max \{ \pi_z \}$.
2. Оценка достаточности ресурсов для выполнения мероприятий из условия $M_{f,o,l,e}^1 \leq C_{\text{доп}}$ (где $M_{f,o,l,e}^1$ – мероприятие, реализуемое на первом шаге).
3. В случае если условие соблюдается, осуществляют проверку достаточности времени на реализацию мероприятий.

4. При соблюдении ограничений на время выполнения мероприятия оно включается в План, далее рассчитывают новые значения показателя защищенности k^* и определяют новые значения $C_{\text{доп}}^* = C_{\text{доп}} - M_{f,o,l,e}^1$.

5. Если ограничения в текущих условиях и системе исходных данных не соблюдаются, дальнейшая задача поиска рациональных мероприятий сводится к поиску такого, которое дает максимальное приращение Δk при оставшихся неизрасходованных ресурсах $C_{\text{доп}}^* = C_{\text{доп}} - \sum M_{f,o,l,e}^q$ (где $\sum M_{f,o,l,e}^q$ – совокупность реализуемых мероприятий, реализуемых пошагово с максимальным приращением Δk до условия $M_{f,o,l,e}^q > C_{\text{доп}}^*$). При отсутствии мероприятий считаем найденное на предыдущем шаге решение k^* оптимальным, если такое решение получено, то к нему прибавляем найденную величину приращения Δk , обеспечивающую максимальный расход всех выделенных ресурсов.

Пример. Каждая подсистема F , O , L , E характеризуется показателями, которые можно улучшать мероприятиями. На примере подсистемы F (мониторинг и прогнозирование) рассмотрим алгоритм влияния ключевых показателей на мониторинг и прогнозирование природных пожаров (рис.).

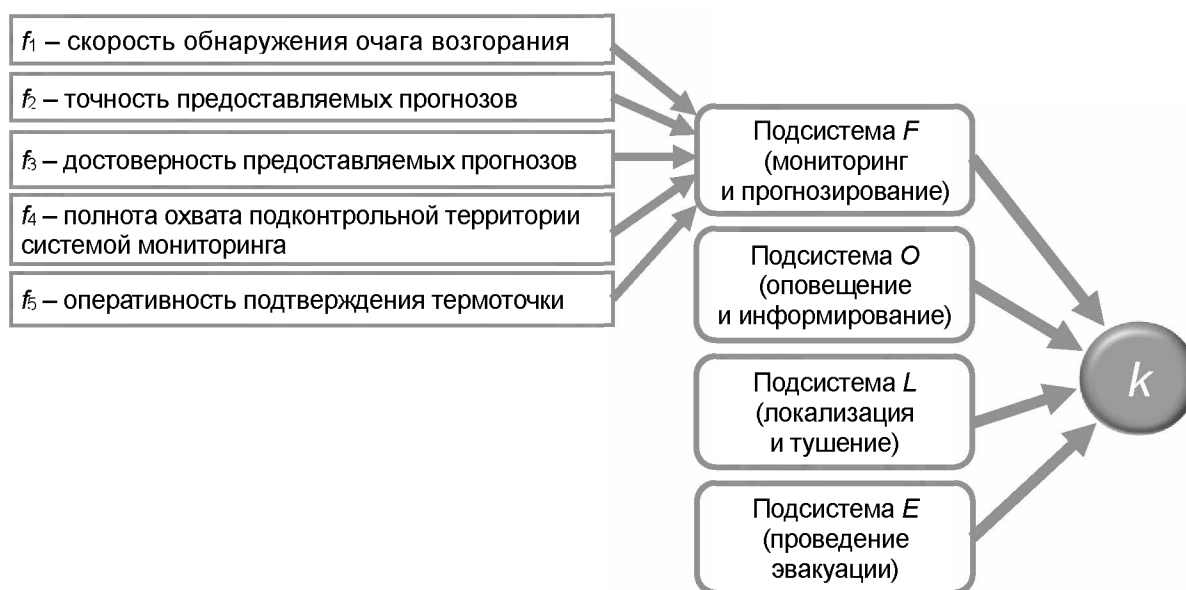


Рис. Визуализация ключевых показателей, влияющих на подсистему F (мониторинг и прогнозирование) и показатель защищенности в целом

Рассмотрим мероприятия, оказывающие влияние на каждый из ключевых показателей подсистемы мониторинга и прогнозирования:

M_{11} – установка дополнительных наблюдательных вышек или повышение имеющихся.

M_{12} – увеличение частоты пеших/автомобильных патрулей.

M_{21} – закупка GPS-навигаторов, для использования у патрулей.

M_{22} – обучение специалистов навыкам использования карт и GPS.

M_{31} – добавление одного дополнительного маршрута для патрулирования.

M_{32} – закупка дополнительного транспорта для патрулей.

M_{41} – сбор локальных метеоданных вручную.

M_{42} – ведение журнала наблюдения за прошлыми пожарами.

M_{51} – создание стационарных наблюдательных пунктов.

M_{52} – использование фотофиксации.

Принимаем, что величины прироста комплексного показателя (Δk) от объемов мероприятий имеют следующие значения (табл. 1).

В качестве ограничений выступают максимально допустимые ($M_{f \max}$) и минимально необходимые ($M_{f \min}$) объемы проводимых мероприятий (табл. 1), а также бинарность выполняемых мероприятий.

При установленных ограничениях на выделяемые ресурсы $C_{\text{доп}} = 50$ получим следующее пошаговое решение:

1. Вычисляем относительные градиенты π_z , тогда суммарный градиент:

$$S = 0,003 + 0,005 + 0,0033 + 0,0075 + 0,004 + 0,0045 + 0,007 + 0,001 + 0,0035 + 0,015 = 0,06283, \quad (7)$$

а значение относительного градиента определим по формуле

$$\pi_z = \frac{\frac{\partial k}{\partial M}}{S}. \quad (8)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 1

Значение величины прироста комплексного показателя (Δk) от объемов мероприятий

Мероприятие	Стоимость (ресурсы) (усл. ед.)	Прирост эффективности Δk	$M_{f, o, l, e \min}$	$M_{f, o, l, e \max}$
M_{11}	10	0,03	1	3
M_{12}	4	0,02	1	2
M_{21}	3	0,01	1	3
M_{22}	2	0,015	1	3
M_{31}	5	0,02	1	2
M_{32}	6	0,027	1	2
M_{41}	2	0,014	1	1
M_{42}	1	0,015	1	1
M_{51}	8	0,028	1	3
M_{52}	1	0,015	1	1

Таблица 2

Значения величин градиента по проводимым мероприятиям

Показатель	Мероприятие									
	M_{11}	M_{12}	M_{21}	M_{22}	M_{31}	M_{32}	M_{41}	M_{42}	M_{51}	M_{52}
Градиент	0,003	0,005	0,0033	0,0075	0,004	0,0045	0,007	0,015	0,0035	0,015
π_z	0,04774	0,07957	0,05305	0,11936	0,06366	0,07161	0,11140	0,22113	0,05570	0,23872

2. При заданном бюджете все предложенные минимально необходимые объемы мероприятий можно реализовать, и остается запас ресурсов для усиления отдельных мер.

3. Проверяем достаточность ресурсов. Стоимость $\sum M_{\min} = 42$ при допустимом ресурсе $C^*_{\text{доп}} = 50$. Ресурсов достаточно, поэтому мероприятия включают в План.

Оставшиеся ресурсы $C^*_{\text{доп}} = 8$.

4. Определяем следующее оптимальное решение при второй итерации (ресурсы $C^*_{\text{доп}} = 8$). Из всех мероприятий по стоимости и максимальному π_z подходит M_{52} (использование фотофиксации), M_{42} (ведение журнала наблюдения за прошлыми пожарами) – приоритетные, однако данные мероприятия являются бинарными и, так как они уже выполнены в предыдущей итерации, переходим к следующему мероприятию. M_{22} (обучение специалистов навыкам использования карт и GPS) – подходит по стоимости, и с максимальным $\pi_z = 0,11936$ данное мероприятие подразумевает дополнительное обучение 1 специалиста.

5. Проверяем достаточность ресурсов. Ресурсов осталось на проведение 4 мероприятий, однако $M_{f, o, l, e \max} = 3$, следовательно, в План включаем обучение только 2 специалистов, так как одного обучили еще в первой итерации.

Оставшиеся ресурсы $C^*_{\text{доп}} = 8 - 2 \cdot 2 = 4$.

6. Определяем следующее оптимальное решение. На второй итерации ресурсы $C^*_{\text{доп}} = 4$. Из всех мероприятий по стоимости и максимальному π_z подходит M_{41} (сбор

локальных метеоданных вручную), однако данное мероприятие тоже бинарное, следовательно, переходим к следующему мероприятию M_{12} (увеличение частоты пеших/автомобильных патрулей) – подходит по стоимости и с максимальным $\pi_z = 0,07371$, данное мероприятие подразумевает дополнительное сокращение интервала между обходами пеших / автомобильных патрулей.

7. Проверяем достаточность ресурсов. Ресурсов достаточно, мероприятие включаем в План.

Оставшиеся ресурсы $C_{\text{доп}}^* = 4 - 4 = 0$.

8. Выделенный ресурс исчерпан, следовательно, План оптимален. Итоговое увеличение комплексного показателя:

$$\Delta k = 0,194 + 0,015 \cdot 2 + 0,02 = 0,244. \quad (9)$$

В сравнении с Планом, содержащим реализацию только минимально необходимых мероприятий защиты, прирост показателя защищенности равен 0,05, что составляет 25 %.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Разработанные методический подход и алгоритм демонстрируют практический механизм выбора рационального перечня и объемов мероприятий на основе расчёта относительных градиентов. Использование величины π_z позволяет определить мероприятия, обеспечивающие максимальное приращение комплексного показателя защищённости при существующих ограничениях ресурсов. Итерационное включение мероприятий в План показывает, что при ограниченном бюджете рационально сначала реализовать наиболее «эффективные» мероприятия (с максимальным π_z), а затем – мероприятия, которые могут быть выполнены на оставшийся ресурс. Такой подход обеспечивает наиболее рациональное распределение ресурсов и максимизацию итоговой эффективности системы защиты населения и территорий от природных пожаров.

Список литературы / References

1. Ложкина, О. В. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере Российской Федерации и ряда зарубежных стран / О. В. Ложкина, С. В. Орловцев, А. Г. Савинов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 4(64). – С. 111–121. – EDN HUEOSX

Lozhkina, O. V., Orlovtssev, S. V., Savinov, A. G. [Analysis of the impact of climate change on wildfires in the Russian Federation and some foreign countries]. Problems of Technosphere Risk Management. 2022, no. 4(64), pp. 111-121. (In Russian)

2. Иванов, Е. В. О проблемной ситуации защиты населения от природных пожаров / Е. В. Иванов, А. А. Кондратьев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 4(63). – С. 27–34. – EDN MNLOZZ.

Ivanov, E. V., Kondratyev A. A. [On the Problematic Situation of Protecting the Population from Natural Fires]. Scientific and Educational Problems of Civil Protection. 2024, no. 4(63), pp. 27-34. (In Russian)

3. Кондратьев, А. А. Анализ известного научно-методического аппарата в области обоснования мероприятий защиты населения и территории от природных пожаров / А. А. Кондратьев, Е. В. Иванов // Актуальные вопросы инженерной защиты населения и территорий: Сб. труд. МНПК. – Химки: АГЗ МЧС России, 2025. – С. 213–218. – EDN WVKFIU

Kondratyev, A. A., Ivanov, E. V. [Analysis of the well-known scientific and methodological apparatus in the field of substantiating measures for protecting the population and territory from natural fires]. *Aktualnye voprosy inzhenernoj zashchity naseleniya i territorij*. Khimki: The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2025, pp. 213-218. (In Russian)

4. Кондратьев, А. А. О постановке задачи обоснования рационального перечня и объемов мероприятий по повышению защищенности населения и территории от природных пожаров / А. А. Кондратьев, Е. В. Иванов, А. Ю. Лебедев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 2(65). – С. 74–83. – EDN VOSJSA

Kondratyev, A. A., Ivanov, E. V., Lebedev, A. Yu. [On the task of substantiating a rational list and volumes of measures to improve the protection of the population and territory from natural fires]. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2025, no. 2(65), pp. 74-83. (In Russian)

5. Савченкова, В. А. Разработка методики предварительного определения причин возникновения лесного пожара / В. А. Савченкова, М. В. Суховей, К. Н. Провин // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 5. – С. 31–38. – DOI 10.17513/use.37621 – EDN GHQMEI

Savchenkova, V. A., Sukhovey, M. V., Provin, K. N. [Development of a methodology for preliminary determination of the causes of a forest fire]. *Advances in Current Natural Science*. 2021, no. 5, pp. 31-38. DOI 10.17513/use.37621 (In Russian)

6. Арефьева, Е. В. Методика оценки эффективности мероприятий по реализации государственной программы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» / Е. В. Арефьева // Технологии гражданской безопасности. – 2016. – Т. 13, № 4(50). – С. 38–44. – EDN WYPLCP

Arefyeva, E. V. [Methodology for Assessing the Effectiveness of Measures for Implementing the State Program «Protection of the Population and Territories from Emergencies, Ensuring Fire Safety and Safety of People on Water Facilities»]. *Civil Security Technologies*. 2016, no. 4(50), pp. 38-44. (In Russian)

7. О результатах анализа научно-методического аппарата оценки уровня природной пожарной опасности / А. Х. Топкарян, Р. Л. Белоусов, Р. И. Песков, А. И. Араштаев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 1(56). – С. 73–81. – EDN IGTKNJ

Topkaryan, A. Kh., Belousov, R. L., Peskov, R. I., Arashtaev, A. I. [On the results of the analysis of the scientific and methodological apparatus for assessing the level of natural fire hazard]. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2023, no. 1(56), pp. 73-81. (In Russian)

8. Оценка состояния средств тушения лесных пожаров и экономической эффективности их применения / Н. А. Коршунов, А. А. Мартынюк В. А. Савченкова, М. С. Калинин // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 1. – С. 77–88. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.07

Korshunov, N. A., Martynyuk, A. A., Savchenkova, V. A., Kalinin, M. S. [Assessment of the state of means of extinguishing forest fires and the economic efficiency of their application]. *Forestry information*. 2019, no. 1, pp. 77-88. (In Russian)

9. Остудин, Н. В. Методологические основы анализа рисков возникновения природных пожаров на основе данных космического мониторинга / Н. В. Остудин, С. Ю. Бутузов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – № 3. – С. 117–126. – EDN RZPAOL

Ostudin, N. V., Butuzov, S. Yu. [Methodological basis for analyzing the risks of wildfires based on space monitoring data]. *Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia»*. 2020, no. 3, pp. 117-126. (In Russian)

10. Аттетков, А. В. Методы оптимизации: учебное пособие / А. В. Аттетков, В. С. Зарубин, А. Н. Канатников. – Москва: РИОР : ИНФРА-М, 2023. – 270 с. – ISBN 978-5-369-01037-2. – DOI : <https://doi.org/10.12737/11456>

Attetkov, A. V., Zarubin, V. S., Kanatnikov, A. N. [Optimization Methods. Textbook]. Moscow, RIOR, INFRA-M Publ., 2023, 270 p. – ISBN 978-5-369-01037-2. – DOI: <https://doi.org/10.12737/11456> (In Russian)

11. Воскобоев, В. Ф. О повышении устойчивости и безопасности опасного производственного объекта при ограниченных ресурсах / В. Ф. Воскобоев, А. В. Рыбаков, Е. В. Иванов // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 5. – С. 47–51. – DOI 10.24000/0409-2961-2019-5-47-51 – EDN ZKXLYD

Voskoboev, V. F., Rybakov, A. V., Ivanov, E. V. [On Increasing the Stability and Safety of a Dangerous Production Facility with Limited Resources]. Occupational Safety in Industry. 2019, no. 5, pp. 47-51. – DOI 10.24000/0409-2961-2019-5-47-51 (In Russian)

12. Севастьянова, С. А. Задачи целочисленного программирования с булевыми переменными в планировании производства / С. А. Севастьянова, Л. И. Уфимцева // Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями: Межвузовский сборник научных трудов. – 2013. – № 1. – С. 131–134. – EDN QIKWHL

Sevastyanova, S. A., Ufimtseva, L. I. [Integer Programming Problems with Boolean Variables in Production Planning]. Problems of Improving the Organization of Production and Management of Industrial Enterprises: Interuniversity Collection of Scientific Papers. 2013, no. 1, pp. 131-134. (In Russian)

Дата поступления рукописи 30.12.2025

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

Alexander Viktorovich Kuzmin, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: avkuzmin16@gmail.com
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI»
420111, Republic of Tatarstan, Kazan, K. Marksa St., 10. Phone: 7 (843) 231-01-09

Anatoly Anatolyevich Kondratiev, Post-graduate student; e-mail: kondratief@sky-lon.ru

Evgeny Vyacheslavovich Ivanov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor;
e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru

Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education
«The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia»

141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya St., 1A. Phone: +7 (498) 699-08-67

JUSTIFYING THE RATIONAL SCOPE OF MEASURES TO INCREASE THE PROTECTION OF TERRITORY AGAINST FIRES

Purpose. Development of a methodological approach to justifying the rational volume of measures to increase the level of protection of the population and territories from natural fires.

Methods. A comprehensive research method was applied, including an analysis of literary sources, as well as an analysis of the existing scientific and methodological framework for justifying the list and volume of fire prevention measures.

Results. The analysis showed that increasing funding for fire protection measures does not guarantee 100% achievement of the target numbers and parameters of natural fires.

Scientific novelty. The methodology ensures the most rational distribution of resources and maximizes the overall effectiveness of the system for protecting people and territories from natural fires.

Practical significance. The presented practical recommendations can be useful in terms of ensuring the high readiness of emergency rescue services to perform their intended tasks.

Keywords: natural fires, population protection system, methodological approach, scientific and methodological apparatus, risk assessment.

For citation: Kuzmin A. V., Kondratiev A. A., Ivanov E. V. Justifying the rational scope of measures to increase the protection of territory against fires. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2026, no. 2 (63), pp. 98-107. EDN YHNOEC

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, с новой строки – официальное 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 (не менее 10 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; ссылки в тексте обозначают цифрами в квадратных скобках. Оформление библиографического описания на русском языке – согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. Перечень источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. Самоцитирование допускается в объеме не более 20 % источников.

Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты – ссылки на них должны быть даны в виде подстрочных сносок непосредственно в тексте статьи.

References размещается непосредственно в списке русскоязычного библиографического описания по следующей универсальной схеме: транслитерация списка авторов; *транслитерация заглавия источника информации* (курсивом) и [в квадратных скобках его перевод на английский язык]; *транслитерация* или *перевод названия журнала / сборника* (курсивом); выходные данные с обозначениями на английском языке; обозначение источника информации после точки в круглых скобках (In Russian). Для англоязычных источников транслитерация не требуется, указывается источник информации (In English).

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами. Ответственность за содержание статьи несет авторский коллектив.

Статья сопровождается Экспертным заключением о возможности опубликования материалов в открытой печати, Согласием авторов на публикацию.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Не рассматриваются авторские рукописи, которые оформлены небрежно или не соответствуют вышеизложенным требованиям.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2026, № 2 (63)

На русском языке

Учредитель:

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

Издатель:

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 15.06.2026. Дата выхода в свет 19.06.2026.
Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать лазерная.
Усл. печ. л. 12,9. Тираж 50 экз. Заказ № 12. Распространяется бесплатно.

ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России»
283048, Донецк, ул. Артема, 157
Телефоны: +7 (856) 252-78-01; 252-78-60

E-mail: respirator@80mchs.gov.ru
URL: <https://niirespirator.organizations.mchs.gov.ru/vestnik>