



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»

№ 4 (62)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – 125 с.

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

Подписано к печати 15.12.2025 по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 11 от 27.11.2025).

Дата выхода в свет 19.12.2025.

Распространяется бесплатно.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NII «RESPIRATOR»

No. 4 (62)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2025

Scientific bulletin of the NII «Respirator». – 2025. – No. 4 (62). – 125 p.

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

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

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

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

Editorial board:

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

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

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

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

Approved for printing 15.12.2025 according to the reference of the Academic council of FSI «NII «Respirator» EMERCOM of Russia» (Protocol No. 11 dated 27.11.2025).

Release date: 19.12.2025.

Distributed free of charge.

СОДЕРЖАНИЕ**I. Пожарная безопасность**

**Кириян А. П., Пештибай Г. И.,
Галухин Н. А.**

Газодинамический способ повышения
эффективности порошкового тушения
пожара

Ковалев А. П., Якимишина В. В.
Влияние надежности автоматических
средств защиты на пожарную
безопасность сети 6–10 кВ

**Хафизов И. Ф., Султанов Р. М.,
Бакиров Д. Р.**
Исследование физико-химических
свойств и противопожарной
эффективности ингибитора коррозии
на основе полиакрилата натрия

Алексеев С. Г.
Сравнительный анализ методик
прогнозирования избыточного давления
воздушной ударной волны

II. Безопасность труда

**Гарелина С. А., Латышенко К. П.,
Скрынников А. Ю.**
К вопросу обоснования системы
локализации разливов нефти
и нефтепродуктов

Плетенецкий Р. С.
Математическая модель динамики
сорбции в регенеративном дыхательном
аппарате

**Лебедева В. В., Храпоненко О. В.,
Щербак О. Н.**
Влияние метакаолина на свойства
быстротвердеющего материала
взрывоустойчивых перемычек

TABLE OF CONTENTS**I. Fire safety**

**Kiryan A. P., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A.**

7 Gas-dynamic method of increasing
the efficiency of powder fire
extinguishing

17 **Kovalev A. P., Yakimishina V. V.**
Influence of reliability of automatic
protective equipment on fire
safety of 6–10 kV network

26 **Khafizov I. F., Sultanov R. M.,
Bakirov D. R.**
Investigation of the physicochemical
properties and fire-retardant efficacy
of a sodium polyacrylate-based
corrosion inhibitor

35 **Alexeev S. G.**
Comparative analysis of methods
to predict overpressure of air shock
wave in detonation mode

II. Occupational safety

42 **Garelina S. A., Latyshenko K. P.,
Skrynnikov A. Yu.**
On the issue of substantiation
of the localization system spills
of oil and petroleum products

49 **Pletenetskiy R. S.**
Mathematical model of sorption
dynamics in a regenerative breathing
apparatus

58 **Lebedeva, V. V., Khraponenko, O. V.,
Shcherbakova, O. N.**
Influence of metakaolin on the properties
of fast-setting material explosive-resistant
sealings

**Ашихмин В. Д., Тишин Р. А.,
Мавроди А. В.**

Оценка эффективности дегазации
в условиях столбовой системы разработки

**Ashikhmin V. D., Tishin R. A.,
Mavrodi A. V.**

64 Evaluation of the efficiency of degassing
in the conditions of the pillar mining system

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Кирьян А. П.

Оценка эффективности внедрения
новых средств индивидуальной
противогазотепловой защиты работников
угольных шахт и горноспасателей

Kiryan A. P.

77 Assessment of the efficiency
of implementation of new means
of individual gas and heat protection for coal
mining workers and mine rescue workers

Гарелина С. А.

Концепция риск-ориентированной
системы технических средств
для предупреждения чрезвычайных
ситуаций на промышленных
предприятиях

Garelina S. A.

88 The concept of a risk-oriented
system of technical means
for the prevention of emergencies
at industrial enterprises

**Фомин А. И., Копытов А. И.,
Михайлов В. Г., Рафиков Р. Р.**

Внедрение интегрированных
вентиляционных систем
в защитные каски

**Fomin A. I., Kopytov A. I.,
Mikhailov V. G., Rafikov R. R.**

101 Introduction of integrated
ventilation systems into protective
helmets

**Янченко А. Н., Джалетова Е. К.,
Томилов М. К.**

Обоснова комплекс мероприятий
по повышению уровня защищенности
простейших укрытий

**Yanchenko A. N., Dzhaletova E. K.,
Tomilov M. K.**

109 Justification of a set of measures
to increase the security
of simple hides

**Указатель статей,
опубликованных в 2025 году
в журнале «Научный вестник
НИИ «Респиратор»**

118

I. Пожарная безопасность

УДК [614.844.1:532.525]:001.891.572

Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, начальник института; e-mail: andrei-kiryan@mail.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, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-36

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРОШКОВОГО ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Цель. Обоснование конструктивных параметров пожаротушающего устройства с газодинамическим ускорением газопорошковой смеси для повышения эффективности тушения пожара.

Методы. Аналитические методы расчета течения газопорошковой смеси в соплах типа Лавалья, методы аналогий между процессами истечения капельной жидкости и псевдожидкости (газопорошковой смеси) в соплах и насадках.

Результаты. Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений движения и теплообмена между дисперсной фазой (частицами порошка) и несущей газовой фазой в двухфазном сопле. Показано, что начальные условия данных дифференциальных уравнений можно получить из решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих истечение газопорошковой смеси из сосуда в конфузор двухфазного сопла.

Научная новизна. Разработанная математическая модель отличается тем, что начальные условия для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений движения и теплообмена порошковой и газовой фаз предложено искать в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений истечения газопорошковой смеси из сосуда в конфузор двухфазного сопла типа Лавалья. На основе метода аналогий впервые получен коэффициент скорости газопорошковой смеси.

Практическая значимость. Предложенный газодинамический способ ускорения газопорошковой смеси позволяет повысить импульс и кинетическую энергию на срезе сопла дисперсной и газовой фаз, что повышает эффективность тушения пожара. Предложенная математическая модель позволяет обосновать конструктивные параметры газопорошкового сопла.

Ключевые слова: *порошковое тушение; газодинамическое ускорение; дисперсная фаза; двухфазное сопло; математическая модель.*

Для цитирования: *Кирьян А. П., Пефтибай Г. И., Галухин Н. А. Газодинамический способ повышения эффективности порошкового тушения пожара // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 7–16. – EDN TEPLKU*

Постановка проблемы. Порошковые огнетушащие средства нашли широкое применение для ликвидации пожаров классов А, В, С, а при применении специализированных порошков - класса D. То есть порошковое тушение пожаров является наиболее универсальным, охватывающим все существующие классы пожаров. Современным переносным порошковым огнетушителям свойственны и недостатки: низкая дальность подачи струи (до 7 м), недостаточная проникающая способность газопорошковой струи при преодолении конвективного потока тепловых газов пожара вследствие недостаточной кинетической энергии газопорошковой струи на срезе соплового насадка. Устранение указанных недостатков позволит повысить эффективность порошкового тушения пожаров.

Цель работы. Обоснование конструктивных параметров пожаротушащего устройства с газодинамическим ускорением газопорошковой смеси для повышения эффективности тушения пожара.

Анализ последних исследований. В работе [1] моделирование процессов истечения газопорошковой струи через отверстия и насадки выполнено на основе метода аналогий между течениями газопорошковой смеси и капельной жидкости в нестационарной постановке. Предложен метод расчета газодинамических процессов с учетом переменного коэффициента расхода соплового насадка. Однако система уравнений для решения задачи истечения газопорошковой смеси через круглые отверстия является не полной и не приведенной для численных расчетов, не указаны искомые функции, получаемые в результате решения, не правильно употреблено понятие «эффективная плотность».

В публикации [2] в качестве математических основ моделирования двухфазного истечения газопорошковой смеси через короткие сопла использован подход, разработанный классиками механики двухфазных сред Дж. Клигелем, Дж. Рудингером, И. Стокелем, основанный на допущении о постоянстве запаздывания скорости частиц порошка от скорости газа. В статье приведены математические соотношения, некоторые из которых вызывают сомнения. Например, формула для относительной величины - коэффициента скорости - имеет разные единицы измерения левой и правой части. Приведенные уравнения не образуют полную систему уравнений и не могут быть непосредственно использованы для численных расчетов. В работе [3] рассмотрен нестационарный режим истечения газопорошковой струи в огнетушителе при переменном (уменьшающемся) давлении газа в корпусе. На основе энергетического баланса получена формула для скорости газопорошковой смеси, истекающей из соплового насадка, из которой следует, что порошок и газ движутся без скольжения (с одинаковыми скоростями), как и в методе расчета на основе аналогий между течениями капельной жидкости и псевдожидкостью. Кроме того, авторы использовали модель адиабатического истечения газопорошковой смеси вместо общепринятого изотермического термодинамического процесса. Не рассмотрено влияние на нестационарность процесса изменения концентрации порошка в корпусе огнетушителя и, в частности, на коэффициенты местных сопротивлений. В исследованиях [4] предложен расчетно-экспериментальный подход для определения параметров средств порошкового пожаротушения, основанный на экспериментальном определении осциллограмм давления в корпусе огнетушителя, дополненный уравнениями, включающими дифференциальное уравнение динамики опорожняющейся пневматической камеры. Такой подход позволяет сократить время разработки пожаротушащего устройства. Однако в каждом конкретном случае требуется проведение предварительных экспериментальных работ.

В работах [5–7] предложено использование газодинамического разгона капель жидкости в двухфазном сопле типа Лаваля, при котором несущая газовая фаза передает энтальпию капельной жидкости. За счет этого на срезе сопла капельная струя приобретает дополнительную кинетическую энергию, что повышает дальность подачи струи и проникающую способность капель, приводит к повышению эффективности тушения пожара. Уравнения движения капель

получены в предположения, что капля - твердое тело, однако в конечное выражение вводятся коэффициенты на деформируемость капель, коагуляцию и другие.

Результаты исследований. Одним из возможных способов увеличения кинетической энергии может быть способ газодинамического ускорения газопорошковой смеси в двухфазном сопле типа Лаваля (коническом или профилированном), при котором несущая газовая фаза за счет аэродинамического взаимодействия с частицами порошка ускоряет движение частиц порошка и выбрасывает с высокой скоростью в свободное пространство. Если принять во внимание, что скорость газовой фазы может быть сверхзвуковой, превышающей число Маха в несколько раз, то полный импульс газопорошковой струи и ее дальность подачи могут быть существенно увеличены по сравнению с традиционными средствами порошкового пожаротушения. Рассмотрим принципиальную схему пожаротушащего устройства с газодинамическим ускорением газопорошковой смеси (рис.).

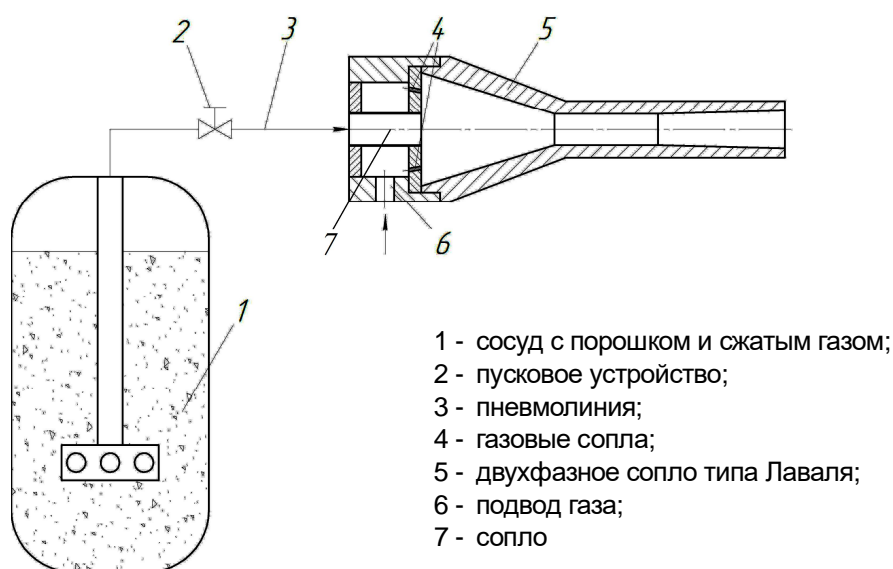


Рис. Принципиальная схема пожаротушащего устройства с газодинамическим ускорением газопорошковой смеси

При срабатывании пускового устройства газопорошковая смесь из сосуда по пневмолинии поступает в конфузор двухфазного сопла. Одновременно сжатый газ, поступающий на вход сопел, создает высокоскоростные струи, которые ускоряют в двухфазном сопле типа Лаваля частицы порошка, транспортируют их вдоль канала и выбрасывают с большой скоростью в окружающую среду. Это позволит не только эффективно преодолеть импульс конвективных потоков тепловой колонки пожара, но и повысить проникающую способность газопорошковой струи и эффективность тушения пожара. Физические процессы разгона твердых частиц порошка в двухфазном сопле аналогичны процессам, сопровождающим ускорение капельной фазы в газокapельном сопле, однако существуют и отличия. Прежде всего, в нашем случае, это отсутствие деформируемости частиц порошка. Жидкие капли при разгоне деформируются и приобретают форму эллипса, большая ось которого перпендикулярна продольной оси газокapельного сопла. Это значительно увеличивает (в несколько раз) сопротивление движущейся капли, что требует введения поправочного

коэффициента. Кроме того, в газопорошковом потоке отсутствует коагуляция, распад частиц порошка и пленочное пристенное течение, характерные для капельного потока. Указанные особенности необходимо учитывать в математической модели движения частиц порошка вдоль оси двухфазного сопла.

Уравнения движений частиц порошка и газа можно записать в виде:

$$\frac{du_q}{dx} = - \frac{1}{r_q u_q} \frac{dP}{dx} + \frac{3}{4} \frac{r_z}{r_q} C_x \frac{(u_z - u_q)^2 g}{d_q u_q}, \quad (1)$$

$$\frac{du_z}{dx} = - \frac{1}{r_z u_z} \frac{dP}{dx} + \frac{3}{4} \frac{r_z}{r_q} C_x \frac{(u_z - u_q)^2 g}{d_q u_q} - \frac{t p D}{G_z}, \quad (2)$$

где u_q, u_z - скорости частиц порошка и газа соответственно, м/с;

x - продольная координата двухфазного сопла;

r_q, r_z - плотности частиц порошка и газа соответственно, кг/м³;

C_x - коэффициент сопротивления сферической частицы порошка:

$$C_x = \frac{24}{Re_q} + 4,4 \sqrt{Re_q} + 0,32;$$

Re_q - число Рейнольдса для капли:

$$Re_q = \frac{(u_z - u_n) d_q r_z}{m_z};$$

d_q - средний диаметр частицы порошка, м;

m - коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;

τ - касательное напряжение на стенке канала сопла, Н/м²:

$$t = Cf \frac{r_z u_z^2}{2};$$

Cf - коэффициент трения газа в канале сопла:

$$Cf = \frac{0,079}{Re_z^{0,25}};$$

Re_z - число Рейнольдса для газа:

$$Re_z = \frac{r_z m_z D}{m};$$

D - диаметр канала двухфазного сопла, м;

$g = G_q / G_z$ - коэффициент загрузки частицами газопорошкового потока;

G_q, G_z - массовые расходы частиц порошка и газа соответственно, кг/с.

Процесс конвективного теплообмена между частицами порошка и газа с учетом закона сохранения энергии в газопорошковом потоке представлен уравнениями (3), (4):

$$\frac{dT_q}{dx} = - \frac{6a(T_q - T_z)}{d_q u_q C_{pq} r_q} - \frac{u_q}{C_{pq}} \frac{du_q}{dx}, \quad (3)$$

$$g_{\frac{a}{\rho}} C_{pq} T_{qo} + \frac{u_{qo}^2}{2} + C_{pz} T_{zo} + \frac{u_{zo}^2}{2} = g_{\frac{a}{\rho}} C_{pq} T_q + \frac{u_q^2}{2} + C_{pz} T_z + \frac{u_z^2}{2}, \quad (4)$$

где T_q, T_z - температуры частиц порошка и газа, К;

T_{qo}, T_{zo} - начальные температуры частиц порошка и газа на входе двухфазного сопла, К;

u_{qo}, u_{zo} - начальные скорости частиц порошка и газа на входе двухфазного сопла, м/с;

C_{pq}, C_{pz} - теплоемкость вещества частиц порошка и теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг × К);

a - коэффициент теплопередачи, Вт/(м² × К).

Диаметр канала двухфазного сопла D , м, находим по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\rho} \frac{g_{\frac{a}{\rho}} G_z}{r_z u_z} + \frac{G_q}{r_q u_q}} \quad (5)$$

Давление P зададим в виде двухпараметрической алгебраической функции:

$$P = P_o \left[\frac{P_a}{P_o} - 1 \right]^{\frac{m}{l}} - \frac{P_a}{P_o} \left[\frac{P_a}{P_o} - 1 \right]^{\frac{2m}{l}} + 1 \quad (6)$$

где P_o, P_a - давление в начале и на срезе двухфазного сопла, МПа;

l - длина сопла, м;

m, n - варьируемые параметры.

Плотность газа найдем по формуле для давления идеального газа:

$$r_z = \frac{P}{R_z T_z}, \quad (7)$$

где R_z - газовая постоянная, Дж/(кг × К).

Уравнения (1) - (7) позволяют найти неизвестные функции u_q, u_z, T_q, T_z, D .

Для определения оптимального профиля канала $D(x)$ необходимо задать критерий эффективности двухфазного сопла. Таким критерием может служить отношение полного импульса $I_1, Н$, газопорошковой струи на срезе двухфазного сопла, к импульсу $I_2, Н$, однородной смеси на срезе двухфазного сопла:

$$h = \frac{I_1}{I_2}.$$

Безразмерный критерий h характеризует эффективность двухфазного сопла в смысле максимума полного импульса при варьировании параметров m , n в формуле (6) для поиска экстремума функции $D(x)$. Для решения системы уравнений (1) - (7) необходимо задать начальные условия. Полагаем начальные температуры частиц порошка и газа равны температуре окружающей среды $T_g(0) = T_z(0) = T_o$. Для нахождения начальных значений скоростей частиц порошка и газа $u_g(0)$, $u_z(0)$ рассмотрим процесс истечения газопорошковой смеси из сосуда в конфузор двухфазного сопла. Для этого воспользуемся методом расчета, основанным на аналогии между течениями капельной жидкости и псевдожидкости (газопорошковой смеси).

Уравнение массового расхода газопорошковой смеси через сопло запишем в следующем виде:

$$-\frac{dm_z}{dt} - \frac{dm_n}{dt} = m_c S \sqrt{\frac{2(P_o - P_k)}{r_n}}, \quad (8)$$

где m_z, m_n - массы газа и порошка в сосуде, кг;

r_z, r_n - плотность газа и порошка в сосуде, кг/м³;

m - коэффициент расхода;

S - площадь сечения сопла, м²;

P_o - давление в сосуде, Па;

P_k - давление в камере конфузора, Па;

r_n - плотность газопорошковой смеси, кг/м³.

Плотность r_n находим по формуле:

$$r_n = \frac{m_n + m_z}{V_k}, \quad (9)$$

где V_k - объем сосуда, м³.

Массу газа находим из выражения:

$$m_z = P_o V_z \frac{1}{RT_{zo}}, \quad (10)$$

где V_z - объем газа, м³.

Объем газа в сосуде находим, используя выражение

$$V_z = V_{zo} + \frac{1}{r_n} (m_{no} - m_n), \quad (11)$$

где V_{zo} - начальное значение объема газа, м³;

m_{no} - начальная масса порошка в сосуде, кг;

r_n - эффективная плотность частиц порошка, кг/м³.

Давление газа в сосуде в произвольный момент времени можно найти двумя способами: используя уравнение динамики опорожняющейся полости сосуда переменного объема при изотермическом процессе или дифференцируя выражения

(10) - (11). После дифференцирования выражения (10) и подстановки в него dV_z/dt из дифференцированного выражения (11) получаем

$$\frac{dP_{\bar{o}}}{dt} = \frac{P_{\bar{o}}}{V_z} \frac{1}{r_n} \frac{dm_n}{dt} + \frac{RT_o}{V_z} \frac{dm_z}{dt}, \quad (12)$$

Уравнения (8) - (12) составляют замкнутую систему уравнений относительно функций $m_z, m_n, P_{\bar{o}}, V_z$.

Левые слагаемые в уравнении (8) взяты с отрицательными знаками ввиду того, что $dm_z/dt < 0, dm_n/dt < 0$. В уравнении (12) принято во внимание, что $dP/dt < 0$. Скорости газа и частиц порошка на входе сопла найдем из выражения:

$$v_z = v_u = j \sqrt{\frac{2(P_{\bar{o}} - P_k)}{r_n}}. \quad (13)$$

где j - коэффициент скорости;

v_z, v_u - скорости газа и частиц, м/с.

Последние исследования закономерностей истечения газопорошковой струи через круглые насадки показывают [1, 2], что коэффициент расхода данной струи существенно меньше соответствующего коэффициента для капельной жидкости, причем его рациональное значение составляет $m = 0,41$ (для капельной жидкости $m = 0,62$). Однако числовые значения коэффициентов скорости и сжатия газопорошковой струи в доступной литературе не приводятся.

Известно, что зависимость между коэффициентами истечения может быть представлена в виде произведения

$$m = j \cdot e$$

где e - коэффициент сжатия струи.

Если принять допущение, что доля вклада каждого из коэффициентов j, e в произведении m сохраняется на уровне, аналогичном капельной жидкости, то справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} m_c = j e \\ \frac{e}{j} = a \end{cases}, \quad (14)$$

где a - постоянный коэффициент, определяемый по параметрам истечения капельной жидкости.

Решением системы (14) является выражение:

$$j = \sqrt{\frac{m_c}{a}}.$$

При $m = 0,41, a = 0,66$, получаем $j = 0,79$.

Полученное выражение для v_z и v_{ch} из формулы (13) принимаем за начальные условия для решения системы уравнений (8) - (12).

Отличительная особенность математической модели состоит в том, что начальные значения $v_z(0)$, $v_{ch}(0)$, давление P в сосуде и концентрации порошка изменяются во времени. Учесть в расчетах указанную особенность можно, если предположить, что изменение скорости v_{ch} на входе конфузора сопла происходит непрерывно, а частицы с разными начальными скоростями движутся последовательно вдоль двухфазного сопла. Используя временную зависимость $v_{ch}(t)$, полученную по формуле (13), задаем начальную скорость v_{cho} в момент времени $t = 0$, с учетом которой решается система уравнений (8) - (12) и получают первое значение скорости частиц порошка на срезе двухфазного сопла v_{cho} . Далее, через малый интервал времени Δt_1 , из графика $v_{ch}(t)$ определяют новое значение начальной скорости v_{ch1} и, решая систему уравнений (8) - (12), находят новое значение скорости частиц порошка на срезе двухфазного сопла v_{ch1} в момент времени $t = 0 + \Delta t_1 = \Delta t_1$. Таким образом находят функцию скорости газопорошковой струи на срезе двухфазного сопла $v_{ch}(t)$ с учетом переменного значения начальной скорости входа частиц порошка в конфузор двухфазного сопла.

Выводы. Предложен газодинамический способ повышения эффективности тушения пожара за счет повышения импульса газопорошковой струи на срезе двухфазного сопла. Разработанная математическая модель ускорения дисперсной фазы позволяет научно обосновать конструктивные параметры двухфазного сопла, в частности, его геометрический профиль. Математическая модель ускорения дисперсной фазы, отличается тем, что для определения начальных условий (скоростей порошковой и газовой фаз разработана система дифференциальных и алгебраических уравнений на основе метода аналогий течений капельной жидкости и псевдожидкости. Показано, что начальные условия нестационарные. Предложена система уравнений для определения коэффициента скорости истечения порошковой смеси на основе метода аналогий.

Список литературы / References

1. Кулявцев, Е. Я. Моделирование газодинамических процессов при срабатывании модуля порошкового пожаротушения с использованием аналогии капельная жидкость - псевдожидкость / Е. Я. Кулявцев, В. Г. Казанцев, Р. И. Куплов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2013. - № 1. - С. 74- 83.

Kulyavtsev, E. Ya., Kazantsev, V. G., Kuimov, R. I. *Modelirovanie gazodinamicheskikh protsessov pri srbatyvaniy modulya poroshkovogo pozharotusheniya s ispolzovaniem analogii kapelnaya zhidkost – psevdozhidkost* [Modeling of gas-dynamic processes during triggering the dry-powder fire-extinguishing module applying mobile liquid – pseudoliquid analogy]. Bulletin of the Scientific center on safety of works in coal-mining industry, 2013, no. 1, pp. 74-83. (In Russian)

2. Моделирование двухфазного течения газопорошковой смеси через короткие сопла с учетом высокого содержания твердых частиц в газовой фазе / В. Г. Казанцев, А. Г. Овчаренко, Е. А. Кулявцев, Е. В. Сынин, Н. Ю. Тупикина // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2015. - № 1. - С. 31- 35.

Kazantsev, V. G., Ovcharenko, A. G., Kulyavtsev, E. Ya., Synin, E. V., Tupikina, N. Yu. *Modelirovanie dvukhfaznogo istecheniya gazoporoshkovoi smesi cherez korotkie sopla s uchyotom vysokogo soderzhaniya tverdykh chastits v gazovoi faze* [Modeling of two-phase gas-

powder mixture discharge through short nozzles factoring in high density of solid particles in gas phase]. Bulletin of the Scientific center on safety of works in coal-mining industry, 2015, no. 1, pp. 31-35. (In Russian)

3. Цапенко, А. С. Расчет характеристик истечения огнетушащих порошков при переменном давлении рабочего газа / А. С. Цапенко, В. И. Цирфа, И. И. Чередниченко // Средства порошкового пожаротушения : сб. науч. тр. - М. : ВНИИПО МВД СССР, 1989. - С. 88-96.

Tsapenko, A. S., Tsirfa, V. I., Cherednichenko, I. I. *Raschet kharakteristik istecheniya ognetchashchikh poroshkov pri peremennom davlenii rabocheho gaza. Sredstva poroshkovogo pozharotusheniya: sb. nauch. tr.* Moscow, VNIPO MVD SSSR, 1989, pp. 88-96. (In Russian)

4. Абрамов, А. А. Определение параметров работы техники порошкового пожаротушения / А. А. Абрамов, В. А. Дунюшкин, В. В. Кавецкий // Средства порошкового пожаротушения : сб. науч. тр. - М. : ВНИИПО МВД СССР, 1989. - С. 101-108.

Abramov, A. A., Dunyushkin, V. A., Kavetskiy, V. V. *Opredeleniye parametrov raboty tekhniki poroshkovogo pozharotusheniya. Sredstva poroshkovogo pozharotusheniya: sb. nauch. tr.* Moscow, VNIPO MVD SSSR, 1989, pp. 101-108. (In Russian)

5. Ципенко, А. В. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте : специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (на воздушном транспорте)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ципенко Антон Владимирович ; НИИ НТ МАИ. - М., 2006. - 41 с. - Место защиты : ФГУП ГосНИИ ГА.

Tsipenko, A. V. *Teoriya i metody povysheniya effektivnosti protivopozharnykh sistem na vozdushnom transporte* [Theory and methods for increasing the efficiency of fire-fighting systems in air transport : 05.26.02 «Safety in emergency situations (in air transport)» specialty : Doctor of Technical Sciences dissertation / Tsipenko Anton Vladimirovich]. Moscow: Research Institute of NT MAI, 2006, 41 p. Place of thesis defence: The State Scientific Research Institute of Civil Aviation. (In Russian)

6. Антоновский, И.В. Исследование формирования двухфазных газокapельных струй : 05.07.05 «Тепловые двигатели летательных аппаратов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антоновский Иван Владимирович; Московский государственный авиационный институт (национальный исследовательский университет). - М., 2016. - 20 с. - Место защиты: МАИ.

Antonovskiy, I. V. *Issledovaniye formirovaniya dvukhfaznykh gazokapelnykh struy* [Study of the formation of two-phase gas-droplet jets : 05.07.05 «Thermal engines of aircraft» specialty : Candidate of Technical Sciences dissertation / Antonovsky Ivan Vladimirovich]. Moscow State Aviation Institute (National Research University), 2016, 20 p. Place of thesis defence: Moscow State Aviation Institute. (In Russian)

7. Пефтибай, Г. И. Математическая модель истечения газокapельного потока с оптимизированным профилем канала сопла пожаротушающей установки / Г. И. Пефтибай, Н. А. Галухин, И. А. Татаров // Научный вестник НИИ «Респиратор». - 2025. - № 1. - С. 7-17.

Peftibay G. I., Galukhin N. A., Tatarov I. A. [Mathematical model of gas-droplet flow with optimized nozzle channel profile of fire extinguishing system]. Scientific bulletin of the NII «Respirator», 2025, no. 1 (62), pp. 7-17. (In Russian)

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

GAS-DYNAMIC METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF POWDER FIRE EXTINGUISHING

Objective. Justification of the design parameters of a fire extinguishing device with gas-dynamic acceleration of a gas-powder mixture to improve the efficiency of fire extinguishing.

Methods. Analytical methods for calculating the flow of gas-powder mixture in Laval-type nozzles, methods of analogies between the processes of flow of droplet liquid and pseudo-liquid (gas-powder mixture) in nozzles and attachments.

Results. A system of differential and algebraic equations of motion and heat exchange between the dispersed phase (powder particles) and the carrier gas phase in a two-phase nozzle is obtained. It is shown that the initial conditions of these differential equations can be obtained from the solution of a system of differential and algebraic equations describing the outflow of a gas-powder mixture from a vessel into the confuser of a two-phase nozzle.

Scientific novelty. The developed mathematical model is distinguished by the fact that the initial conditions for solving the system of differential and algebraic equations of motion and heat exchange of the powder and gas phases are proposed to be sought in the form of a system of differential and algebraic equations of the outflow of a gas-powder mixture from a vessel into a confuser of a two-phase Laval-type nozzle. Based on the analogy method, the velocity coefficient of the gas-powder mixture was obtained for the first time.

Practical significance. The proposed gas-dynamic method of accelerating the gas-powder mixture allows increasing the impulse and kinetic energy at the nozzle section of the dispersed and gas phases, which increases the efficiency of fire extinguishing. The proposed mathematical model allows justifying the design parameters of the gas-powder nozzle.

Key words: *powder extinguishing; gas-dynamic acceleration; dispersed phase; two-phase nozzle; mathematical model.*

For citation: Kiryan A. P., Peftibay G. I., Galukhin N. A. Gas-dynamic method of increasing the efficiency of powder fire extinguishing. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 7-16. EDN TEPLKU

УДК 621.316.11:[614.841.24:621.3.064.1]

Александр Петрович Ковалев, д-р техн. наук, профессор, науч. сотр.; e-mail: abrecap@mail.ru
Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 252-78-43

Виктория Викторовна Якимишина, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры;
e-mail: yvsm@list.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +7 (856) 301-03-06

ВЛИЯНИЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ НА ПОЖАРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ СЕТИ 6–10 кВ

Цель. Оценить влияние сроков диагностики системы релейной защиты коммутационного аппарата на обеспечение пожарной безопасности кабельной сети 6–10 кВ в динамическом режиме.

Методы. Теоретические исследования изменения состояния автоматической системы защиты с течением времени были произведены с использованием марковских процессов с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем.

Результаты. Для конкретного предприятия было установлено, что изменение сроков диагностики системы релейной защиты коммутационных аппаратов 10 кВ на подстанции 110/10 кВ с $\Theta = 1$ год на $\Theta = 0,5$ года позволило в 3,33 раза уменьшить ожидаемое число возгораний изоляции оборудования 10 кВ при коротких замыканиях в сети промышленного предприятия.

Научная новизна. Впервые получены расчетные зависимости, которые полностью характеризуют надежность системы релейной защиты в динамическом режиме работы.

Практическая значимость. Разработанная методика расчетов позволяет определить характеристики надежности системы релейной защиты и оценить влияние сроков диагностики системы релейной защиты на пожарную безопасность защищаемой сети.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция; надежность средств защиты; короткое замыкание; сроки диагностики; коэффициент готовности.

Для цитирования: Ковалев А. П., Якимишина В. В. Влияние надежности автоматических средств защиты на пожарную безопасность сети 6–10 кВ // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 17–25. – EDN DPZDMB

Постановка проблемы. Пожары в системах электроснабжения 6–10 кВ происходят при коротких замыканиях (КЗ) в элементе сети и отказе в срабатывании автоматических средств релейной защиты (РЗ). Поэтому задача, связанная с выяснением влияния сроков диагностики РЗ коммутационных аппаратов на пожарную безопасность сети 6–10 кВ, является весьма актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] представлен обзор существующих методов оценки надежности релейной защиты сетей различного класса напряжений. Однако вопросы, связанные с оценкой влияния сроков диагностики средств защиты, на пожарную безопасность сети 6–10 кВ в них не были рассмотрены.

Цель исследования. Оценить влияние сроков диагностики системы релейной защиты коммутационного аппарата на обеспечение пожарной безопасности кабельной сети 6–10 кВ в динамическом режиме.

Результаты исследования. Под наблюдением в течение времени T по плану [NMT] находилось N систем РЗ фидерных коммутационных аппаратов трансформаторной подстанции 110/10 кВ (M – в плане наблюдения означает, что после выхода из строя системы РЗ коммутационного аппарата

ее работоспособность восстанавливается и она вводится в эксплуатацию). Работоспособность системы РЗ коммутационного аппарата диагностируется через определенный интервал времени Θ .

Постановка задачи. Рассмотрим процесс поведения системы срабатывания средств релейной защиты в динамическом режиме работы. За время наблюдения в кабельной сети 10 кВ промышленного предприятия произошло m случаев появления КЗ в сети, а в местах повреждения изоляции кабеля происходило ее возгорание.

В связи с этим необходимо:

1. Определить:

$P_0(t)$ – вероятность того, что система РЗ в течение времени t будет находиться в ждущем режиме;

$P_1(t)$ – вероятность того, что система РЗ будет находиться в течение времени t в отказавшем состоянии;

$K(t)$ – вероятность того, что система РЗ будет находиться в работоспособном состоянии в произвольно выбранный момент времени t ;

$K(\neq)$ – коэффициент готовности системы РЗ.

2. Установить влияние сроков диагностики системы РЗ на изменение числа возможных возгораний изоляции сети 10 кВ при появлении КЗ.

Решение поставленной задачи. Пусть система РЗ коммутационного аппарата в течение времени t будет находиться в двух несовместных состояниях:

e_0 – система РЗ коммутационного аппарата находится в ждущем режиме и готова отключить поврежденный участок сети при случайном появлении КЗ в сети в зоне действия ее токовой отсечки;

e_1 – система РЗ коммутационного аппарата находится в отказавшем состоянии. Это означает, что если в защищаемой сети произойдет КЗ в зоне действия защиты рассматриваемого коммутационного аппарата, то он откажет в отключении поврежденного участка сети.

Предположим:

- переход системы РЗ из состояния e_0 в состояние e_1 и из состояния e_1 в состояние e_0 происходит «скачком», т. е. мгновенно (без выдержки времени);

- моменты возникновения переходов системы РЗ из состояния e_0 в состояние e_1 и из состояния e_1 в состояние e_0 не фиксированы заранее, а случайны. Переходы системы РЗ из одного состояния в другое в течение времени t могут осуществляться в любой момент времени;

- после восстановления (ремонта) системы РЗ она имеет такие же характеристики надежности, что и до ее отказов;

- проверки системы РЗ абсолютно надежны. Это означает, что если система РЗ находится в поврежденном состоянии, то в результате проведенной диагностики повреждение будет установлено и устранено;

- длительность проверки системы РЗ настолько мала по сравнению с временем нахождения средств РЗ в необнаруженном отказавшем состоянии, что ее можно не учитывать;

- случайные интервалы времени $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ и $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}$ нахождения системы РЗ в состояниях e_0 и e_1 соответственно, не противоречат

экспоненциальным функциям распределения вероятностей с параметрами λ – интенсивность отказов РЗ и m – интенсивность восстановления.

Принятые допущения означают, что для описания процесса поведения системы РЗ в динамическом режиме целесообразно применить теорию марковских случайных процессов с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем [2].

Очевидно, что вероятность пребывания РЗ в состоянии e_1 в момент времени $t + \Delta t$ зависит от того, в каком состоянии находилась РЗ в момент времени t и не зависит от тех состояний, в которых она находилась ранее.

Вероятность переходов РЗ из состояния e_0 и e_1 или из состояния e_1 и e_0 , либо остаться в состоянии e_0 и e_1 за время Δt найдем, пользуясь общей формулой для марковского процесса [3].

Вероятность для системы РЗ остаться в состоянии e_0 :

$$P_{00}(\Delta t) = P[x(t + \Delta t) = e_0 / x(t) = e_0] = P(e_0 \xrightarrow{\Delta t} e_0) = e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (1)$$

Вероятность для системы РЗ перейти из состояния e_0 в состояние e_1 :

$$P_{01}(\Delta t) = P[x(t + \Delta t) = e_1 / x(t) = e_0] = P(e_0 \xrightarrow{\Delta t} e_1) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (2)$$

Вероятность для системы РЗ остаться в состоянии e_1 :

$$P_{11}(\Delta t) = P[x(t + \Delta t) = e_1 / x(t) = e_1] = P(e_1 \xrightarrow{\Delta t} e_1) = e^{-m \Delta t} = 1 - m \Delta t + o(\Delta t) \quad (3)$$

Вероятность для системы РЗ перейти из состояния e_1 в состояние e_0 :

$$P_{10}(\Delta t) = P[x(t + \Delta t) = e_0 / x(t) = e_1] = P(e_1 \xrightarrow{\Delta t} e_0) = 1 - e^{-m \Delta t} = m \Delta t + o(\Delta t) \quad (4)$$

В формулах (1) – (4) $o(\Delta t)$ означает, что переход системы РЗ из одного состояния в другое за время Δt более одного раза маловероятен.

Используя полученные вероятности переходов системы РЗ за время Δt , формулы (1) – (4), матрица вероятностей переходов системы РЗ за время Δt примет вид:

$$P(\Delta t) = \begin{pmatrix} 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t) & \lambda \Delta t + o(\Delta t) \\ m \Delta t + o(\Delta t) & 1 - m \Delta t + o(\Delta t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Матрица вероятностей переходов (5) полностью характеризует процесс изменения состояний системы РЗ за время Δt .

Вероятность нахождения системы РЗ в состояниях e_0 и e_1 находим из решения системы линейных дифференциальных уравнений, записанной в общем виде [4]:

$$\dot{P}(\Delta t) = P(\Delta t)A, \quad (6)$$

где

$$A = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\Delta t) - I}{\Delta t} = \begin{pmatrix} -\lambda & \lambda \\ m & -m \end{pmatrix},$$

$$\lim_{D_t \rightarrow 0} \frac{0(D_t)}{D_t} = 0,$$

I – единичная матрица.

Подставив матрицу A в систему линейных дифференциальных уравнений (6), получим:

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_0(t) \\ \dot{P}_1(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ m & -m \end{pmatrix} \quad (7)$$

Систему уравнений (7) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{P}_0(t) &= -1 P_0(t) + m P_1(t) \\ \dot{P}_1(t) &= 1 P_0(t) - m P_1(t) \end{aligned} \quad (8)$$

В том случае, если РЗ в момент $t = 0$ находилась в работоспособном состоянии (ждущий режим), начальные условия будут иметь вид:

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = 0$$

Используя преобразование Лапласа, систему дифференциальных уравнений (8) запишем в виде двух алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} (S + 1)P_0(S) - mP_1(S) &= 1 \\ -1P_0(S) + (S + m)P_1(S) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Используя правило Крамера, находим:

$$P_0(S) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -m \\ 0 & S + m \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} S + 1 & -m \\ -1 & S + m \end{vmatrix}} = \frac{S + m}{S(S + m + 1)} \quad (10)$$

Разложив выражение (10) на простые множители, получим:

$$P_0(S) = \frac{m}{(m + 1)S} + \frac{1}{(m + 1)(S + m + 1)} \quad (11)$$

Применяя к выражению (11) обратное преобразование Лапласа, находим:

$$P_0(t) = L^{-1}\{P_0(S)\}, \quad (12)$$

$$P_0(t) = \frac{m}{m + 1} + \frac{1}{m + 1} e^{-(1 + m)t}, \quad (13)$$

$$P_1(t) = 1 - P_0(t) = \frac{1}{m + 1} - \frac{1}{m + 1} e^{-(1 + m)t} \quad (14)$$

Под функцией готовности $K(t)$ будем понимать вероятность того, что система РЗ будет находиться в ждущем режиме (работоспособное состояние) в произвольно выбранный момент времени t . В этом случае $K(t) = P_0(t)$.

В некоторых случаях исследователей системы РЗ интересует вопрос, какое будет среднее время неисправного состояния системы РЗ на конечном интервале времени t .

В этом случае необходимо просуммировать $K(t)$ по всему интервалу времени, а затем полученный результат разделить на T . В этом случае $K(T)$ примет вид:

$$K(t) = \frac{m}{l+m} + \frac{l}{(l+m)^2 T} (1 - e^{-(l+m)T}) \quad (15)$$

Коэффициент готовности $K(\infty)$ можно определить из формулы (15) при $T \rightarrow \infty$:

$$K(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} K(T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{m}{l+m} + \frac{l}{(l+m)^2 T} (1 - e^{-(l+m)T}) \right\} = \frac{l}{l+m} \quad (16)$$

Возможная реализация случайного процесса $X(t)$, который характеризует поведение системы РЗ в течение времени t , приведена на рис. 1.

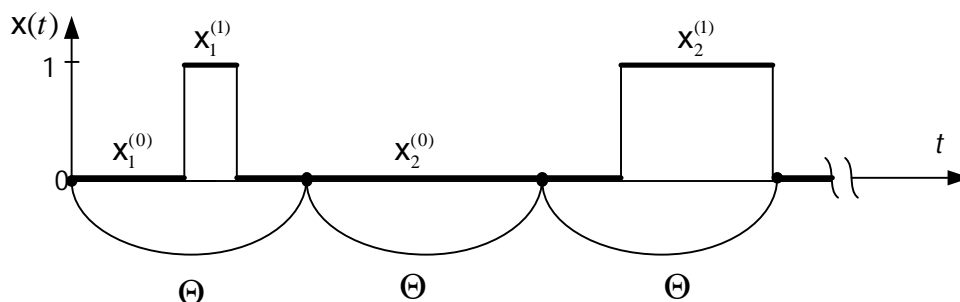


Рис. 1. Схема возможной реализации случайного процесса $X(t)$ поведения системы РЗ в течение времени t

Параметры процесса $X(t)$ определяются из анализа и обработки статистических данных о поведении системы РЗ за время наблюдения.

Интенсивность отказов λ системы РЗ в динамическом режиме:

$$\lambda = \frac{n}{N \times T}, \quad (17)$$

где n – число отказов в срабатывании системы РЗ коммутационных аппаратов в динамическом режиме работы за время наблюдения;

N – число систем РЗ коммутационных аппаратов, взятых под наблюдение;

T – время, в течение которого проводилось наблюдение за эксплуатацией системы РЗ.

Среднее время нахождения системы РЗ в необнаруженном отказавшем состоянии обозначим через d , тогда [5]:

$$d = Q - \frac{1}{\Theta} = Q - \int_0^Q P(t) dt = Q - \int_0^Q e^{-\lambda t} dt = Q - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^Q = Q - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda Q}), \quad (18)$$

где $\frac{1}{\Theta}$ – средний интервал времени между появлениями отказов в срабатывании системы РЗ;

Θ – интервал времени между диагностическими проверками системы РЗ коммутационных аппаратов 10 кВ.

Интенсивность обнаружения и восстановления работоспособности системы РЗ определим следующим образом:

$$m = \frac{1}{d} = \frac{1}{Q - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda Q})} \quad (19)$$

В тех случаях, когда соблюдается условие $\lambda \cdot \Theta < 0,1$, формула (19) примет вид:

$$m \approx \frac{2}{\lambda Q^2} \quad (20)$$

Формулы (13) – (19) полностью характеризуют надежность системы РЗ в динамическом режиме.

Пример. Под наблюдением по плану [NMT] в течение времени $T = 5$ лет находилось $N = 12$ систем РЗ защитных коммутационных аппаратов 10 кВ трансформаторной подстанции 110/10 кВ, которая снабжает электроэнергией промышленное предприятие (рис. 2).

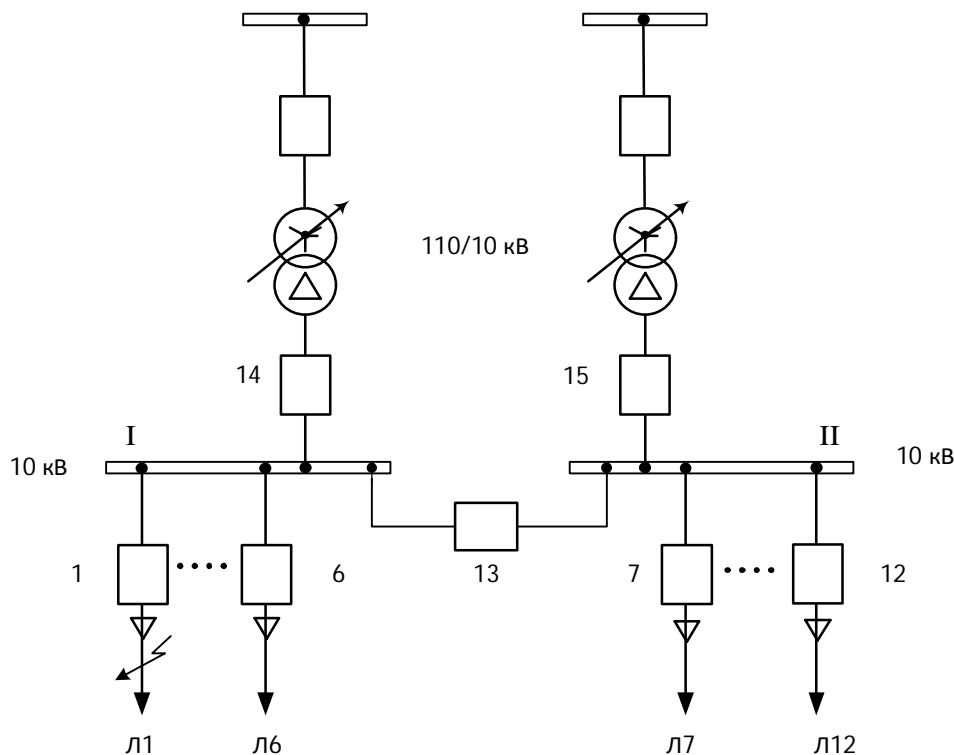


Рис. 2. Схема трансформаторной подстанции 110/10 кВ, которая снабжает электроэнергией промышленное предприятие

За время наблюдения за оборудованием трансформаторной подстанции 110/10 кВ было установлено, что в кабельных линиях Л1 – Л12 или их потребителях, произошло $m = 9$ случаев, когда при КЗ поврежденный участок сети отключался резервной защитой вводных коммутационных аппаратов 14 либо 15 в зависимости от места появления КЗ.

Например, при КЗ в кабельной линии Л1 через защитный коммутационный аппарат под номером 1 прошел сквозной аварийный ток к месту, где произошло КЗ, а его система РЗ отказала в срабатывании (в отключении КЗ). Поврежденная линия Л1 отключилась вводным коммутационным аппаратом 14 (сработала резервная защита), и вместо отключения одной поврежденной линии Л1 отключилась вся секция шин I, что привело к нарушению технологического цикла предприятия. Кроме того, из-за отказа в срабатывании системы РЗ коммутационного аппарата 1 среднее время отключения КЗ вместо 0,2 с стало 0,7 с (0,5 с – ступень селективности). Этого времени оказалось достаточно, чтобы воспламенилась изоляция кабеля линии Л1 в месте появления КЗ с вытекающими из этого последствиями. Диагностика системы РЗ проводилась один раз в год ($\Theta = 1$ год).

Необходимо определить, во сколько раз для данного предприятия сократится число возможных возгораний изоляции кабельных линий Л1 – Л12 в местах случайного появления КЗ, неотключаемых основной защитой, если диагностику системы РЗ коммутационных аппаратов 10 кВ проводить не один раз в год, а два раза в год, т. е. $\Theta = 0,5$ года.

Решение поставленной задачи. Используя исходные данные примера, формулы (12) и (19), находим:

$$l = \frac{n}{N \times T} = \frac{9}{12 \times 5} = 0,15 \text{ год}^{-1}$$

Для $\Theta = 1$ год находим:

$$m = \frac{1}{Q - \frac{1}{l}(1 - e^{-lQ})} = \frac{1}{1 - \frac{1}{0,15}(1 - e^{-0,15 \times 1})} = 15,15 \text{ год}^{-1}.$$

Используя формулу (16) находим коэффициент готовности для случая, когда $\Theta = 1$ год:

$$K(\%) = \frac{m}{l + m} = \frac{15,15}{0,15 + 15,15} = 0,990$$

Аналогичным образом находим коэффициент готовности $K_1(\%)$ для случая, когда $\Theta = 0,5$ года:

$$m = \frac{1}{0,5 - \frac{1}{0,15}(1 - e^{-0,15 \times 0,5})} = 50 \text{ год}^{-1}$$

Тогда

$$K_1(\%) = \frac{50}{50 + 0,15} = 0,997$$

Эффект от изменения сроков диагностики системы РЗ с $\Theta = 1$ год до $\Theta = 0,5$ года позволит уменьшить число возможных возгораний изоляции кабеля в местах случайного появления КЗ в 3,33 раза:

$$\Theta = \frac{1 - 0,990}{1 - 0,997} = 3,33$$

Выводы

1. Система РЗ коммутационного аппарата в динамическом режиме (процесс отключения КЗ) полностью характеризуется следующими параметрами надежности: λ – интенсивность отказов в срабатывании; μ – интенсивность восстановления; Θ – интервал времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения выключателя (системы РЗ).

2. Разработана методика расчета влияния сроков диагностики системы РЗ на вероятность появления пожаров в защищаемой сети.

3. Для конкретного предприятия установлено, что при изменении срока диагностики системы РЗ с $\Theta = 1$ год до $\Theta = 0,5$ года, число пожаров в сети 10 кВ сократится в 3,33 раза.

4. В дальнейших исследованиях надежности автоматических средств защиты электрооборудования в динамическом режиме необходимо разработать методику сбора и обработки статистической информации о повреждаемости автоматических средств защиты сети. Фиксировать частоту появления токов короткого замыкания в сети 6–10 кВ и влияние этих событий на пожарную безопасность системы электроснабжения потребителей электрической энергии.

Список литературы / References

1. Непомнящий, В. А. Надёжность оборудования электрических сетей 220–750 кВ энергосистем / В. А. Непомнящий, Л. А. Дарьян // Библиотечка электротехника. – 2018. – № 9 (237). – С. 1–124. – EDN YJBSYH

Nepomnyashchy, V. A., Daryan, L. A. *Nadozhnost oborudovaniya elektricheskikh setey 220–750 kV energosistem*. Library of Electrical Engineering, 2018, no. 9 (237), pp. 1-124. EDN YJBSYH (In Russian)

2. Кемени, Джон Джордж. Конечные цепи Маркова / Д. Д. Кемени, Д. Л. Снелл ; Перевод с англ. С. А. Молчанова [и др.] ; Под ред. А. А. Юшкевича. – Москва : Наука, 1970. – 271 с.

Kemeni, J. G., Snell, D. L. *Konechnyye tsepi Markova* [Finite Markov chains]; Transl. by A. N. Molchanov [et al.]; Ed. by A. A. Yushkevich. Moscow, Nauka Publ., 1970, 271 p. (In Russian)

3. Дьяков, Б. Н. Случайные процессы : Учебное пособие / Б. Н. Дьяков, В. Ф. Ковязин, А. Н. Соловьев. – СПб. : Лань, 2013. – 640 с.

Dyakov, B. N., Kovyazin, V. F., Soloviev, A. N. *Sluchaynyye protsessy: Uchebnoye posobiye* [Random processes: a textbook]. St. Petersburg, Lan Publ., 2013, 640 p. (In Russian)

4. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 608 с.

Bronstein, I. N., Semendyaev, K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions]. St. Petersburg, Lan Publ., 2023, 608 p. (In Russian)

5. Ковалёв, А. П. О причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,4/0,22 кВ к пожарам в электрифицированных помещениях / А. П. Ковалёв, И. А. Бершадский, А. В. Згарбул // Промышленная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 60–65. – EDN XPMAP

Kovalev, A. P., Bershadsky, I. A., Zgarbul, A. V. *O prichastnosti korotkikh zamykaniy v elektricheskoy provodke 0,4/0,22 kV k pozharom v elektrifitsirovannykh pomeshcheniyakh* [On the involvement of short circuits in electrical wiring of 0.4/0.22 kV in fires in electrified rooms]. Industrial Power Engineering, 2018, no. 4, pp. 60-65. EDN XPMAP (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 24.11.2025

Alexander Petrovich Kovalev, Dr. of Tech. Sci., Professor, Researcher; e-mail: abrecap@mail.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-43
Victoria Viktorovna Yakimishina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor,
Associate Professor of the Department; e-mail: yvsm@list.ru
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Donetsk national technical university»
283001, Donetsk, Artema St., 58. Phone: +7 (856) 301-03-06

INFLUENCE OF RELIABILITY OF AUTOMATIC PROTECTIVE EQUIPMENT ON FIRE SAFETY OF 6–10 kV NETWORK

Objective: To evaluate the impact of the diagnostic time of the relay protection system of a switching device on ensuring fire safety of a 6–10 kV cable network in dynamic mode.

Methods: Theoretical studies of changes in the state of an automatic protection system over time were carried out using Markov processes with two discrete states and continuous time.

Results: For a specific enterprise, it was found that changing the diagnostic time of the 10 kV relay protection system at a 110/10 kV substation from $\Theta = 1$ year to $\Theta = 0.5$ years allowed for a 3.33-fold reduction in the expected number of fires in the insulation of 10 kV equipment during short circuits in the industrial enterprise network.

Scientific novelty: Calculation formulas have been obtained that fully characterize the reliability of the relay protection system in dynamic operation.

Practical significance: The above calculation method allows us to obtain the reliability characteristics of the relay protection system and assess the impact of the timing of the diagnosis of the relay protection system on the fire safety of the protected network.

Keywords: transformer substation; reliability of protective equipment; short circuit; diagnostic time; availability factor.

For citation: Kovalev A. P., Yakimishina V. V. Influence of reliability of automatic protective equipment on fire safety of 6–10 kV network. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 17-25. EDN DPZDMB

УДК 620.193.2:622.692.4

Ильдар Фанилевич Хафизов, д-р техн. наук, проф.; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru
Государственное бюджетное научное учреждение «Академия наук Республики Башкортостан»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Рифкат Мухатъярович Султанов, д-р хим. наук, проф.; e-mail: sultanov55@mail.ru
Дамир Робертович Бакиров, аспирант; e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
450062, Уфа, ул. Матвея Пинского, 4. Тел. +7 (347) 242-03-70

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРА КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛАТА НАТРИЯ

Цель. Комплексное исследование физико-химических свойств и противопожарной эффективности нового ингибитора коррозии на основе полиакрилата натрия для повышения безопасности объектов магистральных нефтепроводов.

Методика. Для оценки свойств ингибитора применялись стандартизированные методы: определение температуры застывания (ГОСТ 20287-91), кинематической вязкости (ГОСТ 33-2000) и плотности (ГОСТ 18995.1-73). Совместимость с пластовыми флюидами изучалась путем визуального контроля смесей с нефтью и пластовой водой. Оценка влияния на пожарную безопасность проводилась методом построения «деревьев событий» и расчетом рисков в программном комплексе TOXI+^{Risk} для участка магистрального нефтепровода.

Результаты. Установлено, что ингибитор обладает оптимальными эксплуатационными характеристиками: низкая температура застывания (-8°C), кинематическая вязкость $1,42 \text{ мм}^2/\text{с}$ и полная совместимость с пластовыми флюидами без выпадения осадка. Расчеты демонстрируют, что его применение снижает индивидуальный пожарный риск до допустимых значений.

Научная новизна. Впервые проведена комплексная оценка ингибитора на основе полиакрилата натрия, доказывающая не только его высокие защитные свойства (эффективность 90 %), но и прямое влияние на снижение вероятности аварийных ситуаций, связанных с коррозионными повреждениями, и как следствие – на уровень пожарного риска.

Практическая значимость. Разработанный ингибитор является экологичной и экономически эффективной альтернативой традиционным нитрит- и фосфатсодержащим составам. Его внедрение на объектах трубопроводного транспорта позволит значительно повысить промышленную безопасность за счет снижения частоты разгерметизации трубопроводов и, как следствие, минимизации риска возникновения пожаров и взрывов.

Ключевые слова: коррозия; ингибитор; полиакрилат натрия; пожарный риск.

Для цитирования: Хафизов И. Ф., Султанов Р. М., Бакиров Д. Р. Исследование физико-химических свойств и противопожарной эффективности ингибитора коррозии на основе полиакрилата натрия // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 26–34. – EDN OTOMCI

Постановка проблемы. В нефтегазовой отрасли коррозия оборудования остается одной из наиболее острых проблем, напрямую влияющей на промышленную безопасность. По данным Ростехнадзора за 2022–2023 гг. до 40 % аварий на магистральных трубопроводах связано именно с коррозионными повреждениями [1]. Особую опасность представляют скрытые формы коррозии – питтинги и межкристаллитное разрушение, которые могут привести к внезапным разрывам трубопровода и масштабным утечкам транспортируемого сырья.

Одним из наиболее опасных последствий коррозии является уменьшение толщины стенок трубопроводов, транспортирующих легковоспламеняющиеся жидкости и газы. В результате неравномерной коррозии формируются зоны локального ослабления металла, что может привести к образованию свищей и трещин. Разрушение целостности трубопровода сопровождается разгерметизацией и утечкой горючего материала, который при контакте с источником воспламенения (например, искрой или горячими поверхностями) способен инициировать пожар или взрыв. Особую опасность представляют коррозионные повреждения в труднодоступных местах, где их сложно своевременно обнаружить [2].

Помимо самой коррозии опасность представляют коррозионные отложения (например, оксиды металлов, сульфиды, солевые отложения), которые могут накапливаться в запорной и предохранительной арматуре, что приводит к ее заклиниванию или снижению скорости срабатывания. В критический момент это может помешать оперативному перекрытию потока горючей среды или сбросу избыточного давления, что увеличивает вероятность развития аварии. Кроме того, коррозия датчиков и элементов автоматических систем пожаротушения снижает их надежность, что делает защитные механизмы менее эффективными [2].

Вторичные продукты коррозии, такие как оксиды и соли переходных металлов (железа, меди, никеля), могут выступать катализаторами процессов окисления углеводородов. Это особенно актуально для нефте- и газоперерабатывающих производств, где даже незначительное количество таких соединений способно ускорить образование перекисных соединений и термическое разложение углеводородного сырья. В результате повышается вероятность самовоспламенения или усиления горения в случае возникновения пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день существует множество способов борьбы с коррозией. В практике трубопроводного транспорта применяется комплексный подход к антикоррозионной защите, сочетающий пассивные и активные методы. К пассивным методам можно отнести применение защитных покрытий (полимерные изоляционные материалы, термостойкие покрытия для участков с высокими температурами), коррозионностойких сталей.

К активным методам относятся электрохимическая защита и ингибиторная защита. Наиболее широкое применение ингибиторной защиты обусловлено рядом ключевых преимуществ данного подхода. В отличие от барьерных покрытий и электрохимических методов, требующих сложного монтажа и строгого соблюдения технологических параметров, ингибиторная защита демонстрирует [3]:

- адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации (температура, состав транспортируемой среды);
- экономическую эффективность за счет отсутствия необходимости масштабных капитальных вложений;
- универсальность применения, включая защиту труднодоступных участков и внутренних поверхностей.

Несмотря на широкое применение традиционных ингибиторов коррозии на основе нитритов и фосфатов, их использование сопряжено с существенными ограничениями, снижающими эффективность и экологическую безопасность антикоррозионной защиты [4].

Традиционные нитритные и фосфатные ингибиторы демонстрируют удовлетворительную эффективность лишь в умеренных температурных условиях. При повышении температуры до $+60-80^{\circ}\text{C}$ и выше наблюдается значительное снижение их защитных свойств из-за ускоренной термической деградации активных компонентов. Это особенно критично для нефтегазовой отрасли, где оборудование часто работает в экстремальных температурных режимах. Кроме того, при низких температурах некоторые составы теряют растворимость, что приводит к их неравномерному распределению в защищаемой системе [5].

Многие классические ингибиторы содержат высокотоксичные соединения, представляющие угрозу для окружающей среды и персонала. Нитриты, например, способны образовывать канцерогенные N-нитрозамины при взаимодействии с органическими веществами, а фосфаты вызывают эвтрофикацию водоемов при попадании в сточные воды. Ужесточение экологических норм делает применение подобных ингибиторов все более проблематичным.

Эффективность традиционных ингибиторов сильно зависит от минерализации и ионного состава пластовых вод. Высокие концентрации хлоридов, сульфатов или кальция могут приводить к образованию нерастворимых осадков, которые способствуют засорению фильтров и узлов оборудования.

Таким образом, существует потребность в разработке новых, более эффективных и экологичных ингибиторов, а также в комплексной оценке их влияния не только на коррозионные процессы, но и на сопутствующие риски, такие как пожарная безопасность.

Цель работы. Комплексное исследование физико-химических свойств и противопожарной эффективности нового ингибитора коррозии на основе полиакрилата натрия для повышения безопасности объектов магистральных нефтепроводов.

Методы исследования. Для оценки характеристик ингибитора использовались стандартизированные методики.

Определение температуры застывания проводилось по ГОСТ 20287-91 с использованием термостатирующей установки ТУ-1М и стеклянных пробирок; точность измерения $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Измерение кинематической вязкости выполнялось согласно ГОСТ 33-2000, а именно применялся капиллярный вискозиметр ВПЖ-2; температурный режим $20,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$; время истечения фиксировалось с точностью 0,1 с.

Плотность рассчитывалась согласно методике, описанной в ГОСТ 18995.1-73.

Оценка совместимости с пластовыми флюидами (пластовая вода, нефть) проводилась следующим образом. Для анализа совместимости с пластовой водой использовался образец с месторождений ООО «Ачим Девелопмент», место отбора ГКП – 51. Для опыта с нефтью использовалась дегазированная нефть плотностью $0,87 \text{ г/см}^3$. Проводилась серия экспериментов при различных соотношениях (от 1 : 9 до 9 : 1), при температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Оценка совместимости проводилась визуальным контролем в течение 6 часов. Полное отсутствие расслоения и выпадения осадка расценивали как положительный результат [6].

Результаты и их обсуждение. Физико-химические свойства разработанного ингибитора представлены в табл. 1. Полученные результаты демонстрируют оптимальные эксплуатационные характеристики разработанного состава, что подтверждает его перспективность для промышленного применения.

Таблица 1

Физико-химические свойства разработанного реагента

Параметр	Показатель
Внешний вид	Прозрачная жидкость
Кинематическая вязкость при +20 °С, мм ² /с	1,42 ± 0,0379
Температура застывания, °С	–8
Плотность при +20 °С, г/см ³	1,25

Особого внимания заслуживает полученное значение температуры застывания (–8 °С), которое существенно ниже, чем у традиционно применяемых составов [7]:

- нитритные ингибиторы: +5...+10 °С;
- фосфатные составы: +3...+7 °С;
- аминные соединения: 0...+5 °С.

Подобный температурный спектр обеспечивает работоспособность ингибитора в широком диапазоне климатических условий.

Проведенные экспериментальные исследования по совместимости ингибитора с пластовыми флюидами дали возможность проанализировать взаимодействие реагента с пластовой водой. Детальные результаты эксперимента сведены в табл. 2, а визуальные наблюдения представлены на рис. 1, 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента по совместимости разработанного ингибитора с пластовой водой и нефтью

Соотношение ингибитора с пластовыми флюидами, мл	Наименование	Наличие расслоения, осадок
1/9	пластовая вода	не наблюдаются
	нефть	не наблюдаются
3/7	пластовая вода	не наблюдаются
	нефть	не наблюдаются
5/5	пластовая вода	не наблюдаются
	нефть	не наблюдаются
7/3	пластовая вода	не наблюдаются
	нефть	не наблюдаются
9/1	пластовая вода	не наблюдаются
	нефть	не наблюдаются

Как видно из результатов исследования, разработанный ингибитор проявляет высокую степень совместимости как с нефтью, так и с пластовой водой. Визуальный осмотр не выявил признаков несовместимости.

Защитные свойства разработанного ингибитора оцениваются как высокоэффективные и имеют степень защитных свойств на уровне 90 %. Результаты исследования по определению степени защитных свойств ингибитора на основе полиакрилата натрия приведены в нашей работе [8].

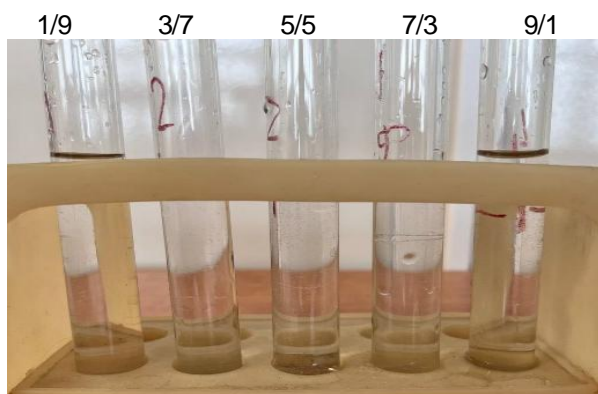


Рис. 1. Общий вид совместимости ингибитора с пластовой водой

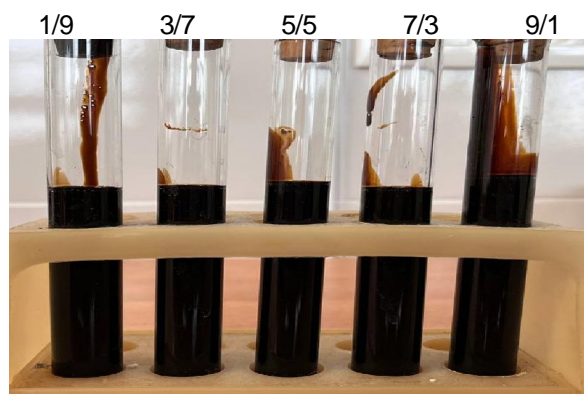


Рис. 2. Общий вид совместимости ингибитора с нефтью

Изучение физико-химических свойств ингибитора коррозии на основе полиакрилата натрия позволяет оценить его потенциальную эффективность в условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов [9]. Полученные экспериментальные данные характеризуют его взаимодействие с агрессивной средой и способность замедлять коррозионные процессы. Однако, как показал анализ литературы, влияние применения ингибитора не ограничивается только защитой металла от разрушения. На промышленных объектах, связанных с транспортировкой нефти и нефтепродуктов, вопросы пожарной безопасности остаются крайне актуальными [10].

Рассмотрение применения ингибитора коррозии с этой точки зрения представляется важным этапом комплексной оценки его эффективности. Для этого в рамках нашей работы был выполнен расчёт пожарного риска на объекте трубопроводного транспорта с учётом влияния ингибитора на вероятность возникновения аварий, обусловленных коррозионными дефектами [11].

Оценка пожарного риска проводилась на примере линейного участка магистрального нефтепровода (МНП) «Усть-Балык – Курган – Уфа – Альметьевск» (УБКУА) на участке «Улу-Теляк – Черкассы». Характеристики нефтепровода: длина – 56,6 км, диаметр труб – 500 мм; пропускная способность – 50 млн т/год, но фактическая перекачка – 25 млн т/год из-за ограничений; рабочее давление – 5 МПа. Данный участок является важной частью нефтепровода «Уралсибнефтепровод», соединяющий промышленные центры.

Для оценки пожарного риска на нефтепроводе использован метод «дереьев событий», который показывает последовательность аварии – от разгерметизации до конечных последствий (рис. 3). Последовательные логические схемы иллюстрируют, как аварийные события приводят к опасным сценариям: пожару пролива и пожару-вспышке – наиболее критичным исходам.

На основе статистических данных о частоте аварийных случаев в сочетании с моделированием в программном комплексе $TOXI^{+Risk}$ была проведена количественная оценка уровня пожарного риска (табл. 3).

При оценке частоты разгерметизации трубопровода рассмотрены два сценария: вариант 1 – для участка с усовершенствованной защитой (поправочный коэффициент $k_{кпз} = 0,16$); вариант 2 – без защиты ($k_{кпз} = 1$). Это позволило учесть влияние коррозии на вероятность аварий.

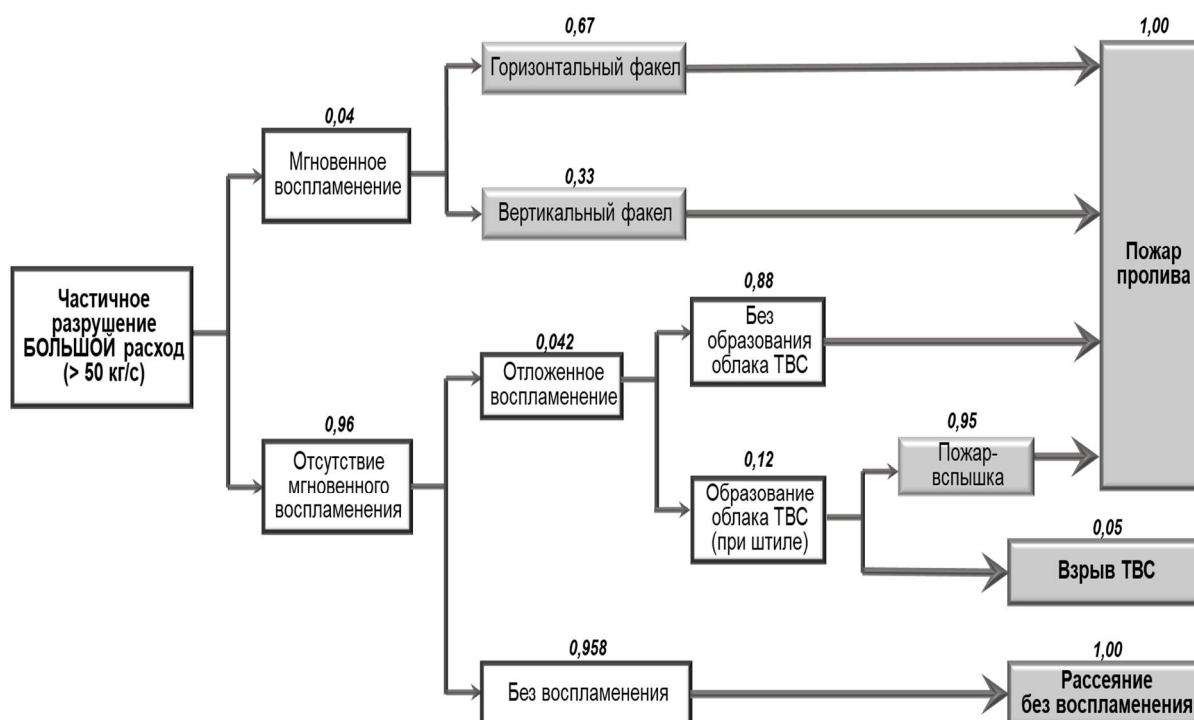


Рис. 3. «Дерево событий» пожароопасных ситуаций на нефтепроводе при среднем расходе более 50 кг/с

Таблица 3

Результаты оценки пожарного риска для участка магистрального трубопровода

Параметр	Вариант события	
	1	2
Количество одновременно находящихся людей	3	3
Количество рискующих	3	3
Коэффициент присутствия	1,00	1,00
Коллективный риск, чел./год	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,02 \times 10^{-5}$
Индивидуальный риск, 1/год	$5,4 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-6}$

Результаты расчетов демонстрируют существенную зависимость показателей безопасности от состояния антикоррозионной защиты. При использовании усовершенствованного ингибитора на основе полиакрилата натрия индивидуальный риск составляет $5,4 \times 10^{-7}$, что соответствует нормативным требованиям Федерального закона № 123 (ст. 93). Однако при отсутствии защитного покрытия и образовании коррозионных отложений значение риска возрастает до $3,4 \times 10^{-6}$, превышая допустимый уровень.

Выводы

1. Физико-химические свойства разработанного ингибитора (полиакрилат натрия с модифицирующими присадками) свидетельствуют о его высокой технологической эффективности и адаптивности к условиям эксплуатации. Низкая температура застывания (-8°C), оптимальная вязкость ($1,42 \text{ мм}^2/\text{с}$) и плотность ($1,25 \text{ г/см}^3$) обеспечивают стабильность реагента в широком диапазоне температур,

что критически важно для нефтепроводов в различных климатических зонах. Полная совместимость с пластовыми флюидами (нефтью и водой) подтверждает его применимость без риска образования осадков или расслоения.

2. Пожарный риск при использовании ингибитора снижается в 6,3 раза (с $3,4 \times 10^{-6}$ до $5,4 \times 10^{-7}$), что подтверждает его значимое влияние на повышение безопасности трубопроводов. Ингибитор минимизирует коррозионные повреждения – основную причину разгерметизации и последующих утечек углеводородов. Расчеты методом «деревьев событий» и моделирование в $\text{TOXI}^{\text{Risk}}$ показали, что применение состава сокращает вероятность опасных сценариев (пожар пролива, вспышка), соответствующих нормам ФЗ № 123.

3. Экономическая и экологическая целесообразность ингибитора на основе полиакрилата натрия делает его перспективной альтернативой традиционным нитрит- и фосфатсодержащим составам. Устойчивость к высоким температурам, отсутствие токсичных компонентов и способность защищать труднодоступные участки позволяют рекомендовать его для внедрения на объектах магистрального транспорта нефти. Дальнейшие исследования целесообразно направить на испытания в реальных условиях с длительным сроком эксплуатации.

Список литературы / References

1. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2024. – 401 с. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 06.07.2025).

Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision. *Otchot o deyatelnosti Federalnoy sluzby po ekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2023 godu* [Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision in 2023]. Closed Joint-Stock Company «Scientific technical center of industrial safety problems research», 2024, 401 p. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (accessed: 06.07.2025). (In Russian)

2. Серебряков, А. Н. Коррозия нефтепромыслового оборудования и мероприятия по противокоррозионной защите на нефтяном месторождении Каракудук (западный Казахстан) / А. Н. Серебряков, И. С. Мотузов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 174-181. – EDN ZDDCTH

Serebryakov, A. N., Motuzov, I. S. *Korrozia neftepromyslovogo oborudovaniya i meropriyatiya protivokorroziionnoy zashchity na neftyannom mestorozhdenii Karakuduk (Zapadnyy Kazakhstan)* [Corrosion of oilfield equipment and anticorrosion techniques applied on the Karakuduk Oilfield (Western Kazakhstan)]. RUDN Journal of Engineering Research, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 174-181. EDN ZDDCTH (In Russian)

3. Ингибиторы коррозии (обзор) / Л. С. Козлова, С. В. Сибилева, Д. В. Чесноков, А. Е. Кутырев // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 2 (35). – С. 67–75. – EDN TQKERX

Kozlova, L. S., Sibileva, S. V., Chesnokov, D. V., Kutyrev, A. E. *Ingibitory korrozii (obzor)* [Corrosion inhibitors (review)]. Aviation Materials and Technologies, 2015, no. 2 (35), pp. 67-75. EDN TQKERX (In Russian)

4. Дедов, С. С. О внутренней коррозии трубопроводов – причинах, механизме и способах защиты / С. С. Дедов, В. В. Емельянов, С. П. Шатило // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и ученых, посвященной 35-летию

филиала ТИУ в г. Нижневартовске, Нижневартовск, 28 апреля 2016 года. – Нижневартовск : Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 130–140. – EDN YHXXNHP

Dedov, S. S., Emelyanov, V. V., Shatilo, S. P. *O vnutrenney korrozii truboprovodov – prichinakh, mekhanizme i sposobakh zashchity. Opyt, aktualnyye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i uchenykh, posvyashchennoy 35-letiyu filiala TIU v g. Nizhnevartovske, Nizhnevartovsk, 28 aprelya 2016 goda.* Nizhnevartovsk: Tyumen Industrial University, 2016, pp. 130-140. EDN YHXXNHP (In Russian)

5. Влияние ингибиторов коррозии на реологические свойства водно-органических растворов полиакриловых загустителей / М. В. Саввинова [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 11-2. – С. 266–270. – EDN XCGTMH

Savinova, M. V., Panina, E. A., Kvashennikov, A. I., Ryabova, T. A., Logutov, V. I. *Vliyaniye ingibitorov korrozii na reologicheskiye svoystva vodno-organicheskikh rastvorov poliakrilovykh zagustiteley* [Influence of corrosion inhibitors on rheological characteristics of water/organic solutions of polyacrylic thickener]. *Advances in current natural sciences*, 2016, no. 11-2, pp. 266-270. EDN XCGTMH (In Russian)

6. Федорова, А. Ф. Методический комплекс по изучению химической совместимости пластовых флюидов с системами поддержания пластового давления / А. Ф. Федорова, Е. Ю. Шиц // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 3. – С. 88–91. – EDN NYCQQX

Fedorova, A. F., Shits, E. Yu. *Metodicheskiy kompleks po izucheniyu khimicheskoy sovместимости plastovykh flyuidov s sistemami podderzhaniya plastovogo davleniya.* ChemChemTech, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 88-91. EDN NYCQQX (In Russian)

7. The Effect of Microstructure on Microbiologically Influtenced Corrosion / D. Walsh [et al.] // JOM. 1993. Vol. 45. P. 22–30. DOI: 10.1007/BF03222429 (In English)

8. Хафизов, И. Ф. Применение полиакрилата натрия в качестве ингибитора коррозии для повышения пожарной безопасности на трубопроводном транспорте / И. Ф. Хафизов, Р. М. Султанов, Д. Р. Бакиров // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 4 (72). – С. 164–173. – DOI 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-164-173

Khafizov, I. F., Sultanov, R. M., Bakirov, D. R. *Primeneniye poliakrilata natriya v kachestve ingibitora korrozii dlya povysheniya pozharnoy bezopasnosti na truboprovodnom transporte* [The use of sodium polyacrylate as a corrosion inhibitor to improve fire safety in pipeline transport]. *Problems of risk management in the technosphere*, 2024, no. 4 (72), pp. 164-173. DOI 10.61260/1998-8990-2025-2024-4-164-173 (In Russian)

9. Исследование влияния сульфатвосстанавливающих бактерий на коррозионные свойства магистральных трубопроводов / Л. Х. Зарипова [и др.] // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2022. – № 4. – С. 46–68. – DOI 10.17122/ogbus-2022-4-46-68

Zaripova, L. H., Khafizov, I. F., Spynu, E. A., Khafizov, F. Sh., Permyakov, A. V., Ivanova, Yu. S. *Issledovanie vliyaniya sulfatvosstanavlivayushchikh bakteriy na korroziionnye svoystva magistralnykh truboprovodov* [Investigation of sulfate-reducing bacteria effect on corrosive properties of main pipelines]. *Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2022, no. 4, pp. 46-68. – DOI 10.17122/ogbus-2022-4-46-68 (in Russian)

10. Решетников, С. М. Ингибиторы кислотной коррозии металлов / С. М. Решетников. – Ленинград : Химия. – 1986. – 142 с. – EDN VLSPMH

Reshetnikov, S. M. *Inhibitory kislotnoy korrozii metallov* [Inhibitors of acid corrosion of metals]. Leningrad: Khimiya Publ., 1986, 144 p. EDN VLSPMH (In Russian)

11. Скрыпникова, О. И. Сравнительный анализ методов оценки рисков аварий на объектах транспортировки нефтепродуктов / О. И. Скрыпникова, В. Ф. Щетка // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2022. – № 4. – С. 20–33.

Skrypnikova, O. I., Shchetka, V. F. *Sravnitelnyy analiz metodov otsenki riskov aviariy na ob'yektakh transportirovki nefteproduktov* [Comparative analysis of methods for assessing the risks of accidents at oil products transportation facilities]. Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia», 2022, no. 4, pp. 20-33. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 17.09.2025

Ildar Fanilevich Khafizov, Dr. of Tech. Sci., Professor; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan

Ufa State Petroleum Technological University

Rifkat Mukhatyamovich Sultanov, Dr. of Chem. Sci., Professor; e-mail: sultanov55@mail.ru

Damir Robertovich Bakirov, Postgraduate Student; e-mail: damir.bakirov.99@mail.ru

Ufa State Petroleum Technological University

450062, Ufa, Matveya Pinskogo St., 4. Phone: +7 (347) 242-03-70

INVESTIGATION OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND FIRE-RETARDANT EFFICACY OF A SODIUM POLYACRYLATE-BASED CORROSION INHIBITOR

Objective. Comprehensive study of the physicochemical properties and fire protection efficiency of a new sodium polyacrylate-based corrosion inhibitor for application at main oil pipeline facilities.

Methodology. Standardized methods were used to evaluate the inhibitor properties: determination of the pour point (GOST 20287-91), kinematic viscosity (GOST 33-2000), and density (GOST 18995.1-73). Compatibility with reservoir fluids was studied by visual monitoring of mixtures with oil and formation water. Assessment of the impact on fire safety was carried out using event tree analysis and risk calculations in the TOXI⁺Risk software package for a section of a main oil pipeline.

Results. The inhibitor was found to have optimal performance characteristics: low pour point (−8 °C), kinematic viscosity of 1.42 mm²/s, and full compatibility with reservoir fluids without sediment formation. Calculations demonstrate that its application reduces individual fire risk to acceptable levels.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive assessment of a sodium polyacrylate-based inhibitor has been conducted, proving not only its high protective properties (90 % efficiency) but also its direct impact on reducing the probability of accidents related to corrosion damage and, consequently, on the level of fire risk.

Practical significance. The developed inhibitor is an environmentally friendly and cost-effective alternative to traditional nitrite- and phosphate-containing compositions. Its implementation at pipeline transport facilities will significantly enhance industrial safety by reducing the frequency of pipeline leaks and, as a result, minimizing the risk of fires and explosions.

Key words: corrosion; inhibitor; sodium polyacrylate; fire risk.

For citation: Khafizov I. F., Sultanov R. M., Bakirov D. R. Investigation of the physicochemical properties and fire-retardant efficacy of a sodium polyacrylate-based corrosion inhibitor. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 26-34. EDN OTOMCI

УДК 614.833.4

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РЕЖИМЕ ДЕТОНАЦИИ

Цель. Повышение эффективности мероприятий по взрывопожарной защите промышленных объектов на основе выявления наиболее оптимального метода прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей в режиме детонации.

Методы. Аналитические методы исследования, приведенные в руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» от 2022 г. (метод 1) и ГОСТ Р 12.3.047-2012 (метод 2), а также мультиэнергетический метод Нидерландской организации прикладных научных исследований (метод 3), метод Бейкера-Стрелой-Танга (метод 4) и программа «Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей. Версия 2» (метод 5).

Результаты. Установлено, что метод 2 и метод 4 неоправданно завышают коэффициент участия горючего вещества во взрыве (Z), поэтому их использование для определения избыточного давления воздушной ударной волны при детонации топливно-воздушной смеси не рекомендуется.

Методы 1, 3 и 5 дают приемлемые результаты оценки воздействия воздушной ударной волны, однако для применения метода 1 требуется внесение дополнительных изменений, расширяющих круг веществ, которые могут взрываться в режиме детонации.

Научная новизна. оказана возможность применения альтернативных способов оценки последствий взрыва топливно-воздушных смесей в режиме детонации.

Практическая значимость. Полученные результаты исследования позволят повысить эффективность планирования и реализации мероприятий по взрывопожарной защите промышленных объектов.

Ключевые слова: взрыв; пожар; топливно-воздушная смесь; детонация; авария.

Для цитирования: Алексеев С. Г. Сравнительный анализ методик прогнозирования избыточного давления воздушной ударной волны в режиме детонации // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 35–41. – EDN CNQBNZ

Постановка проблемы. Взрывы топливно-воздушных смесей (далее ТВС) – нежелательный спутник человеческой жизнедеятельности, поэтому данная проблема является актуальной, и до сих пор она изучается многими исследователями разных стран [1–7]. В промышленности доля взрывов ТВС по разным оценкам составляет 40–65 % от всех техногенных аварий, связанных со взрывами [8–11]. В настоящее время разработаны различные методики для определения последствий взрывов ТВС, многие из которых официально легализованы в нормативно-технических документах, поэтому обоснованный выбор методики оценки взрывоопасности ТВС является актуальной задачей.

Анализ последних исследований. В предыдущих исследованиях показано:

- уравнение (A4) СП 12.13130.2009, мультиэнергетический метод Нидерландской организации прикладных научных исследований (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek – ME-TNO) и метод Бейкера-Стрелой-Танга (Baker-Strehlow-Tang – BST2) линейно взаимосвязаны между собой через обобщенную переменную (минимальный безопасный удельный объем) [10];

- результаты прогнозов взрывов ТВС по методам ГОСТ Р 12.3.047-98, ПБ 09-540-03, РБ Г-05-039-96, РД 03-409-01, TNO, BST и Дорофеева плохо согласуются между собой [11, 12],

- программа TOXI+Risk (метод РД 03-409-01) завышает радиусы зон повреждений зданий и сооружений в среднем на 18 % [11],

- метод Дорофеева применяют для прогнозирования взрывов ТВС в режиме детонации, а в режиме дефлаграции – метод ME-TNO [12],

- программный комплекс PHAST (метод BST) дает приемлемые прогнозы в сравнении с реальными разрушениями и повреждениями зданий и технологического оборудования [13].

Цель работы. Повышение эффективности мероприятий по взрывопожарной защите промышленных объектов на основе выявления наиболее оптимального метода прогнозирования последствий взрывов топливно-воздушных смесей в режиме детонации.

Объект исследования. Крупнейшая авария на предприятии «Нипро» (Nupro) в городе Фликсборо (Flixborough) в Великобритании при детонации паровоздушной смеси циклогексана, в результате которой погибло 64 человека, несколько десятков людей получили ранения разной степени тяжести, разрушено около 2000 промышленных и гражданских зданий, уничтожено технологическое оборудование компании Нипро.

Методы исследования

1. Уравнения (1) – (3) из Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (далее РБ от 2022 г.).¹

2. Формулы (2) – (4) из ГОСТ Р 12.3.047-2012,² которые ранее применялись в РД 03-409-01, РБ от 2015 г. и 2016 г.³

3. Метод ME-TNO, реализованный в компьютерной программе «Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей».⁴

4. Метод BST2 (компьютерная программа «FreeBST»).⁵

5. Уравнение (5) [14], реализованное в программе «Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей. Версия 2».⁶

¹ РБ «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утв. Приказом Ростехнадзора от 28.11.2022 № 412). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

² ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. (утв. Приказом Росстандарта от 27.12.2012 № 1971-ст). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

³ РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изм. и доп., утв. и введ. в действие Постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.2001 № 25). РБ «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утв. Приказами Ростехнадзора от 20.04.2015 № 159 и от 32.03.2016 № 137). Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс.

⁴ Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей / С. Г. Алексеев [и др.] // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663043 (дата поступления заявки 17.10.2016, дата регистрации в госреестре 28.11.2016). Бюллетень ФИПС «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». – 2016. – № 12.

⁵ Сайт компании TAM Consulting, L.L.C. URL: <http://www.tamcon.com/tamcon/FreeBST.zip> (дата обращения 14.07.2025).

⁶ Расчет параметров взрыва газопаровоздушных смесей. Версия 2 / С. Г. Алексеев [и др.] // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619875 (дата поступления заявки 11.07.2017, дата регистрации в госреестре 08.09.2017). Бюллетень ФИПС «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». – 2017. – № 9.

$$\ln(P_x) = -0,9278 - 1,5415\ln(R_x) + 0,1953\ln(R_x)^2 - 0,0285 \ln(R_x)^3 \quad (1)$$

$$\Delta P = P_x P_o \quad (2)$$

$$R_x = \frac{r}{\sqrt[3]{\frac{E}{P_o}}} \quad (3)$$

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66\ln(R_x) + 0,26\ln(R_x)^2 \quad (4)$$

$$\Delta P = P_o \left(-0,00113 + \frac{0,14003}{R_x} + \frac{0,42948}{(R_x)^2} - \frac{0,26310}{(R_x)^3} + \frac{0,13025}{(R_x)^4} - \frac{0,03291}{(R_x)^5} + \frac{0,00326}{(R_x)^6} \right) \quad (5)$$

где P_o – начальное давление, кПа;

r – расстояние от центра взрыва, м;

E – эффективный энергозапас ТВС, Дж.

Исходные данные. В табл. 1 приведены результаты визуальной оценки последствий взрыва на предприятии «Нипро», полученные С. Сади (С. Sadee).

Таблица 1

Оценка последствий взрыва по Сади [15]

r , м	ΔP , кПа	r , м	ΔP , кПа	r , м	ΔP , кПа
120	50	230	24	700	3,5
125	60	290	18,5	825	2,75
130	50	335	14	1190	2,5
135	60	350	14	1340	1,75
220	27,5	400	12	1345	1,75

Примечания: r – расстояние от эпицентра взрыва;

ΔP – избыточное давление взрыва.

По данным В. Маршала в результате аварии в процессе адиабатического расширения теоретически могло испариться 44 т циклогексана. Теплота сгорания циклогексана – 43,440 МДж/кг.⁷

Результаты исследования. Результаты расчетов избыточного давления воздушной ударной волны (ΔP) по методам 1 – 5 представлены в табл. 2.

Обсуждение. Методы 1 и 2 рассматривают циклогексан как соединение 3-го класса («средне-чувствительные вещества»), поэтому они не допускают возможность взрыва его паров в режиме детонации. Таким образом, формально уравнения (1) и (4) не могут применяться в случае взрыва в Фликсборо. Однако для оценки потенциальной их возможности применения для соединений 3-го класса в случае взрыва в режиме детонации, они использованы в сравнительном анализе. Поскольку доля участия во взрыве циклогексана неизвестна, поэтому методом подбора определены масса горючего вещества, участвующего во взрыве, при которой средняя ошибка (SE) прогноза минимальна (см. табл. 2).

⁷ DIPPR 801. URL: <https://dippr.aiche.org/> (дата обращения 12.09.2025).

Таблица 2

Результаты расчетов избыточного давления на фронте детонационной волны

r, м	Метод 1: $m = 8,8 \text{ Т}^{1)}$		Метод 2: $m = 19,8 \text{ Т}^{2)}$		Метод 3: $m = 5,4 \text{ Т}^{3)}$		Метод 4: $m = 19 \text{ Т}^{5)}$		Метод 5: $m = 8,8 \text{ Т}^{4)}$	
	$R_{x, \text{м/кДж}}^{1/3}$	$\Delta P, \text{кПа}$	$R_{x, \text{м/кДж}}^{1/3}$	$\Delta P, \text{кПа}$	$R_{x, \text{м/кДж}}^{1/3}$	$\Delta P, \text{кПа}$	$R_{x, \text{м/кДж}}^{1/3}$	$\Delta P, \text{кПа}$	$R_{x, \text{м/кДж}}^{1/3}$	$\Delta P, \text{кПа}$
120	0,7679	61,05	0,5875	68,91	0,9071	58,45	0,5964	57,43	0,7708	60,03
125	0,7999	57,09	0,6119	57,50	0,9449	53,21	0,6213	54,81	0,8030	56,55
130	0,8319	53,57	0,6364	48,41	0,9827	49,97	0,6461	52,40	0,8351	53,40
135	0,8639	50,41	0,6609	41,10	1,0205	48,62	0,6710	50,18	0,8672	50,55
220	1,4079	24,17	1,0770	5,75	1,6630	28,48	1,0934	28,67	1,4132	25,03
230	1,4719	22,70	1,1260	4,88	1,7386	25,95	1,1431	27,25	1,4774	23,49
290	1,8559	16,53	1,4197	2,15	2,1922	13,63	1,4413	20,89	1,8629	16,87
335	2,1438	13,68	1,6400	1,33	2,5323	11,60	1,6650	17,71	2,1519	13,75
350	2,2398	12,93	1,7135	1,16	2,6457	11,05	1,7395	16,84	2,2483	12,92
400	2,5598	10,92	1,9582	0,76	3,0237	9,52	1,9880	14,45	2,5695	10,70
700	4,4796	5,60	3,4269	0,17	5,2915	5,09	3,4790	7,61	4,4965	4,93
825	5,2796	4,64	4,0388	0,12	6,2364	4,24	4,1003	6,30	5,2995	3,95
1190	7,6154	3,09	5,8257	0,06	8,9955	2,82	5,9143	4,14	7,6441	2,43
1340	8,5753	2,71	6,5601	0,05	10,129	2,47	6,660	3,62	8,6077	2,08
1345	8,6073	2,70	6,5845	0,05	10,167	2,46	6,685	3,60	8,6398	2,07
SE ⁶⁾	18,19		159,48		18,98		15,50		15,80	

Примечания: ¹⁾ 1-й диапазон;²⁾ 1-й класс взрыва;³⁾ 10-й класс взрыва;⁴⁾ 9-й класс взрыва;⁵⁾ Конфигурация распространения фронта взрыва – 2,5D, пространство сильно загромождено;

⁶⁾ Средняя ошибка: $SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, где $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n-1}}$, $n = 15$, x_i – результаты расчета ΔP по методам 1–5, y_i – значения ΔP , приведенные в табл. 1.

Для легковоспламеняющихся жидкостей, включая циклогексан, коэффициент участия горючего вещества во взрыве в помещениях (Z) по умолчанию принимается равным 0,3 в ГОСТ Р 12.3.047-2012. Понятно, что для взрывов ТВС на открытом пространстве коэффициент Z будет меньше 0,3.

Как видно из таблицы 2 методы 2 и 4 не отвечают этому условию, поскольку они предполагают, что коэффициент Z будет равен 0,45 (19,9 : 44) и 0,43 (19 : 44) соответственно. Таким образом, методы 2 и 4 нецелесообразно использовать для определения избыточного давления на фронте детонационной волны.

Расчеты, выполненные по методам 1 и 5, показывают, что масса горючего вещества (M_f), участвующего во взрыве ТВС, составила 8,8 т, тогда как полученный методом 3 показатель $M_f = 5,4$ т.

Поскольку средняя ошибка (SE) для метода 5 не сильно отличается от средней ошибки методов 1 и 3, то эти методы могут быть рекомендованы для прогнозирования и оценки последствий взрывов ТВС в режиме детонации.

Выводы. В результате проведенного исследования установлено, что методы 2 (ГОСТ Р 12.3.047-2012) и 4 (BST2) неоправданно завышают коэффициент участия горючего вещества во взрыве (Z), поэтому их использование для определения избыточного давления воздушной ударной волны при детонации ТВС не рекомендуется.

Поскольку в методе 2 предложен алгоритм расчета из отмененного РД 03-409-01, то назрела необходимость внесения изменений в ГОСТ Р 12.3.047-2012 путем взятия на вооружение формулы (1) из РБ от 2022 г.

Для прогнозирования и оценки последствий взрывов ТВС в режиме детонации целесообразно применять методы 1 (РБ от 2022 г.), 3 (МЕ-TNO) и 5 (уравнение (5)).

Однако применение уравнения (1) для соединений типа циклогексана требует внесения дополнительных изменений в РБ от 2022 г., которые допускали бы для этих горючих веществ взрыв в режиме детонации.

Дальнейшие исследования по разработке новых и совершенствованию существующих методов прогнозирования последствий взрывов ТВС актуальны, поскольку их результаты позволят более эффективно планировать и рационально осуществлять мероприятия по взрывопожарной защите промышленных объектов.

Список литературы / References

1. Luo, Z., Wu, G., Cheng, F., Wang, T. The Effect of Favorable Conditions within Chemical Process Units on Vapour Cloud Explosion Overpressures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 96 (2025): 105617. DOI: 10.1016/j.jlp.2025.105617. (In English)
2. Исследование динамических характеристик взрыва газа, направленное на повышение безопасности при эксплуатации сооружений / С. В. Саркисов, М. Д. Рузманов, К. А. Сажин, Д. К. Петров // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2024. – № 2 (30). – С. 369–384. EDN OFBAIO
Sarkisov, S. V., Ruzmanov, M. D., Sazhin, K. A., Petrov, D. K. *Issledovanie dinamicheskikh harakteristik vzryva gaza, napravlennoe na povyshenie bezopasnosti pri ekspluatacii sooruzhenij* [Investigation of the dynamic characteristics of a gas explosion aimed at improving safety during the operation of facilities]. *Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovaniy*, 2024, no. 2 (30), pp. 369-384. EDN OFBAIO (In Russian)
3. Gong, H., Liang, H., Zhang, Q. Explosion Hazard of Propane/Air Mixture in Tank Under Transient High Temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 149 (2024): 14925-14942. DOI: 10.1007/s10973-024-13817-x. (In English)

4. Shi, J., Li, J., Li, Y., Usmani, A. S., Zhang, L. Numerical Investigation of Hydrogen Vapor Cloud Explosion from a Conceptual Offshore Hydrogen Production Platform. *Journal of Safety and Sustainability*. 1 (2024): 189-201. DOI: 10.1016/j.jsasus.2024.11.004. (In English)

5. Тюрин, А. П. Разработка подхода для оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей с учетом особенностей застройки / А. П. Тюрин, И. М. Янников // *Безопасность техногенных и природных систем*. – 2023. – Т. 7. № 2. – С. 17–26. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26.

Tyurin, A. P., Yannikov, I. M. *Razrabotka podhoda dlya ocenki posledstviy vzryvov toplivno-vozdushnykh smesey s uchetom osobennostey zastroyki* [Development of an Approach to Assess the Consequences of Fuel-Air Mixtures Explosions Taking into Account the Development Features]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnnykh system*, 2023, Vol. 7, no. 2, pp. 17-26. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-17-26. (In Russian)

6. Комаров, А. А. Анализ последствий взрывной аварии на территории промышленного предприятия / А. А. Комаров, Р. Р. Шангараев // *Безопасность труда в промышленности*. – 2023. – № 11. – С. 70–77. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-11-70-77.

Komarov, A. A., Shangaraev R. R. *Analiz posledstviy vzryvnoj аварии na territorii promyshlennogo predpriyatiya* [Analysis of the Consequences of an Explosive Accident on the Territory of an Industrial Enterprise]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2023, no. 11, pp. 70-77. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-11-70-77. (In Russian)

7. Shi, Y., Xie, C., Li, Z., Ding, Y. A Quantitative Correlation of Evaluating the Flame Speed for the BST Method in Vapor Cloud Explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 73 (2021): 104622. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104622. (In English)

8. Бесчастнов, М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М. В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.

Beschastnov, M. V. *Promyshlennyye vzryvy. Ocenka i preduprezhdenie* [Industrial explosions. Assessment and Prevention]. Moscow: Khimiya, 1991, 432 p. (In Russian)

9. Акинин, Н. И. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах / Н. И. Акинин, Н. Н. Булхов, В. А. Гериш // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2010. – Т. 19, № 10. – С. 53–55. EDN: OFXBDD.

Akinin, N. I., Bulhov, N. N., Gerish, V. A. *Statisticheskij analiz prichin аварий i travmatizma na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh* [The Statistical Analysis of Reasons of Accident and Industrial Injuries on Dangerous Industrial Objects]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 53-55. EDN: OFXBDD. (In Russian)

10. Alexeev, S. G., Poluyan, L. V., Gur'ev, E. S., Barbin, N. M. Methods of Predicting Vapor Cloud Explosions in Enclosed Spaces. *Coke and Chemistry*, 61 (2018): 312-317. DOI: 10.3103/S1068364X18080021. (In English)

11. Анализ методов расчета последствий взрыва на опасных производственных объектах / Д. Ф. Нуретдинова, Е. А. Гостенова, К. Н. Абдрахманова, Н. В. Шутов // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. – 2018. – № 2. – С. 159–187. – EDN UPSZIS.

Nuretdinova D. F., Gostenova E. A., Abdrakhmanova K. N., Shutov N. V. *Analiz metodov rascheta posledstviy vzryva na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh* [Analysis of Methods for Calculating of Explosion Aftermath on Especially Dangerous Industrial Objects]. *Oil and Gas Business*, 2018, no. 2, pp. 159-187. EDN UPSZIS (In Russian)

12. Сравнительный анализ методов прогнозирования на примерах реальных взрывов / С. Г. Алексеев [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2016. – Т. 25, № 7. – С. 16–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26.

Alexeev, S. G., Avdeev, A. S., Litvinov, V. N., Gracheva, N. N., Rudenko, N. B., Orishchenko, I. V., Barbin, N. M. *Sravnitel'nyi analiz metodov prognozirovaniia na primerakh realnykh vzryvov* [Comparative Analysis of Techniques of Forecasting VCE on Example

of Real Explosions] *Pozharovzryvobezopasnost*, 2016, Vol. 25, no. 7, pp. 16-26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.07.16-26. (In Russian)

13. Sharma, R. K., Gurjar, B. R., Wate, S. R., Ghuge, S. P., Agrawal, R. Assessment of an Accidental Vapour Cloud Explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. Accident at Jaipur, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26 (2013): 82-90. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.09.009. (In English)

14. Алексеев, С. Г. Новое уравнение для определения избыточного давления взрыва топливовоздушных смесей / С. Г. Алексеев, А. С. Авдеев, Н. М. Барбин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 274-279. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.8.

Alexeev S. G., Avdeev A. S., Barbin N. M. *Novoe uravnenie dlia opredeleniia izbytochnogo davleniia vzryva toplivovozdushnykh smesei* [New Equation for Determination of Overpressure of Fuel-Air Mixture Blast] *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2017, Vol. 16, no. 3, pp. 274-279. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.8. (In Russian)

15. Marshall, V. C. *Major Chemical Hazards*. Chichester: Ellis Harwood Ltd., 1987, 587 p. (In English)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Г. И. Педфибаем
Дата поступления рукописи 15.10.2025

*Sergey Gennad'evich Alexeev, Cand. of Chem. Sci., Associate Professor, Senior Researcher;
e-mail: 3608113@mail.ru*

*Science and Engineering Center «Reliability and Safety of Large Systems and Machines»
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
620049, Yekaterinburg, Stencheskaya St., 54-a. Phone: +7(343) 374-16-82*

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS TO PREDICT OVERPRESSURE OF AIR SHOCK WAVE IN DETONATION MODE

Objective. Enhancing the effectiveness of industrial fire protection measures by identifying the most optimal method for predicting the effects of fuel-air mixture explosions in the detonation mode.

Methods. Analytical methods of the study given in the safety manual «Methodology for assessing the consequences of accidental explosions of fuel-air mixtures» from 2022 (method 1) and GOST R 12.3.047-2012 (method 2), as well as multi-energy method of the Netherlands Organization for Applied Scientific Research / Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (method 3), the Baker-Strehlow-Tang (method 4) and the Program «Calculation of explosion parameters of gas-vapor-air mixtures. Version 2» (method 5).

Results. Methods 2 and 4 have been found to inappropriately overstate the fuel factor in the explosion (Z), so their use for determining the excess pressure of an air shock wave when detonating a fuel-air mixture (hereinafter TBC) is not recommended.

Methods 1, 3 and 5 provide acceptable results for the evaluation of the effects of an air shock wave, but the application of method 1 requires additional modifications to expand the range of substances that can be detonated in the detonation mode.

Scientific novelty. The possibility of using alternative ways to estimate the consequences of explosion of fuel-air mixtures in detonation mode is shown.

Practical significance. Taking into account the results of the study will make it possible to plan and implement activities for the explosion-fire protection of industrial facilities more effectively.

Key words: explosion; fire; fuel-air mixture; detonation; accident.

For citation: Alexeev S. G. Comparative analysis of methods to predict overpressure of air shock wave in detonation mode. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 35-41. EDN CNQBNZ

II. Безопасность труда

УДК 614.8''363':622.323

Светлана Александровна Гарелина, канд. техн. наук., доц., профессор кафедры;

e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Константин Павлович Латышенко, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры;

e-mail: kplat@mail.ru

Алексей Юрьевич Скрынников, старший преподаватель Института развития МЧС России;

e-mail: skrynnikov@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»

141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, 1А. Тел.: 8 (498) 699-05-59

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Цель. Сокращение времени проведения мероприятий по локализации разливов нефти и нефтепродуктов путем обоснования системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов, с целью комплексного подхода к мероприятиям по локализации и применению мобильных технических средств локализации в рамках ограничений, определяемых существующими нормативно-техническими актами и экономическими условиями.

Методика. Подход основан на анализе существующих решений к формированию систем, определению их элементов и взаимосвязи между ними. Объединение элементов различной природы в единую систему формирует взаимосвязь их параметров, в том числе мобильных технических средств и мероприятий с их применением, что обеспечивает сочетание теоретической обоснованности и практической применимости.

Результаты. Выявлены системные признаки и обоснован состав системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов. На основании анализа нормативно-технических документов введены ограничения. Обоснован перечень параметров исследуемой системы.

Система локализации разливов нефти и нефтепродуктов включает три взаимосвязанных элемента: мероприятия по локализации разливов, мобильные технические средства локализации разливов, нормативно-технические документы, требования которых формируют ограничения и обосновывают ее параметры. Для проведения мероприятий по локализации разливов нефти и нефтепродуктов на опасных производственных объектах предложена конструкция мобильного технического средства локализации разливов, применение которого может оказать значительное влияние на параметры системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

Научная новизна. Заключается в комплексном подходе к исследованию эффективности мероприятий по локализации разливов ННП путем их объединения с техническими средствами и финансово-нормативными ограничениями в систему локализации разливов нефти и нефтепродуктов.

Практическая значимость. Позволит определить в рамках выделенных средств рациональные параметры технических средств локализации разливов ННП и проводимых мероприятий с учетом существующих ограничений.

Ключевые слова: *нефть и нефтепродукты; авария с разливом нефти и нефтепродуктов; чрезвычайная ситуация; мероприятия по локализации разливов; технические средства локализации; система локализации разливов нефти и нефтепродуктов; ущерб при чрезвычайных ситуациях.*

Для цитирования: *Гарелина С. А., Латышенко К. П., Скрынников А. Ю. К вопросу обоснования системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 42–48. – EDN GEOQRW*

Постановка проблемы. Исследования последних лет [1, 2], а также анализ отчетных документов [3] показывает, что добыча нефти (с учетом газоконденсата) в 2023 г. в России по сравнению с 2022 г. возросла в 1,53 раза и составила 530,6 млн т, что привело к увеличению нагрузки на нефтепроводы, предприятия по хранению и переработке нефти и нефтепродуктов (ННП), увеличению риска возникновения аварий и ущерба от них.

Значительный ущерб от аварий и ЧС с разливом ННП имеет место на всех этапах хранения и транспортировки ННП на опасных производственных объектах (ОПО). По разным оценкам ущерб составляет 2–10 % ННП (потеря до 2 % считается допустимой) [1, 2]. Ежегодные потери ННП достигают 8–40 млн т, а последствия аварий и ЧС с разливом ННП и затрат на их ликвидацию в среднем составляют порядка 2 млн руб. на одну аварию [1].

Локализация разливов ННП опирается на существующие временные нормативы, приведенные в Постановлении Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451. При этом сокращение времени локализации путем повышения эффективности мероприятий может способствовать значительному снижению ущерба.

В связи с увеличением частоты аварий с разливом ННП и ростом наносимого ущерба [3] был проведен анализ мероприятий эффективного реагирования на разливы ННП¹, в результате которого выявлена низкая эффективность мероприятий и применяемых технических средств (ТС) по локализации аварий и ЧС с разливом ННП.

Данная проблемная ситуация может быть решена в следующих направлениях:

1. Сокращение времени реагирования на разливы ННП за счет совершенствования средств автоматики на ОПО с оборотом ННП.
2. Совершенствование применяемых инженерно-технических средств.
3. Увеличение численности сил и средств реагирования на разливы ННП.

Однако для их реализации требуются значительные материальные, финансовые, людские, технические и другие ресурсы.

Анализ последних исследований. Аварии на ОПО с оборотом ННП имеют высокий уровень ущерба, и требуют системного подхода при их предотвращении и ликвидации. Анализ подходов к локализации разливов ННП показывает, что размер ущерба от разливов ННП напрямую зависит от оперативности их локализации. Ущерб может быть уменьшен за счет совершенствования мероприятий по локализации разливов ННП¹, которая, являясь первичным этапом его ликвидации, обеспечивает ограничение распространения и уменьшает ущерб ОПО.

В настоящее время основными ТС для локализации разливов ННП являются различные виды заграждений, приведенные в табл. 1. Большую часть указанных ТС возводят при помощи строительной техники на пути распространения разлива ННП, что значительно увеличивает время локализации разлива ННП за счет трудозатрат и необходимости доставки техники к местам проведения работ.

Исходя из этого, возрастание ущерба от аварий и ЧС с разливом ННП может быть связано с недостаточной эффективностью локализации разливов и применяемых с этой целью ТС. Под показателем эффективности понимается отношение прогнозируемого ущерба в результате разлива ННП (согласно планирующим документам¹) к ущербу после завершения мероприятий по локализации разлива, что напрямую зависит от времени локализации:

¹ Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451

$$\frac{U_{\text{прогн}}}{U_{\text{реальн}}} \rightarrow \infty$$

где $U_{\text{прогн}}$ – величина прогнозируемого ущерба, руб;

$U_{\text{реальн}}$ – величина реального ущерба, руб.

Таблица 1

Технические средства для локализации разливов ННП
и применяемые при этом техника и инструменты

Наименование сооружения	Технические средства	Техника и инструменты
Ограждения для предотвращения растекания ННП	Земляные насыпи для задержания распространения разлива в направлении естественного понижения местности и ее оконтуривания)	Тяжелая дорожно-строительная и землеройная техника
	Перехватывающие траншеи (отвод и направление в естественные понижения рельефа)	Землеройная техника и шанцевый инструмент
	Амбары и ямы-ловушки	
	Барьеры из подручных материалов	Шанцевый инструмент
	Подпорные стенки	Грузовой транспорт
Сорбирующие заграждения для локализации небольших разливов ННП (до 1 т)	Сорбирующие боны	Грузовой транспорт
	Обвалования из сорбирующих материалов	Тяжелая строительная техника
Ограждения для предотвращения попадания ННП в грунтовые воды	Биополимерные мембраны	Шанцевый инструмент
	Водопроницаемые реактивные барьеры	Тяжелая дорожно-строительная и землеройная техника
	«Стена в грунте»	
	Дамбы (сифонные, сдерживающие, донного стока, переливные, ледяные)	

Мероприятия по локализации разливов ННП и применяемые ТС локализации планируют в соответствии с требованиями Постановления Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451. За пределами территории ОПО, объектов хранения ННП, инфраструктурных объектов применение вышеуказанных ТС локализации в виде инженерно-технических сооружений обоснованно при условии соблюдения времени локализации¹, а именно – 6 ч на сухопутной территории и 4 ч на поверхностных водных объектах. В то же время локализацию разливов ННП, происходящих на территории ОПО, целесообразно осуществлять в более сжатые сроки, обеспечивая тем самым уменьшение ущерба ввиду возможности прогрессирующих разрушений, негативного влияния на производственные и технологические процессы.

Цель исследования. Сокращение времени при проведении мероприятий по локализации разливов ННП путем обоснования системы локализации разливов ННП, с целью комплексного подхода к мероприятиям по локализации и применению

мобильных ТС локализации в рамках ограничений, определяемых существующими нормативно-техническими актами и экономическими условиями.

Материалы и результаты исследований. С целью повышения эффективности мероприятий по снижению ущерба от разливов ННП в условиях ограниченных финансовых ресурсов, выделяемых на мероприятия предотвращения и защиты от ЧС, возникает необходимость объединения ТС локализации разливов, а также мероприятий по их применению и распределению в единую систему. Именно в рамках системы возникает возможность оптимизации количества ТС локализации разливов и мест их размещения (сосредоточения).

Для обоснования возможности такого объединения проведем анализ понятия «Система». В научной литературе встречается множество его определений, среди которых и определение системы как классов математических моделей, и определение через понятия «элемент», «функция» и т. д. [4], наиболее распространенные определения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Определения понятия «Система»

Определение, источник	Комментарий
Система – это упорядоченное множество взаимосвязанных между собой элементов, образующих целостное единство [4]	Определение с акцентом на набор произвольных переменных. Системой может быть любая выбранная исследователем совокупность переменных, их свойств или сущностей
Система – это множество взаимосвязанных действующих элементов [4]	Определение с акцентом на понимание системы как множества связанных элементов и связи между ними
Система – есть комплекс элементов, находящихся во взаимодействии [5]	Определение системы с акцентом на взаимодействие ее элементов
Система – это организованный комплекс средств достижения целей [5]	Определение системы с акцентом на целенаправленность

Любая система является объективно существующим комплексом процессов, явлений и связей. Если система образуется определенным типом связей, то не имеет значения, какова природа этих элементов: вещи, свойства, отношения, предметные компоненты, функции, фазы процесса и т. д. [5].

Наличие системных элементов позволяет рассматривать совокупность мероприятий по локализации разливов ННП, мобильных ТС локализации, и нормативно-технических документов, формирующих ограничения, как систему локализации разливов ННП.

Предложенная система:

- состоит из трех элементов, совокупность которых обладает основными свойствами системы и направлена на решение конкретной задачи;
- обладает связью между элементами (например, изменение параметров одного из них (мобильных ТС локализации) приводит к изменению параметров другого (мероприятий по локализации разливов ННП) и наоборот);
- имеет структуру, представленную элементами различной природы;
- имеет функциональную характеристику, поскольку создается для реализации функции локализации разливов ННП.

Таким образом обоснована актуальность создания системы локализации разливов ННП, включающей вышеперечисленные элементы.

В качестве исследуемых параметров приведенной системы выступают:

- конструкция, форма, материал и размеры мобильных ТС локализации;
- координаты мест размещения мобильных ТС локализации на территории ОПО, комплектация для различных ЧС с разливом ННП, количество персонала.

В работе [6] обосновано, что для ОПО наиболее рациональным является формирование системы локализации разливов ННП с применением мобильных ТС локализации с минимальным временем разворачивания для снижения времени локализации разливов ННП. На рис. 1 представлен вариант конструкции мобильного ТС локализации, время его разворачивания может быть сокращено за счет возможности доставки на легком транспортном прицепе с последующей установкой путем вытягивания перед фронтом разлива (рис. 2).



Рис.1. Вариант конструкции мобильного средства локализации разливов ННП

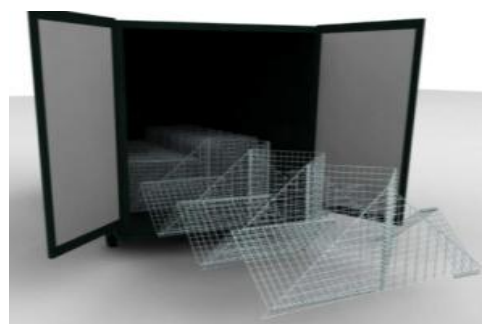


Рис. 2. Развёртывание мобильного средства локализации разливов ННП путем вытягивания из контейнера (транспортного прицепа)

Применение мобильных ТС локализации разливов ННП ограничено объективными параметрами (табл. 3).

Таблица 3

Ограничения для мобильных ТС локализации разливов ННП

Параметры секции	Значение	Основание
Длина	≤ 36 м	Автоприцеп двухосный с подъёмным кузовом:
Ширина	$\leq 1,2$ м	Габаритные размеры (Д \times Ш \times В), м – 6,7 \times 2,44 \times 0,91
Высота	$\leq 0,7$ м	Кузов (Д \times Ш \times В), м – 5,2 \times 2,1 \times 0,28
		Грузоподъемность, кг – 1798
		Количество колес – 4
Масса	≤ 60 кг	Допустимая масса, перемещаемая одним человеком – 30 кг ²
Время разворачивания	≤ 5 мин	Минимальное время разворачивания существующих моделей подпорных стенок ³

Выводы. В рамках реагирования на аварии и ЧС введено понятие «Система локализации разливов ННП», и обоснованы ее элементы, которые позволяют уменьшить ущерб от разливов.

² ГОСТ 12.2.033–78 ССБТ

³ ТУ 8026-010-35615057-03 Подпорные стенки нефтеограждающие. ЛЕССОРБ

При этом решены задачи:

- 1) на основании анализа литературных источников сформулирована проблемная ситуация и показаны пути её решения;
- 2) обоснован состав системы локализации разливов ННП, которая включает три взаимосвязанных элемента: мероприятия по локализации разливов ННП, мобильные ТС локализации, нормативно-технические документы;
- 3) обоснованы исследуемые параметры системы, которые позволяют достичь цели исследования;
- 4) для ОПО предложено мобильное ТС локализации разливов ННП и задача организации системы локализации разливов ННП с его применением.

Список литературы / References

1. Владимиров, В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия / В. А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2014. – № 1 (6). – С. 217–229.

Vladimirov, V. A. *Razlivy nefiti: prichiny, masshtaby, posledstviya* [Oil Spills: Causes, Scales, Consequences]. Civil Protection Strategy: Problems and Research. 2014, no. 1 (6), pp. 217-229. (In Russian)

2. Калайдов, А. Н. Анализ причин и следствий деструктивных событий, связанных с разливом нефти и нефтепродуктов / А. Н. Калайдов, А. Н. Неровных, Д. А. Калайдов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. – С. 119–126.

Kalaydov, A. N., Nerovnyh, A. N., Kalaydov, D. A. *Analiz prichin i sledstviy destruktivnykh sobytij, svyazannykh s razlivom nefiti i nefteproduktov* [Analysis of the causes and consequences of destructive events associated with the spill of oil and petroleum products]. Moscow : Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, 2023, pp. 119-126. (In Russian)

3. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. – ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2024. – 401 с. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (дата обращения: 15.08.2025).

Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision. *Otchot o deyatelnosti Federalnoy sluzby po ekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2023 godu* [Annual report on the activities of the Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision in 2023]. Closed Joint-Stock Company «Scientific technical center of industrial safety problems research», 2024, 401 p. – URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports (accessed: 15.08.2025). (In Russian)

4. Садовский, В. Н. Основания общей теории систем / В. Н. Садовский. – Москва : Наука, 1974. – 158 с.

Sadovskiy, V. N. *Osnovaniya obshchey teorii sistem* [Foundations of the general theory of systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 158 p. (In Russian)

5. Афанасьев, В. Г. Программно-целевое планирование и управление / В. Г. Афанасьев. – Москва : Знания, 2023. – 200 с.

Afanashev, V. G. *Programmno-tselevoe planirovanie i upravlenie* [Program-target planning and management]. Moscow, Znaniye Publ., 2023, 200 p. (In Russian)

6. К вопросу разработки мобильного средства локализации разливов нефти и нефтепродуктов / С. А. Гарелина, К. П. Латышенко, А. Ю. Скрынников // Проблемы

противодействия техногенным, биогенным, социокультурным угрозам и пути их решения. – 2023. – С. 13–19.

Garelina, S. A., Latyshenko, K. P., Skrynnikov, A. Yu. *K voprosu razrabotki mobilnogo sredstva lokalizatsii razlivov nefii i nefteproduktov* [On the issue of developing a mobile tool localization of oil and petroleum product spills]. Problems of countering technogenic, biogenic, socio-cultural threats and ways to solve them. 2023, pp. 13-19. (In Russian)

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В. В. Лебедевой
Дата поступления рукописи 02.09.2025

Svetlana Aleksandrovna Garelina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;
e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Konstantin Pavlovich Latyshenko, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department;
e-mail: kplat@mail.ru

Alexey Yuryevich Skrynnikov, Senior Lecturer of the Institute of Development
of the Ministry of Emergency Situations of Russia; e-mail: skrynnikov@yandex.ru
Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education
«The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia»
141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya st., 1A. Phone: 8(498)699-05-59

ON THE ISSUE OF SUBSTANTIATION OF THE LOCALIZATION SYSTEM SPILLS OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS

Objective. Improving the efficiency of measures to localize oil and oil products spills by substantiating the oil and oil products spill containment system, in order to take an integrated approach to measures for localization and the use of mobile technical means of containment within the limits determined by existing regulatory and technical acts and economic conditions.

Methods. The approach is based on the analysis of existing solutions to the formation of systems, the definition of their elements and the relationship between them. The combination of elements of different nature into a single system forms the interconnection of their parameters, including mobile technical means and measures with their application, which provides a combination of theoretical validity and practical applicability.

Results. Systemic features are identified and the composition of the oil and oil products spill containment system is substantiated. Based on the analysis of regulatory and technical documents, restrictions have been introduced. The list of parameters of the system under study is substantiated. The oil and petroleum products spill containment system include three interrelated elements: spill containment measures, mobile technical means of spill containment, regulatory and technical documents, the requirements of which form restrictions, and also substantiate the parameters of the system under study. In order to carry out measures to localize oil and oil product spills at hazardous production facilities, the design of a mobile technical means of spill containment is proposed, the use of which can have a significant impact on the parameters of the oil and oil products spill containment system.

Scientific novelty. It consists in an integrated approach to the study of the effectiveness of measures to localize oil and petroleum products spills by combining them with technical means and financial and regulatory restrictions into a system for localizing oil and petroleum products spills.

Practical significance. It will make it possible to determine, within the allocated funds, the rational parameters of technical means for the containment of NNP spills and the measures taken, taking into account the existing restrictions.

Key words: *oil and oil products; oil and oil products spill accident; emergency; spill containment measures; technical means of containment; oil and oil products spill containment system; damage in emergency situations.*

For citation: Garelina S. A., Latyshenko K. P., Skrynnikov A. Yu. On the issue of substantiation of the localization system spills of oil and petroleum products. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 42-48. EDN GEOQRW

УДК 622.867.32

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОРБЦИИ В РЕГЕНЕРАТИВНОМ ДЫХАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Цель. Разработка математической модели динамики хемосорбции диоксида углерода кислородсодержащим продуктом на основе надпероксида калия для увеличения времени защитного действия и снижения температуры вдыхаемой газовой смеси.

Методы. Методы математического моделирования процессов адсорбции диоксида углерода кислородсодержащим продуктом.

Результаты. Предложена математическая модель динамики хемосорбции диоксида углерода кислородсодержащим продуктом с учетом тепломассообмена в реакциях регенерации газовой дыхательной смеси.

Научная новизна. Предложенная математическая модель динамики хемосорбции диоксида углерода отличается тем, что учитывает энтальпии сорбента и потока газовой смеси, а также коэффициент теплоотдачи, отнесенный к единице объема слоя зернистого поглотителя.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут являться научным обоснованием по совершенствованию и разработке дыхательных аппаратов с оптимальными техническими параметрами.

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

Для цитирования: Плетенецкий Р. С. Математическая модель динамики сорбции в регенеративном дыхательном аппарате // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 49–57. – EDN LGDOZA

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Поглощение газообразных или растворенных веществ сорбентами (твердыми телами или жидкостями), т. е. процесс сорбции, можно разделить на следующие основные виды: адсорбцию, абсорбцию, капиллярную конденсацию и хемосорбцию. Поглощение газов твердыми веществами обычно протекает при наличии нескольких из выше названных процессов, однако один из них является главным.

В регенеративных дыхательных аппаратах с химически связанным кислородом определяющим является процесс хемосорбции, при котором адсорбтив (поглощаемое вещество, в нашем случае – диоксид углерода и вода) и хемосорбент (поглотитель – кислородсодержащий продукт) взаимодействуют химически с образованием нового химического вещества. В дыхательных аппаратах замкнутого цикла применяют сорбенты в твердой фазе, в гранулированной (зернистой) форме.

Процесс хемосорбции диоксида углерода в респираторе с химически связанным кислородом является реакцией, определяющей функционирование и конструкцию дыхательного аппарата, поэтому исследование данного процесса и разработка математической модели динамики сорбции – актуальная задача, решение которой позволит улучшить технические характеристики респиратора.

Анализ последних исследований и публикаций. Известны исследования и расчеты изолирующего дыхательного аппарата в нестационарных режимах, которые сводились к решению уравнений математических моделей численными методами [1–7]. Авторами [8] утверждается, что при разработке изолирующих дыхательных аппаратов методы математического моделирования практически не используют по причине многообразия и параллельного протекания процессов, происходящих в ходе реакции регенерации (процессы хемосорбции, нестационарные движения газовых потоков, тепловыделение и теплоотвод и др.), и неадекватности разработанных ранее математических моделей практическим результатам. Но целесообразно было бы получить математические зависимости параметров физико-химических реакций, происходящих при тепло-массообменных процессах в регенеративном патроне изолирующего респиратора.

Следует отметить, что уравнения динамики сорбции, применяющие экспериментально определяемые кинетические коэффициенты, приводят к существенным погрешностям расчета (в частности, изотермы адсорбции и кинетических коэффициентов) при условиях, отличающихся от базового эксперимента [9].

Математические модели, наиболее часто применяемые для решения практических задач динамики сорбции, представляют собой системы одномерных дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных первого или второго порядка с начальными и граничными условиями для каждой стадии цикла «адсорбция-десорбция». Значительно реже при рассмотрении процесса адсорбции используют двумерные математические модели по причине необходимости решения уравнений Навье-Стокса для расчета поля скоростей газового потока в пористой среде адсорбента [10].

Таким образом, вопрос создания адекватной математической модели регенеративных процессов в патроне изолирующего дыхательного аппарата, над которым работают многие специалисты, является актуальным, так как решение его позволит улучшать технические характеристики (время защитного действия, температура вдыхаемой газовой дыхательной смеси) изолирующего респиратора.

Цель исследования – разработка математической модели динамики хемосорбции диоксида углерода кислородсодержащим продуктом на основе надпероксида калия для улучшения технических параметров респиратора, в частности, увеличения времени защитного действия.

Результаты исследований. Уравнение полимолекулярной адсорбции, предложенное С. Брунауэром, П. Х. Эмметом и Э. Теллером (также называемое по инициалам авторов уравнение БЭТ), исходит из допущений, что адсорбент имеет однородную поверхность; взаимодействие «адсорбент – адсорбтив» сильнее, чем «адсорбтив – адсорбтив»; взаимодействие адсорбированных молекул учитывается только в направлении, перпендикулярном поверхности, и рассматривается как конденсация [11]:

$$a = \frac{a_0 C(p/p_s)}{(1 - p/p_s) [1 + (C - 1) p/p_s]}, \quad (1)$$

где a – количество поглощенного газа или пара (адсорбционная способность при давлении p), моль/м²;

a_0 – предельная адсорбционная способность, соответствующая оккупации всех активных центров поверхности (при давлении p_s), моль/м²;

p – равновесное давление, Па;

p_s – давление насыщенного пара, Па;

C – константа, связанная с чистой мольной теплотой адсорбции, 1;

p/p_s – относительное давление, 1.

Удельную поверхность адсорбента определяют, используя экспериментальную изотерму адсорбции стандартного пара на исследуемом образце, выраженную в линейной форме уравнения БЭТ:

$$\frac{p/p_s}{a(1 - p/p_s)} = \frac{1}{a_0 \times C} + \frac{C - 1}{a_0 \times C} \times (p/p_s) \quad (2)$$

Константы a_0 и C находят из наклона прямых линий $[(C-1)/a_0 \times C]$ и отрезков, отсекаемых прямыми на оси ординат $(1/a_0 \times C)$.

Удельную поверхность S , 1, определяют из емкости монослоя по формуле

$$S = a_m N_A W_m, \quad (3)$$

где N_A – число Авогардо, равное $6,02 \times 10^{23}$ моль⁻¹;

W_m – элементарная площадка (площадь, занимаемая молекулой адсорбтива в плотном слое на поверхности адсорбента), м².

С помощью уравнения БЭТ определяют удельную поверхность только макро- и мезопористых адсорбентов, а также их смешанных типов. Присутствие в адсорбенте микропор, заполняющихся объемно молекулами адсорбента, приводит к искажению полученных результатов по отношению к действительным величинам.

Адсорбция в микропорах определяется объемным заполнением адсорбционного пространства. Поэтому основным геометрическим параметром, характеризующим микропористый адсорбент, становится объем микропор, а не площадь их поверхности.

В основе теории объемного заполнения микропор лежат термодинамические закономерности, поэтому при описании адсорбционного равновесия используют такие термодинамические функции как энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.

Термическое уравнение адсорбции:

$$a = a_0 \exp [-(A/E)^n], \quad (4)$$

где A – дифференциальная максимальная мольная работа адсорбции, Дж;

E – характеристическая энергия адсорбции, Дж.

Для большого числа адсорбционных систем параметр n выражается небольшими (от 2 до 6) целыми числами в зависимости от структуры адсорбента.

Это уравнение можно представить в линейной форме

$$\lg a = \lg a_0 - (0,434/E^n) A^n \quad (5)$$

В координатных осях $\lg a - A^n$ уравнение выражается прямой линией, причем отрезок, отсекаемый прямой на оси координат, равен $\lg a_0$, угловой коэффициент прямой равен $0,434/E^n$. Если показатель степени n известен, то из графика,

выражающего линейное уравнение, легко определить предельную величину адсорбции a_0 и характеристическую энергию адсорбции E .

В этом случае для каждой экспериментальной точки изотермы (a, p) вычисляют соответствующее значение дифференциальной мольной работы адсорбции A , Дж, по формуле [13]

$$A = - DG = RT \ln (p_s/p), \quad (6)$$

где G – энергия Гиббса, Дж;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,34 \cdot 10^3$ Дж·моль⁻¹;

T – температура, К.

Дифференциальная максимальная мольная работа адсорбции равна со знаком минус изменению энергии адсорбции Гиббса DG , Дж.

Если условие инвариантности характеристического уравнения соблюдается, то дифференциальная мольная энтропия адсорбции, Дж/(моль·К), выражается уравнением

$$DS = a \left(\frac{\partial A}{\partial \ln a} \right)_T < 0, \quad (7)$$

где α – термический коэффициент предельной сорбции, 1.

Адсорбция всегда сопровождается выделением тепла. Различают дифференциальную и интегральную теплоту адсорбции. Первая характеризует тепловой эффект в интервале изменения степени заполнения адсорбционного пространства, стремящемся к нулю. Она отнесена к единице сорбирующегося вещества и измеряется в Дж/моль. Нижним пределом дифференциальной теплоты сорбции является теплота конденсации.

Интегрируя зависимость теплоты адсорбции от заполнения, получим интегральную теплоту адсорбции, измеряемую в Дж.

Данные о теплоте адсорбции могут быть получены непосредственно при анализе сетки экспериментальных изотерм.

В условиях инвариантности общее выражение для дифференциальной мольной теплоты адсорбции Q , Дж, имеет вид

$$Q = I + A - aT \left(\frac{\partial A}{\partial \ln a} \right)_T, \quad (8)$$

где I – теплота конденсации, Дж.

Из уравнения (6) определим производную

$$\frac{\partial A}{\partial \ln a} \frac{\partial}{\partial T} = -T \frac{\partial}{\partial \ln a} \frac{\partial \ln h}{\partial T}, \quad (9)$$

где $h = P/P_s$ – равновесное относительное давление.

Тогда

$$Q = I - RT \ln h + aT^2 \frac{\partial}{\partial \ln a} \frac{\partial \ln h}{\partial T} \quad (10)$$

В результате дифференцирования уравнения (10) получим:

$$Q = l + E \frac{\partial \ln a_0}{\partial \ln a} + (aT/n) \frac{\partial \ln a_0}{\partial \ln a} \quad (11)$$

Аналогичным образом получаем уравнение для дифференциальной мольной энтропии адсорбции ΔS , Дж/(моль·К)

$$\Delta S = - \frac{aE}{n} \frac{\partial \ln a_0}{\partial \ln a} \quad (12)$$

Динамику адсорбции можно описать системой уравнений материального и теплового балансов, кинетики адсорбции и теплопередачи, а также уравнением изотермы адсорбции.

Уравнение материального баланса имеет вид:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial a}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (13)$$

где D – коэффициент продольной диффузии, м²/с;

w – скорость перемещения потока через элемент пористого тела с толщиной dx , м/с;

∂t – время, за которое вещество заполняет элементарный объем, с;

c – концентрация адсорбтива, моль.

Уравнение теплового баланса для элементарного объема гранулированного слоя записывают аналогично уравнению материального баланса:

$$h_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = - h_g \frac{\partial T_g}{\partial t} - w h_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - \frac{\partial (Qa)}{\partial t}, \quad (14)$$

где h_a , h_g – теплоемкость адсорбента и газа, Дж/К;

T_a , T_g – температура адсорбента и газа, К.

Кинетику нестационарного конвективного (внешнего) массообмена описывают следующим уравнением:

$$\frac{da}{dt} = b_e (C - C^*), \quad (15)$$

где a – величина адсорбции, моль/м²;

t – время, с;

b_e – коэффициент внешнего массообмена, моль/(м²·с);

C – текущая концентрация адсорбтива в потоке, моль;

C^* – концентрация адсорбтива на поверхности раздела фаз, равновесная текущей величине адсорбции, моль.

Теплообмен между твердым телом и потоком газовой смеси лимитируется или внешней теплоотдачей, или теплопроводностью гранул сорбента (внутренняя задача), или определяется совместно этими двумя механизмами.

Для теплотехнической задачи уравнение передачи тепла можно записать следующим образом:

$$h_a \frac{\partial T}{\partial t} = K_z (T_z - T_a) , \quad (16)$$

где K_z – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³ · К);

T_z – текущая температура потока, К;

T_a – текущая температура гранул поглотителя, К.

Для теплоотдачи, включающей тепловые эффекты адсорбции, изменение температуры адсорбента описывается уравнением:

$$h_a \frac{\partial T}{\partial t} = K_z (T_z - T_a) + Q \frac{\partial a}{\partial t} . \quad (17)$$

Дифференциальные уравнения массо- и теплообмена решают с учетом начальных и граничных условий.

Динамика сорбционных процессов описывает пространственно-временные распределения компонентов между фазами системы (одна из которых – твердая), возникающие при перемещении этих фаз относительно друг друга.

Исследование адсорбционных процессов даже с учетом допущений представляет определенные трудности. Поэтому обычно рассматривают постепенно усложняющийся ряд моделей динамики сорбции: динамика равновесной изотермической адсорбции, неравновесной изотермической адсорбции, неадиабатической адсорбции.

Математические модели динамики равновесной изотермической адсорбции и неравновесной изотермической адсорбции основаны на предположении о пренебрежимо малой величине теплового эффекта. Это допущение справедливо при небольших концентрациях адсорбтива в потоке. Однако при повышенных его концентрациях тепловой эффект может оказать существенное влияние на протекание адсорбционного процесса и нуждается в учете.

Учет тепловыделений и теплообмена необходим также в тех случаях, когда температуры потока газовой смеси и гранул сорбента различны. Рассмотрим динамику адиабатической адсорбции.

Основные уравнения модели могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial x} &= 0 \\ H \frac{\partial T}{\partial t} + w h_z \frac{\partial T}{\partial x} + Q \frac{\partial a}{\partial t} &= 0 \\ a^* &= f(c, T) \end{aligned} \quad \begin{matrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{b} \end{matrix} , \quad (18)$$

где H – суммарная теплоемкость адсорбента и адсорбата, Дж/К;

a^* – величина адсорбции, равновесная концентрации адсорбата в поступающем потоке, моль/м².

Теория равновесной адиабатической адсорбции позволяет сделать некоторые важные практические выводы.

Время защитного действия адсорбента не зависит от его начальной температуры. Следовательно, охлаждение зернистого слоя после термической регенерации проводить не обязательно.

В качестве примера работы дыхательного аппарата (респиратора), в котором учитывают кинетику массотеплообменных процессов, рассмотрим процесс адсорбции и десорбции паров воды в неподвижных слоях адсорбентов (силикагель и твердый носитель, пропитанный раствором хлорида лития).

Тогда математическая модель адиабатической адсорбции включает следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_a}{dt} + \frac{dT_c}{dt} + w \frac{dT_c}{dx} &= 0 \\
 \frac{dT_a}{dt} &= b_z (C - C^*) \\
 \frac{dI_a}{dt} + \frac{dI}{dt} + w \frac{dI}{dx} &= 0 \\
 \frac{dI_a}{dt} &= K(T_c - T_a) + b_z(C - C^*)Q \\
 C^* &= f(a, T_a)
 \end{aligned} \tag{19}$$

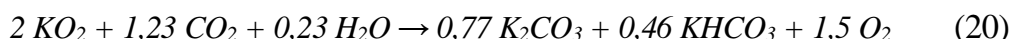
где I_a – энтальпия адсорбента, Дж/моль;

I – энтальпия потока газовой смеси, Дж/моль;

K – коэффициент теплоотдачи, отнесенный к единице объема гранулированного слоя сорбента, Вт/(м³·К);

C^* – концентрация адсорбтива на поверхности раздела фаз, равновесная текущей величине адсорбции, моль.

По данным И. И. Вольнова [13] оптимальные условия протекания регенеративного процесса достигаются, когда реагирующие вещества находятся в соотношениях, приведенных в следующем уравнении:



Из этого уравнения следует, что при оптимальном протекании регенеративных процессов примерно 20 % водяных паров должно поступить к регенеративному продукту, а 80 % – задержаться в теплообменнике. Следовательно, в процессе одного выдоха теплообменник должен задержать 0,04 г водяного пара (при условии, что влагосодержание одного выдоха составляет в среднем 0,05 г). Это следует из температурно-влажностных параметров выдыхаемого человеком воздуха: $t = 36^\circ\text{C}$, относительная влажность $j \approx 100\%$, влагосодержание воздуха при давлении 101 кПа равно 38,8 г/кг.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Для разработки новых и совершенствования уже созданных дыхательных аппаратов важно правильное (точное) понимание регенеративных процессов, протекающих в данных аппаратах. Разработанная математическая модель данных процессов позволяет более обоснованно их описывать благодаря учету таких параметров как энтальпия, теплоемкость и коэффициент теплоотдачи.

Список литературы / References

1. Чжу, Д. Численное решение обратной задачи для модели динамики сорбции методом Ньютона-Канторовича / Д. Чжу // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. – 2025. – № 2. – С. 83–90. – DOI 10.55959/MSU/0137-0782-15-2025-49-2-83-90 – EDN PFATIG

Zhu, D. *Chislennoe reshenie obratnoy zadachi dlya modeli dinamiki sorbcii metodom Nyutona-Kantorovicha* [Numerical solution of the inverse problem for a model of sorption dynamics by the Newton–Kantorovich method]. Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics, 2025, no. 2, pp. 83-90. DOI 10.55959/MSU/0137-0782-15-2025-49-2-83-90. EDN PFATIG (In Russian)

2. Denisov, A. M., Lamos, H. An inverse problem for a nonlinear mathematical model of sorption dynamics with mixed-diffusional kinetics // J. Inverse and Ill Posed Problems. – 1996. – Vol. 4, N 3. – P. 191–202. (In English)

3. Denisov, A. M., Zhu, D. Iterative Numerical Methods for Solving the Problem of Determining the Coefficient in the Sorption Dynamics Model. Comput. Math. and Math. Phys. 64, 2696–2704 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0965542524701501> (In English)

4. Denisov, A. M., Zhu Dongqin Existence of Two Solutions of the Inverse Problem for a Mathematical Model of Sorption Dynamics. Diff Equat 59, 1435–1439 (2023). <https://doi.org/10.1134/S00122661230100105> (In English)

5. Денисов, А. М. Обратная задача для математической модели динамики сорбции с переменным кинетическим коэффициентом / А. М. Денисов, Д. Чжу // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. – 2022. – № 4. – С. 5-13. – EDN KXVOKI.

Denisov, A. M., Zhu, D. [Inverse problem for a mathematical model of sorption dynamics with a variable kinetic coefficient]. Moscow University Journal. Series 15. Computational Mathematics and Cybernetics, 2022, no. 4, pp. 5-13. – EDN KXVOKI. (In Russian)

6. Мосин, О. В. О процессе адсорбции на твердых адсорбентах / О. В. Мосин // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2014. – № 9 (153). – С. 38–42. – EDN TWKENL.

Mosin, O. V. *O processe adsorbicii na tverdykh adsorbentakh*. Plumbing, Heating, Air-Conditioning, 2014, no. 9 (153), pp. 38-42. – EDN TWKENL (In Russian)

7. Kinetic Simulation of Adsorption Isotherms / S. O. Travin, A. V. Roshchin, O. B. Gromov, D. V. Utrobin // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2019. – Vol. 13, No. 6. – P. 975–985. – DOI 10.1134/S1990793119060113. – EDN GBGVAO (In English)

8. Дворецкий, С. И. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 280100 «Безопасность жизнедеятельности» / С. И. Дворецкий, С. Б. Путин, В. П. Таров. – Москва : Машиностроение, 2008. – 188 с. – ISBN 978-5-94275-440-2. – EDN QMGHFN.

Dvoretzkiy, S. I., Putin, S. B., Tarov, V. P. *Izoliruyushchiye dykhatelnyye apparaty i osnovy ikh proyektirovaniya: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po napravleniyu 280100 «Bezopasnost zhiznedeyatelnosti»* [Isolating breathing apparatus and the basics of their design: a textbook for university students studying in the direction 280100 «Life Safety»]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008, 188 p. ISBN 978-5-94275-440-2. EDN QMGHFN (In Russian)

9. Самойлов, Н. А. Анализ моделей динамики адсорбции / Н. А. Самойлов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2009. – № 2 (74). – С. 92–97. – EDN KKORIP.

Samoilov, N. A. [Analysis of adsorption dynamics models]. Oil and Gas Studies, 2009, no. 2 (74), pp. 92-97. EDN KKORIP (In Russian)

10. Постановка задачи оптимизации циклических адсорбционных процессов разделения газовых смесей в условиях неопределенности и методы ее решения / С. И. Дворецкий [и др.] // Инженерные технологии. – 2023. – № 1 (1). – С. 35–44. – EDN FKYUFC.

Dvoretzky, S. I., Dvoretzky, D. S., Akulinin, E. I., Usachev, V. B., Belyaev, V.A. *Postanovka zadachi optimizatsii tsiklicheskih adsorbtsionnykh protsessov razdeleniya gazovykh smesey v usloviyakh neopredelennosti i metody yeye resheniya* [The problem of pressure swing adsorption gas mixtures separation processes optimization under uncertainty]. Engineering Technologies, 2023, no. 1 (1), pp. 35-44. EDN FKYUFC (In Russian)

11. Петухова, Г. А. Описание полимолекулярной адсорбции на энергетически неоднородных поверхностях / Г. А. Петухова, В. В. Гурьянов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 275–289. – EDN OXXPGX.

Petukhova, G. A., Guryanov, V. V. [Description of polymolecular adsorption on energetically heterogeneous surfaces]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2012, no. 48 (3), pp. 275-289. EDN OXXPGX (In Russian)

12. Толмачев, А. М. Адсорбция газов, паров и растворов / А. М. Толмачев. – Москва : ООО «Издательская группа «Граница», 2012. – 240 с.

Tolmachev, A. M. *Adsorbciya gazov, parov i rastvorov*. Moscow: Granica Ltd Publ., 2012, 240 p.

13. Вольнов И. И. Перекисные соединения щелочных металлов / И.И. Вольнов. – Москва : Наука, 1980. – 159 с.

Volnov, I. I. *Perekisnye soedineniya shchelochnykh metallov*. Moscow: Nauka Publ., 1980, 159 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 17.10.2025

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, Senior Researcher; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru
Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-45

MATHEMATICAL MODEL OF SORPTION DYNAMICS IN A REGENERATIVE BREATHING APPARATUS

Purpose. Development of a mathematical model of the dynamics of chemisorption of carbon dioxide with an oxygen-containing product based on potassium superoxide to improve the technical parameters of the respirator, in particular, to increase the protective action time.

Methods. Analytical methods for investigation of adsorption processes of regenerative products.

Results. Mathematical model of dynamics of chemisorption of carbon dioxide with oxygen-containing product is proposed.

Scientific novelty. Proposed mathematical model of dynamics of carbon dioxide chemisorption differs by taking into account enthalpy of sorbent and flow of gas-air mixture, as well as heat transfer coefficient related to unit volume of granular absorber layer.

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

Keywords: *breathing apparatus; personal respiratory protection equipment; respirator; regeneration; sorption; chemisorption; regenerative product; oxygen-containing product.*

For citation: Pletenetskiy R. S. Mathematical model of sorption dynamics in a regenerative breathing apparatus. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 49-57. EDN LGDOZA

УДК 622.281.42:666.971.16

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: astra-jasmin@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

ВЛИЯНИЕ МЕТАКАОЛИНА НА СВОЙСТВА БЫСТРОТВЕРДЕЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

Цель. Экспериментальная оценка влияния содержания метакАОлина на сроки схватывания и прочность на сжатие материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек.

Методы. Стандартные методы определения сроков схватывания цементно-шлакового раствора и предела прочности при сжатии отвержденного материала.

Результаты. Исследовано влияние высокоактивной аморфной добавки метакАОлина ВМК-45 в диапазоне концентраций 5...15 масс. % на время начала и окончания схватывания цементно-шлакового раствора, а также на предел прочности при сжатии отвержденного материала. В качестве вяжущего использован портландцемент без минеральных добавок ЦЕМ I 42,5Н в сочетании с доменным отвальным шлаком Донецкого металлургического завода. Приведен анализ экспериментальных данных, обосновывающих наиболее рациональную массовую концентрацию метакАОлина в компонентном составе быстротвердеющего материала.

Научная новизна. Установлено процентное содержание метакАОлина в цементно-шлаковом составе, позволяющее получить быстротвердеющий материал с необходимыми реологическими и высокими прочностными характеристиками.

Практическая значимость. Результаты исследований имеют важное практическое значение не только для создания быстротвердеющего материала с ранним набором механической прочности для возведения взрывоустойчивых изолирующих сооружений в угольных шахтах, но и в аспекте повышения уровня экологической безопасности за счет использования промышленных отходов – доменного отвального металлургического шлака.

Ключевые слова: высокоактивная аморфная добавка; водотвердое отношение; цементно-шлаковая смесь; механическая прочность; подвижность цементно-шлакового раствора.

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

Постановка проблемы. В условиях чрезвычайных ситуаций одним из важных факторов обеспечения безопасного ведения работ по изоляции аварийных участков горных выработок является время возведения взрывоустойчивой перемычки. Чем быстрее будут проведены работы по возведению изолирующего сооружения, тем раньше конструкция обеспечит устойчивость к динамическим воздействиям. Традиционным вяжущим для возведения изолирующих перемычек считают гипс. Вместе с тем короткие сроки схватывания, низкая водостойкость и повышенная ползучесть в виде пластических (остаточных) деформаций под нагрузкой, ограничивают применение гипсового вяжущего в обводненных условиях подземных выработок. Для цементных вяжущих, например, портландцементов, характерны более удлиненные сроки схватывания и твердения, чем для гипсового. Однако эта группа вяжущих обладает недостаточным временем набора ранней прочности.

Альтернативным решением актуальной задачи по применяемому вяжущему для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек является использование химических добавок с целью создания композиционных быстротвердеющих материалов, сочетающих в себе преимущества гипса и цемента.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время активно проводятся исследования по созданию вяжущих, позволяющих ускорить набор прочности строительных смесей в 2 раза [1–3]. Реологические и прочностные свойства таких материалов обусловлены рациональным подбором компонентного состава вяжущей системы с активными модификаторами [4–7]. В настоящее время подробно рассмотрена эффективность применения высокоактивного метакеолина в сочетании с суперпластификатором в качестве модификатора строительных смесей [8–10]. Результаты исследований [11] подтвердили возможность варьировать структуру и морфологию вяжущего композита, изменять его качественный фазовый и количественный составы введением в цементные смеси тонкодисперсного метакеолина.

Однако влияние метакеолина на свойства быстротвердеющих материалов для возведения взрывоустойчивых изолирующих перемычек в угольных шахтах изучено недостаточно. Поэтому исследования по выбору наиболее рационального массового содержания метакеолина, при котором обеспечивается необходимый баланс между реологическими свойствами и ранней прочностью отвержденного материала, представляют актуальную научную задачу.

Цель работы – оценка влияния содержания метакеолина на сроки схватывания и прочность на сжатие цементно-шлакового материала для возведения шахтных взрывоустойчивых перемычек.

Методика эксперимента. Для экспериментальных исследований использовали следующие материалы:

- портландцемент марки 500 без минеральных добавок ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «ДОНЦЕМЕНТ+»,
- доменный отвальный шлак Донецкого металлургического завода,
- ускоритель процесса раннего твердения,
- суперпластификатор,
- метакеолин ВМК-45.

Сроки схватывания и предел прочности при сжатии образцов определяли в соответствии с требованиями действующих стандартов. Для сравнительной оценки эффективности исследуемых составов использовали контрольный образец – без добавки метакеолина.

Результаты исследований. В настоящей работе объектом исследования выбраны цементно-шлаковые составы с различным массовым содержанием метакеолина при замещении им портландцемента на 5 масс. % (состав № 1), 10 масс. % (состав № 2) и 15 масс. % (состав № 3) от массы цемента.

Верхний концентрационный предел метакеолина в составах при замене на портландцемент соответствовал «Рекомендациям по использованию ВМК» завода-изготовителя. Согласно документу, увеличение добавки свыше 15 % не ведет к существенному улучшению свойств затвердевшего материала и является экономически нецелесообразным. Замещение портландцемента на метакеолин ниже 5 масс. % считали также нецелесообразным ввиду незначительного влияния на повышение предела прочности при сжатии в течение ранних сроков твердения.

В исследуемые составы дополнительно вводили целевые добавки – суперпластификатор для снижения водопотребности, а также ускоритель процессов схватывания и твердения в оптимальных процентных соотношениях, предварительно определенных экспериментальным путем.

Анализ экспериментальных данных показал, что при увеличении содержания мелкодисперсного метакеолина от 0 до 15 масс. % время начала схватывания цементно-шлакового раствора с пластифицирующей добавкой и ускорителем твердения сокращается в 1,5 раза (см. рис.). Определено, что время окончания схватывания цементно-шлакового раствора также снижается в 1,7 раза с увеличением содержания метакеолина (см. рис.).

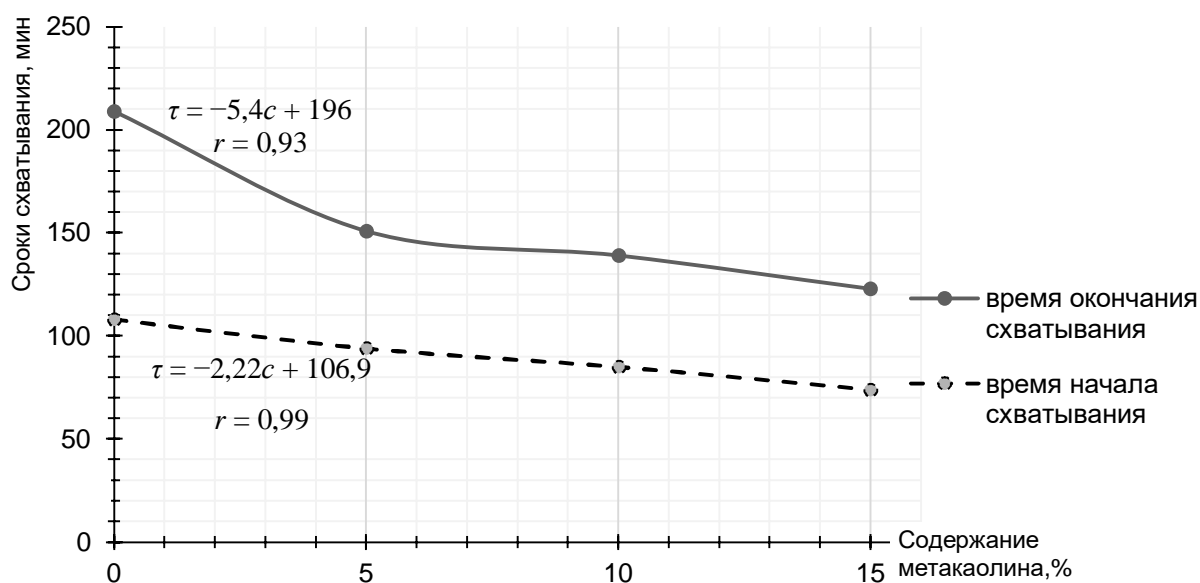


Рис. Динамика изменения сроков схватывания цементно-шлакового раствора от содержания метакеолина в смеси

При увеличении содержания с 5 до 15 масс. % мелкодисперсного метакеолина наблюдается равномерное увеличение водопотребности – водотвердое отношение (В/Т) увеличивается с 0,26 до 0,33 единиц (табл.). Увеличение водотвердого отношения объясняется высокой удельной поверхностью метакеолина. При затворении сухой смеси на поверхности частиц метакеолина происходит процесс молекулярной адсорбции воды, что увеличивает ее количество, необходимое для достижения достаточной пластичности раствора.

Экспериментальные данные позволяют утверждать, что введение метакеолина, как активной добавки в цементно-шлаковую смесь, способствует сокращению сроков схватывания, при этом ускоряя процесс как начала, так и окончания схватывания.

Для всех исследуемых составов после 4 ч затворения смеси водой наступает индукционный период, сущность которого в теории гидратации неорганических вяжущих веществ является одной из сложных проблем. Во время индукционного периода последовательно происходит торможение процессов гидратации цемента, затем его взаимодействие с водой, которое сопровождается резким гидратным фазообразованием и ростом структурной прочности материала [12, 13].

Таблица

Результаты экспериментов

Показатель		Цементно-шлаковые составы			
		Контрольный	№ 1	№ 2	№ 3
Содержание метакеолина в составе, масс. %		0	5	10	15
Предел прочности при сжатии, МПа	4 ч	1,4	1,7	1,6	0,4
	5 ч	3,6	3,8	3,6	1,7
	6 ч	5,8	6,7	6,6	3,0
	24 ч	24,8	25,2	21,2	20,0
Сроки схватывания, мин	начало	108	94	85	74
	окончание	209	151	139	123
В/Т		0,26	0,26	0,29	0,33

Совместная добавка суперпластификатора и метакеолина положительно влияет на предел прочности при сжатии в возрасте 5 ч, 6 ч и 24 ч твердения материала (табл.). Однако с увеличением процентного содержания в составах метакеолина от 5 до 15 масс. % эффект повышения прочности со временем твердения от 4 ч до 24 ч снижается.

Прочность состава с максимальным процентным содержанием метакеолина (состав № 3) почти в 2–3,5 раза ниже прочности при сжатии образцов контрольного состава после 4 ч, 5 ч и 6 ч твердения. Ранняя прочность при сжатии в возрасте 4 ч, 5 ч и 6 ч твердения для составов № 1 и № 2 практически одинакова и выше аналогичного показателя контрольного образца. При этом прочность состава № 1 в возрасте 24 ч твердения превышает этот показатель для контрольного состава.

Выводы. Экспериментальные данные показали, что введение высокоактивного метакеолина в цементно-шлаковый раствор изменяет его реологические свойства и существенно влияет на прочность отвержденного материала. Для цементно-шлакового состава при замещении портландцемента метакеолитом в диапазоне концентраций 5...15 масс. % установлено наиболее рациональное его содержание 5...10 масс. %.

Применение оптимальной дозировки метакеолина в сочетании с эффективным суперпластификатором и ускорителем твердения позволит получать быстротвердеющие материалы с требуемыми реологическими и высокими прочностными характеристиками для возведения взрывоустойчивых изолирующих перемычек в шахтах.

Список литературы / References

1. Пештибай, Г. И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г. И. Пештибай // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – № 1. – С. 47–52.

Peftibay, G. I. [Low-compound rapid-setting cement mixtures for explosion-proof stoppings installation]. Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety, 2018, no. 1, pp. 47-52. (In Russian)

2. Пефтибай, Г. И. Быстротвердеющие зольно-цементные и шлакоцементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г. И. Пефтибай, Н. А. Галухин, Е. В. Курбацкий // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 4 (54). – С. 70–81. – EDN ZRTIAZ

Peftibay, G. I., Galukhin, N. A., Kurbatskiy, Ye. V. [Rapid-hardening ash-cement and slag-cement mixtures for erection of explosion-stable stoppings]. Scientific Bulletin of NIIGD «Respirator», 2017, no. 4 (54), pp. 70-81. EDN ZRTIAZ (In Russian)

3. Современные технологии ускорения набора прочности бетона / Е. А. Лангнер, А. А. Шиховцов, А. А. Царев, В. В. Петросян // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN520.pdf>.

Langner, E. A., Shikhovtsov, A. A., Tsarev, A. A., Petrosyan, V. V. [Modern technologies for accelerating concrete strength development]. The Eurasian Scientific Journal, 2020, no. 5 (12). URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN520.pdf> (In Russian)

4. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий / Л. Х. Загороднюк, М. Ю. Елистраткин, Д. С. Подгорный, Ал Мамури Саад Кхалил Шадид // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18, № 4 (80). – С. 428–439. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439

Zagorodnuk, L. Kh., Elistratkin, M. Yu., Podgornyi, D. S., Al Mamuri, S. Kh. Sh. [Composite binders for 3D additive technologies]. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 2021, vol. 18, no. 4 (80), pp. 428-439. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439 (In Russian)

5. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand / L. Zagorodnyuk, D. Sumskey, V. Lesovik, R. Fediuk // Construction and Building Materials. – 2020. – N. 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440. (In English)

6. Zagorodnyuk, L. K. Study of the hydration processes of modified binders by infrared spectroscopy / L. K. Zagorodnyuk, D. A. Sumskey // Materials Science Forum. – 2019. – P. 49–54. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.49. – EDN ULDDPU (In English)

7. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology / E. Secieru, S. Fataei, C. Schröfl, V. Mechtcherine // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 144. – P. 451–461. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.199. (In English)

8. Применение метакеолина в сухих строительных смесях / А. П. Пустовгар, А. Ф. Бурьянов, Е. В. Васильев // Строительные материалы. – 2010. – № 10. – С. 78–81. – EDN LTKCEM

Pustovgar, A. P., Buryanov, A. F., Vasiliev, E. V. [Application of metakaolin in dry building mixtures]. Construction Materials, 2010, no. 10, pp. 78-81. EDN LTKCEM (In Russian)

9. An Experimental Study of the Concrete Using Polymer and Metakaolin as Additives / A. Al Menhosh, Ya. Wang, Yu. Wang // Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. – Las Vegas, USA; August 7–11, 2016. – SCMT4. DOI: 10.18552/2016/SCMT4S266. (In English)

10. Морозов, Н. М. Влияние метакеолина на свойства цементных систем / Н. М. Морозов, И. В. Боровских // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3 (33). – С. 127–132.

Morozov, N. M., Borovskikh, I. V. *Vliyaniye metakaolina na svoystva tsementnykh sistem* [The influence of metakaolin on the properties of cement systems]. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering, 2015, no. 3 (33), pp. 127-132. (In Russian)

11. Об опыте применения метакеолина в качестве структурирующей добавки в цементных композитах / Г. И. Яковлев [и др.] // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2 (81). – С. 58–68.

Yakovlev, G. I., Pervushin, G. N., Pudov, I. A., Polyanskikh, I. S., Saidova, Z. S. [On the experience of using metakaolin as a structuring additive in cement composites]. *Vestnik VSGUTU*, 2021, no. 2 (81), pp. 58-68 (In Russian)

12. Влияние неорганических электролитов на ускорение схватывания портландцементных систем / Ш. М. Рахимбаев, Т. В. Аниканова, А. В. Прокопишина, А. С. Погромский // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2020. – № 55 (81). – С. 34–38.

Rakhimbaev, Sh. M., Anikanova, T. V., Prokopishina, A. V., Pogromskiy, A. S. [The effect of inorganic electrolytes on the acceleration of portland cement systems setting]. *Bulletin of St PbSIT(TU)*, 2020, no. 55 (81), pp. 34-38. (In Russian)

13. 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)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 06.10.2025

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, Researcher; e-mail: astra-jasmin@mail.ru

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

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

INFLUENCE OF METAKAOLIN ON THE PROPERTIES OF FAST-SETTING MATERIAL EXPLOSIVE-RESISTANT SEALINGS

Purpose. Experimental evaluation of the effect of metakaolin addition on the setting time and compressive strength of cement-slag material for the construction of mine explosion-resistant lintels.

Methods. Standard methods for determining the setting time of cement-slag mortar and the compressive strength of the cured material.

Results. The effect of a highly active amorphous additive, VMK-45, at concentrations of 5...15 mass. %, on the start and end times of setting of a cement-slag mortar, as well as on the compressive strength of the cured material, has been studied. Portland cement CEM I 42.5N was used as a binder, combined with blast furnace slag from the Donetsk Metallurgical Plant. The article provides an analysis of experimental data that substantiates the most rational mass concentration of metakaolin in the component composition of the fast-hardening material.

Scientific novelty. The most rational content of metakaolin in the cement-slag composition has been determined, which allows for the production of a fast-hardening material with the necessary rheological and high strength characteristics.

Practical significance. The research results are of great practical importance not only for creating a fast-hardening material with early mechanical strength for the construction of explosion-resistant isolation structures in coal mines, but also for improving environmental safety by using industrial waste, such as blast furnace slag.

Keywords: *highly active amorphous additive; water-solid ratio; cement-slag mixture; mechanical strength; and fluidity of cement-slag mortar.*

For citation: 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

УДК 622.831.325.3:[622.411.33:622.817.47]

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

ГБУ «Макеевский научно-исследовательский институт

по безопасности работ в горной промышленности»

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕГАЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ

Цель. Оценка эффективности дегазации подрабатываемых угольных пластов и пластов-спутников скважинами для разработки требований безопасного функционирования средств дегазации.

Методика. Анализ и обобщение результатов теоретических и натурных исследований эффективности дегазации угольных шахт Донбасса.

Результаты. Получены зависимости эффективности дегазации: от создаваемого разрежения в скважинах при различных их диаметрах, количества одновременно работающих дегазационных скважин и газовыделения из дегазуемых пластов-спутников.

Научная новизна. Установлена зависимость эффективности дегазации: от разрежения в дегазационных скважинах и газовыделения из дегазуемых пластов-спутников.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят повысить эффективность дегазации подрабатываемых пластов-спутников дегазационными скважинами в среднем на 30–35 %, а также безопасность ведения горных работ угольных шахт.

Ключевые слова: *столбовая система разработки; подрабатываемый угольный пласт; метановыделение; пласт-спутник; дегазационная скважина; эффективность дегазации; каптаж метана.*

Для цитирования: *Ашихмин В. Д., Тишин Р. А., Мавроди А. В. Оценка эффективности дегазации в условиях столбовой системы разработки // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 64–76. – EDN BAPWLT*

Постановка задачи. Выемка угольного пласта сопровождается сдвижением горных пород, которое особенно велико над выработанным пространством. При сдвижении горных пород выделяют три качественно различные зоны: беспорядочного обрушения, плавного оседания с разрывом сплошности пород и плавного прогиба без разрыва сплошности [1–3].

Различие физических свойств породных слоёв в процессе оседания приводит к образованию между ними различных пустот и полостей. Поэтому проницаемость в плоскости надрабатываемого пласта-спутника, разгруженного от горного давления, на порядок больше проницаемости перпендикулярно напластованию.

В настоящее время средняя эффективность дегазации сближенных пластов составляет (по данным шахт) около 55 %, однако такие результаты являются завышенными. Следовательно, для повышения безопасности ведения горных работ на угольных шахтах Донбасса необходимо провести исследования об эффективности дегазации подрабатываемых угольных пластов и пластов-спутников скважинами.

Анализ последних исследований. При столбовых системах разработки и бурении дегазационных скважин из выработок, поддерживаемых позади очистного забоя, часть скважин, находящаяся за пределами обсадных труб (глубина

герметизации), на всём протяжении тесно связана с нарушенным горным массивом. Метан поступает в дегазационную скважину по той части скважины, которая не разрушилась при смещении горных пород. Чем ближе к устью скважины, тем менее интенсивно происходит каптаж метана.

При бурении скважин из погашаемой выработки навстречу очистному забою они непосредственно связаны с пластом-спутником только в начальный момент их работы. По мере подвигания очистного забоя скважины разрушаются по плоскости смещения пород, длина их ненарушенной части сокращается и, следовательно, они сохраняют связь с пластом-спутником только через трещины и пустоты в нарушенном горном массиве.

Таким образом, в условиях столбовых систем разработки нельзя рассматривать работу дегазационных скважин только в плоскости дегазируемого пласта. Согласно общепринятой теории, метан движется по трещинам и каналам в подработанном горном массиве от сближенных пластов к выработанному пространству. При этом объём метана, выделившегося из пластов-спутников, зависит от сорбционных свойств угля, его газоносности, температуры и газового давления, устанавливающегося вокруг данного пласта в процессе его дегазации [4–6].

Если принять, что в условиях одного выемочного участка сорбционные свойства, газоносность и температура угля всех сближенных пластов одинакова, то давление газа в них будет возрастать с удалением от разрабатываемого угольного пласта. Следовательно, с удалением пласта-спутника степень его естественной дегазации будет уменьшаться, что и учитывается при прогнозе метановыделения [7–9].

Если в междупластья пробурить дегазационные скважины, то сопротивление путей движения метана снизится, уменьшится давление газа в пустотах, окружающих пласт-спутник, и степень дегазации его возрастет. Создание вакуума в скважинах эквивалентно уменьшению их аэродинамического сопротивления, поэтому увеличение вакуума должно сопровождаться дополнительным метановыделением [10].

Учитывая, что скважины снижают общее аэродинамическое сопротивление междупластья, дегазация должна увеличивать полноту каптажа метана не только из дегазируемых пластов, но и ближайших прилегающих пластов, а также подработанного массива. Увеличение метановыделения из сближенных пластов при их дегазации доказано во многих экспериментах. Однако качественная зависимость коэффициента степени увеличения метановыделения и, соответственно, увеличение эффективности дегазации от горнотехнических условий нуждается в исследовании.

Цель – оценка эффективности дегазации подрабатываемых угольных пластов и пластов-спутников скважинами, для разработки требований безопасного функционирования средств дегазации.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи была проанализирована зависимость коэффициента эффективности дегазации на 55 лавах шахт Донбасса от влияющих на него горнотехнических факторов (табл. 1):

- диаметра дегазационной скважины (d);
- количества дегазационных скважин (n_c);
- относительной высоты конца ненарушенной части скважин (h/m);
- метановыделения из дегазируемых пластов-спутников (I_{dc});
- разрежения в дегазационных скважинах (B).

Таблица 1

Основные показатели горнотехнических условий
дегазируемых участков шахт Донбасса

Шахта, лава, пласт	Кол-во спутников	Символ пласта	Мощность спутника, м	Расстояние от разрабатываемого пласта, м
«Бутовская», восточные лавы № 5, 6, 7, 10, пл. n_1	2	n_1^0	0,15	8,0–11,0
		n_1^1	0,40	16,0–18,9
им. С. М. Кирова, панельные лавы № 6, 7, западные лавы № 7, 9, пл. l_7	3	b/h	0,15	10,1–10,9
		l_8^1	0,90	12,1–13,5
		m_2	0,40	40,0–42,0
им. В. М. Бажанова, восточная лава панель № 16, западная коренная лава гор. 1012 м, пл. m_3	2	m_4^0	0,20	32,5–34,1
		m_4^1	0,50	48,0–55,0
«Чайкино», западные лавы № 16–19, пл. m_3	4	m_4^0	0,30	15,7–18,0
		m_4^1	0,52	36,7–37,8
		m_4^2	0,30	44,0–45,0
		m_5^1	0,60	59,0–60,5
I-I «бис», восточные лавы № 5, 6, 7, западные лавы № 9, 11, 12, пл. n_2	2	n_4	0,20	14,5–15,7
		n_4^0	0,20	18,7–21,5
		n_4^2	0,20	38,7–42,1
им. 9-й Пятилетки, коренная лава, лавы южного крыла № 17, 19, пл. l_8	2	l_8^1	0,62	17,0–18,5
		l_8^2	0,20	22,7–26,0
«Глубокая», северные лавы № 1, 3, 5, 7, южные лавы № 1, 2, 5, пл. m_3	2	m_4^1	0,55	44,0–45,2
		m_4^3	0,65	50,7–53,5
им. 50-летия СССР, лавы № 33–36, пл. l_3^1	2	l_3^2	0,20	30,3–32,3
		l_3^3	0,20	55,0–68,0
«Рассвет», восточная лава 9 «бис», восточные лавы № 10, 11, 13, пл. l_7	3	l_8	0,36	6,5–7,0
		l_8^1	0,24	14,0–16,0
		l_8^B	0,25	18,0–19,0
«Хрустальская», западные панели № 7, 8, 9, 11 пл. l_2 , восточные панели № 1, 3, 5	4	l_2^1	0,55	8,9–10,1
		l_3	0,20	33,5–36,0
		l_3^1	0,10	42,0–44,0
		l_4	0,20	60,0–64,0

Шахта, лава, пласт	Кол-во спутников	Символ пласта	Мощность спутника, м	Расстояние от разрабатываемого пласта, м
«Стошковая», восточные лавы № 9–12, 14, 15 пл. I ₃ , спаренные лавы № 3–4 пл. I ₃	4	I ₃ ¹	0,30	8,5–9,5
		I ₄ ^H	0,20	12,5–13,4
		I ₄ ^B	0,90	20,0–21,0
		I ₅ ¹	0,15	34,0–35,5
ш/у «Покровское», северная лава № 1, спаренные № 1 и 3, пл. I ₇	3	I ₈	0,45	4,0–5,0
		L ₈ ²	0,50	24,0–25,0
		m ₃	0,30	29,0–31,0

Результаты исследований. Выемочные участки для проведения экспериментов выбирались в соответствии с критериями:

- совокупность условий отобранных участков охватывала всю гамму условий, характерных для пологих пластов Донбасса;
- при этом, прежде всего, учитывались метаносность разрабатываемых пластов и пластов-спутников, их мощности, схемы проветривания выемочных участков и схемы дегазации;
- условия эксплуатации выемочных участков обеспечивали возможность проведения экспериментов, связанных с отключением дегазации или отдельных дегазационных скважин с регулированием разрежения в широком диапазоне;
- обязательное оснащение дегазационных скважин устройствами для измерения и регулирования режима их работы.

Расчеты коэффициента эффективности выполнены для условий шахты «Чайкино» ГП «Макеевуголь», которые наиболее близки к средним в Донбассе по составу и угленасыщенности подрабатываемой толщи, а также количеству и расположению сближенных угольных пластов.

Изменяя один из факторов при прочих постоянных условиях, определяли его влияние на эффективность дегазации, количество каптируемой метановоздушной смеси и концентрацию в ней метана (табл. 2, рис. 1–4).

Регулирование эффективности дегазации может быть достигнуто путем изменения ряда параметров, таких как диаметр дегазационных скважин, их общее количество и уровень разрежения в скважинах.

Для наиболее распространенных в Донбассе условий ($I_{дс} = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$; $d = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и $B = 10^4 \text{ Па}$, $n_c = 8$) были получены зависимости эффективности дегазации: от разрежения в скважинах при различных их диаметрах; от количества одновременно работающих дегазационных скважин; от разрежения в дегазационных скважинах и газовыделения из дегазируемых пластов-спутников. Для данных условий эффективность дегазации менее 70 % (рис. 1).

Для повышения эффективности дегазации требуется увеличение диаметра дегазационной скважины до 93 мм или увеличение количества одновременно работающих дегазационных скважин. Например, при числе дегазационных скважин $n_c = 15$ коэффициент эффективности дегазации ($k_{дг}$) может превышать 0,9 (рис. 2).

При величине метановыделения $I_{дс} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ метан, выделяющийся из пластов-спутников, может быть полностью каптирован дегазационной системой (рис. 3).

Таблица 2

Зависимость эффективности дегазации, расхода газа и концентрации метана от горнотехнических параметров

Исходные данные				Расчетные параметры			Коэффициент увеличения газовыделения из сближенных пластов			Концентрация метана в каптируемой смеси, %			Эффективность дегазации, доли		
$\frac{h}{m}$	n_c , шт	d , мм	$I_{0,c}$, м ³ /мин	τ , кг/с·м ⁵	$R_{ср10}^{-5}$ кг/м ⁷	R_{ca10}^{-5} кг/м ⁷	разрежение, Па			разрежение, Па			разрежение, Па		
							1000	5000	10000	1000	5000	10000	1000	5000	10000
5	8	76	0,2	34,2	132,9	2,10	1,00	1,00	1,00	36	34	32	0,36	0,77	1,00
10	8	76	0,2	77,1	114,6	1,79	1,17	1,37	1,51	65	61	59	0,23	0,47	0,67
30	8	76	0,2	281,8	62,7	0,98	1,31	1,67	1,93	99	99	99	0,04	0,55	0,72
10	15	76	0,2	77,1	264,0	1,17	1,17	1,37	1,51	54	51	49	0,32	0,67	0,95
10	3	76	0,2	77,1	62,7	6,97	1,17	1,37	1,51	71	68	66	0,03	0,06	0,09
10	8	59	0,2	77,1	254,5	3,98	1,17	1,37	1,51	55	52	49	0,10	0,20	0,29
10	8	112	0,2	77,1	21,1	0,33	1,17	1,37	1,51	80	78	77	0,72	1,00	1,00
10	8	76	0,5	77,1	31,6	0,49	1,17	1,37	1,51	79	76	74	0,16	0,29	0,40
10	8	76	0,1	77,1	176,1	2,75	1,17	1,37	1,51	58	56	54	0,44	0,98	1,00

Примечание. Длина лавы – 200 м, расчетная зона газоотдачи – $Z_{гпр} = 143$ м.

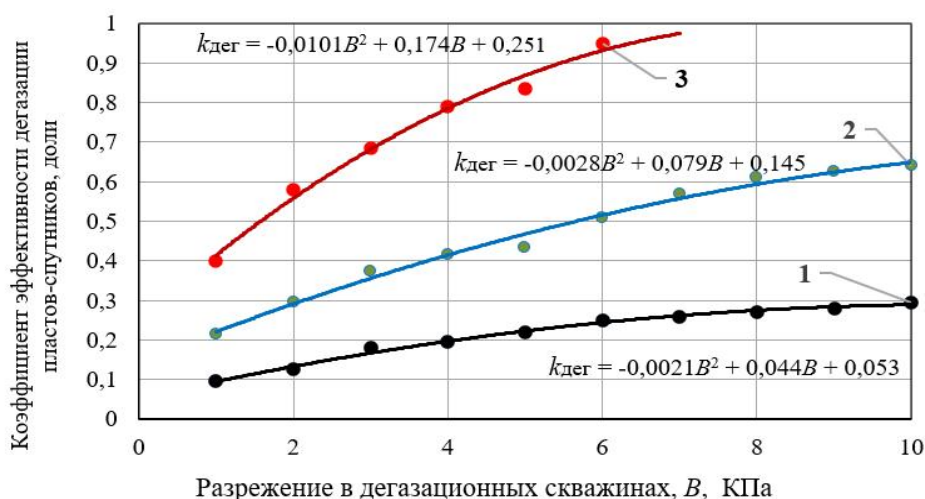


Рис. 1. Зависимость коэффициента эффективности дегазации от разрежения в скважинах при диаметре скважин: 1) $d = 59$ мм; 2) $d = 76$ мм; 3) $d = 93$ мм

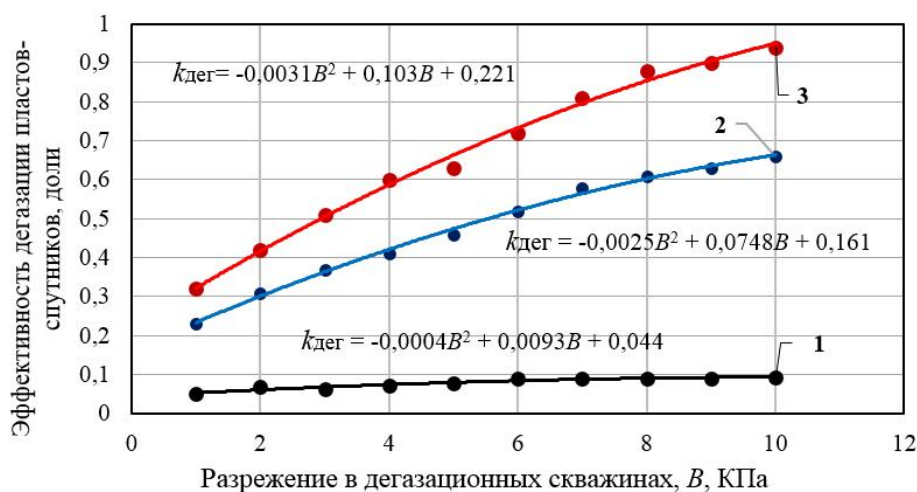


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности дегазации от разрежения в дегазационных скважинах: 1) $n_c = 3$; 2) $n_c = 8$; 3) $n_c = 15$

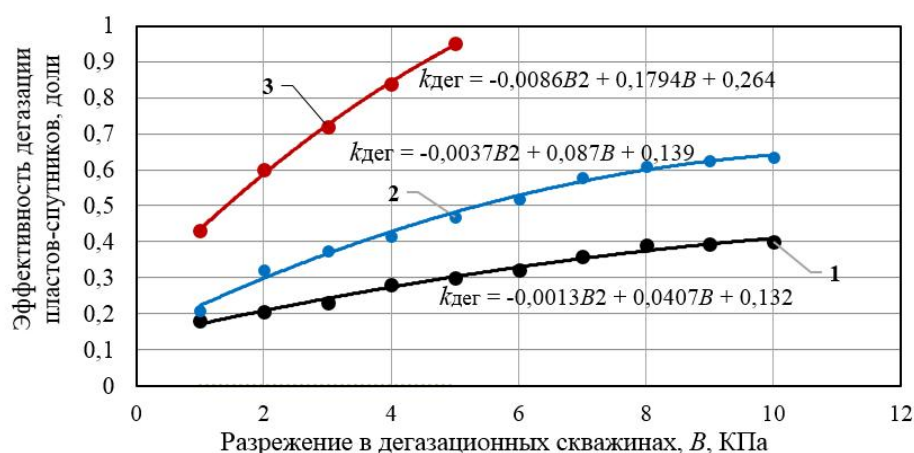


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности дегазации от разрежения в дегазационных скважинах и газовыделения из дегазируемых пластов-спутников: 1) $I_{dc} = 0,5$ м³/мин; 2) $I_{dc} = 0,2$ м³/мин; 3) $I_{dc} = 0,1$ м³/мин

Реальность достижения высокой эффективности дегазации подтверждается экспериментально, если оценивать ее по отношению к метановыделению из сближенных пластов, находящихся в сфере влияния дегазационных скважин (табл. 3). К ним относятся пласты-спутники, расположение выше нарушенных частей дегазационных скважин.

Таблица 3

Фактическая эффективность дегазации

Шахта / Лава	Условия дегазации				Газовыделение, м ³ /мин		Эффективность дегазации, %	
	B , Па	$\frac{h}{m}$	n , шт	d , мм	из сближенных пластов при отключенной дегазации	из недегазируемых сближенных пластов	дегазируемых сближенных пластов	из всех сближенных пластов
«Бутовская» / 7-я восточная	3620	22	4	76	0,160	0,073	89	48
«Рассвет» / 9-я «бис»	5400	34	6	76	0,056	-	80	80
«Чайкино» / 19-я западная	1725	9	10	7,6	0,130	-	78	78
«Хрустальская» / 7-я западная	3120	42	3	5,9	0,152	0,034	62	48
I-I «бис» / 5-я восточная	770	4,6	3	7,6	0,039	-	79	79

В 7-й восточной лаве шахты «Бутовская» скважины каптируют до 89 % метана, выделяющегося из пластов-спутников. Однако общая эффективность дегазации составляет только 48 %, так как вблизи разрабатываемого пласта залегает ещё один сближенный пласт, метановыделение из которого по прогнозу превышает 40 % общего метановыделения из пластов и боковых пород. Данный пласт при подработке попадает в зону беспорядочного обрушения $8m_b = 14,8$ м, и весь выделяющийся из него метан поступает непосредственно в очистной забой и прилегающие к нему выработки. В 9-й «бис» восточной лаве шахты «Рассвет», где таких сближенных пластов нет, при вакууме 5400 Па эффективность дегазации составляла 80 %. Аналогичная эффективность дегазации была и в 5-й восточной лаве шахты I-I «бис», где метановыделение из пластов-спутников незначительное (табл. 4).

Интересен характер влияния на эффективность дегазации относительно ненарушенных участков дегазационных скважин h/m . Если при ее увеличении количество пластов-спутников, попадающих в зону влияния скважин, не изменяется то эффективность дегазации изменяется незначительно (рис. 4), но при этом существенно возрастает дебит и концентрация каптируемого метана.

Таблица 4

Влияние h/m на эффективность дегазации, расход и объемную долю капируемого метана на примере 7-й восточной лавы шахты «Бутовская»

Условия дегазации				Газовыделение, м ³ /с			Эффективность дегазации, доли		Концентрация метана в капируемой метановоздушной смеси c , %	Объем капируемой метановоздушной смеси, м ³ /с
B , Па	$\frac{h}{m}$	n_c , шт	$d \cdot 10^2$, м	из спутников при отключенной дегазации	из недегазируемых спутников	в скважины	дегазируемых спутников	всех спутников		
760	22	4	7,6	0,087	0,073	0,106	0,30	0,16	93	0,114
640	5,3	4	7,6	0,208	-	0,063	0,25	0,25	52	0,121
2520	22	4	7,6	0,037	0,073	0,142	0,75	0,41	88	0,162
2900	5,3	4	7,6	0,208	-	0,100	0,38	0,38	46	0,196

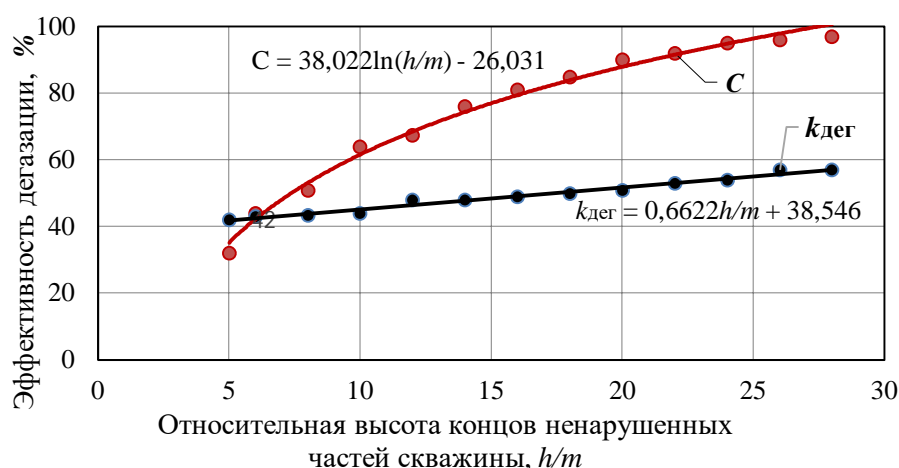


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности дегазации ($k_{\text{дег}}$) и концентрации метана (c) в устьях дегазационных скважин от относительной высоты концов ненарушенных частей скважины (h/m)

Это можно объяснить тем, что увеличение h/m сопровождается ростом газовыделения из пластов-спутников и сокращением подсосов воздуха в скважины. В ряде случаев, изменяя величину h/m можно менять количество пластов, попадающих в сферу влияния дегазационных скважин. При большом значении h/m некоторые сближенные пласты могут оказаться ниже концов ненарушенных частей дегазационных скважин и метан, выделяющийся из них, будет поступать в прилегающие горные выработки. Следовательно, этот параметр очень важен, так как от него зависит не только эффективность дегазации, но также каптаж метановоздушной смеси и величина подсосов воздуха в дегазационные скважины. Это хорошо видно на примере 7-й восточной лавы шахты «Бутовская» (табл. 4).

Изменение величины параметра h/m от 22,0 до 5,3 сопровождалось сокращением расхода капируемого метана в зависимости от снижения разрежения в дегазационных скважинах в 1,4–1,7 раза и концентрации метана в 1,8–1,9 раза, но на величину эффективности дегазации это не повлияло. В данном случае при $h/m = 5,3$ имели непроизводительные затраты на транспортировку газа, снижали калорийность добываемого метана.

Целесообразная величина параметра h/m должна определяться при проектировании дегазации индивидуально для каждого конкретного случая с учетом расположения и доли метановыделения из близлежащих к разрабатываемому угольному пласту пластов-спутников. Полученные нами зависимости предоставляют проектировщику возможность такого выбора.

Выполненный анализ показывает, что в тех случаях, когда все сближенные пласты попадают в зону влияния скважин, можно достичь высокого эффекта даже при большом газовыделении. Необходимым условием для этого является достаточное количество одновременно работающих скважин $n_c = 8 \dots 15$, соответствующий диаметр скважин ($d > 76$ мм) и достаточное разрежение в скважинах ($B > 5000$ Па). Для шахт с высокой газообильностью, применение данных параметров, может повлечь за собой реконструкцию дегазационных систем, так как при газовыделении из сближенных пластов $0,2\text{--}0,5$ м³/с, необходимый расход газа в участковом газопроводе составит $0,6\text{--}0,7$ м³/с. В настоящее время фактический расход, составляет $0,25\text{--}0,4$ м³/с.

Наличие сближенных пластов, расположенных вблизи разрабатываемого угольного пласта, существенно снижает возможную эффективность дегазации скважинами. При больших нагрузках на забои дегазация скважинами может оказаться недостаточной для обеспечения взрывобезопасности рудничной атмосферы. Для таких условий необходимы схемы, обеспечивающие возможность комплексной дегазации пластов-спутников и выработанных пространств. Чтобы определить область и объём применения таких схем, рассчитана возможная эффективность дегазации надрабатываемых пластов-спутников по следующей методике [8].

Коэффициент эффективности дегазации определяют по формуле [6, 7]:

$$k_{\text{дег}} = 1 - \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{сп}}} \quad (1)$$

где $I_{\text{в}}$ – газовыделение из пластов-спутников в выработки при работающей дегазации, м³/с;

$I_{\text{сп}}$ – общее газовыделение из пластов-спутников при отключенной дегазации, м³/с.

Долю метановыделения из каждого пласта-спутника определяют по формуле:

$$\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{сп}}} = \frac{m_i \left(1 - \frac{H_i}{H_p}\right)}{\sum m_i \left(1 - \frac{H_i}{H_p}\right)} \quad (2)$$

где m_i – мощность пласта-спутника, м;

H_i – расстояние от разрабатываемого пласта до пласта-спутника, м;

H_p – расстояние по нормали между разрабатываемым пластом и пластом-спутником, при котором метановыделение практически равно нулю, м [7].

Долю незабираемого дегазацией метана определяют по формуле [1, 2, 4]:

$$\frac{I_B}{I_{\text{сп}}} = \sum_1^{k_i} \frac{I_i}{I_{\text{сп}}}, \quad (3)$$

где k_i – количество пластов-спутников в кровле пласта, залегающего на расстоянии от разрабатываемого пласта до 30 м.

Значения m_i и H_i определены по геологическим разрезам геологоразведочных скважин, находящихся непосредственно на обрабатываемых выемочных участках для каждого шахтопласта.

Полученные данные характеризуют распределение общего метановыделения по отдельным пластам-спутникам на половине всех дегазируемых шахт Донбасса. Такая выборка вполне достаточна для оценки максимально возможной эффективности дегазации в целом.

Анализ показывает, что для 20 % шахтопластов метановыделение из труднодегазируемых подрабатываемых пластов-спутников превышает 30 % общего газовыделения из пластов-спутников (рис. 5).

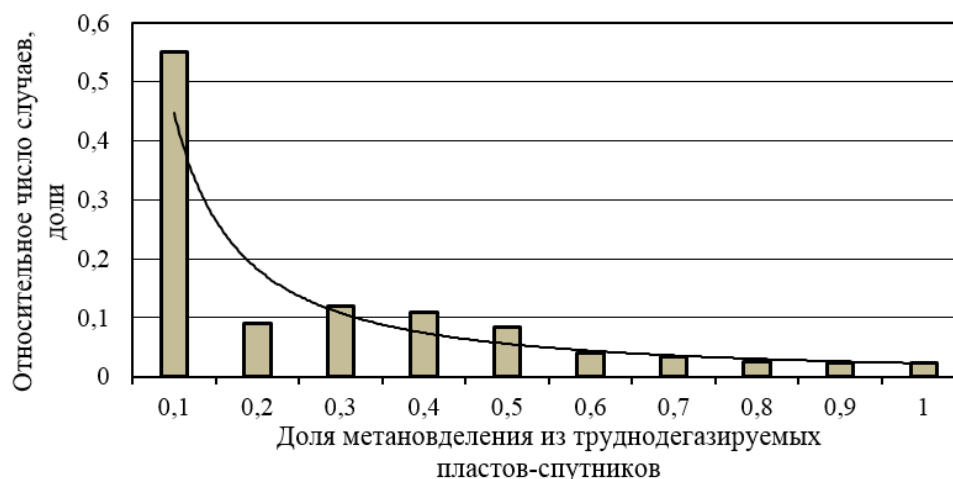


Рис. 5. Относительное распределение рассматриваемых шахтопластов по доле метановыделения из труднодегазируемых подрабатываемых пластов-спутников

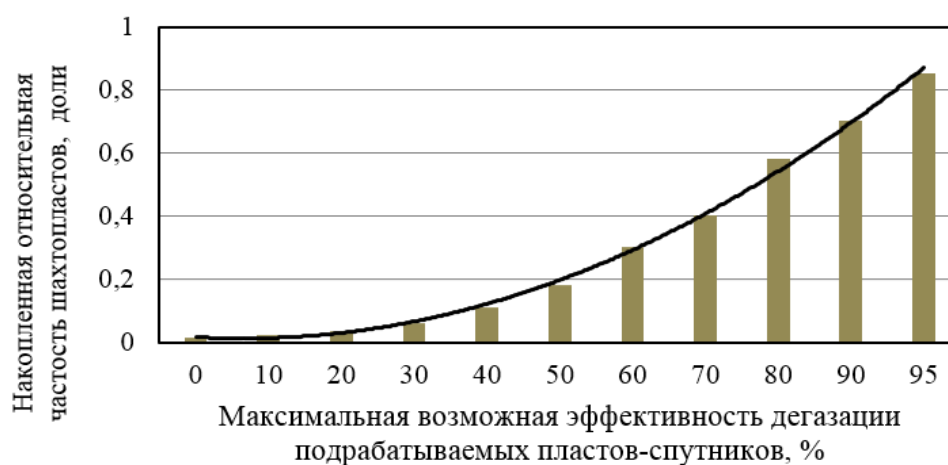


Рис. 6. Накопленная относительная частота рассматриваемых шахтопластов по максимально возможной эффективности дегазации подрабатываемых пластов-спутников

Оценивая описанным выше методом максимально возможную эффективность дегазации пластов-спутников скважинами, видим (рис. 6), что в условиях 20 % шахтопластов она не достигает 50 %. Однако в среднем при отработке пологих пластов Донбасса эффективность дегазации пластов-спутников скважинами может быть доведена до 80 %.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Полученные данные характеризуют распределение общего метановыделения по отдельным пластам-спутникам на половине всех ранее дегазируемых шахт Донбасса. Такая выборка вполне достаточна для оценки максимально возможной эффективности дегазации в целом.

Однако примерно для 20 % шахтопластов такие данные могут оказаться недостаточно эффективными, так как в этих условиях значительная часть газа выделяется из сближенных пластов, дегазация которых скважинами неэффективна. В этих случаях потребуется применение комплексной дегазации подрабатываемых пластов дегазационными скважинами и выработанных пространств.

Реализация практических рекомендаций полученных результатов исследований позволит повысить эффективность дегазации подрабатываемых пластов-спутников дегазационными скважинами в среднем на 30–35 %, а также повысить безопасность ведения горных работ.

Список литературы / References

1. Борисов, А. А. Механика горных пород и массивов / А. А. Борисов. – М. : Недра, 1980. – 360 с.
Borisov, A. A. *Mekhanika gornykh porod i massivov*. Moscow: Nedra Publ., 1980, 360 p. (In Russian)
2. Проскуряков, Н. М. Управление состоянием массива горных пород / Н. М. Проскуряков. – М. : Недра, 1991. – 368 с.
Proskuryakov, N. M. *Upravleniye sostoyaniyem massiva gornykh porod* [Management of the Rock Mass State]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 368 p. (In Russian)
3. Геомеханические аспекты недропользования / А. Д. Сашурин [и др.] – Екатеринбург : УрО РАН, 2022. – 256 с.
Sashurin A. D., Melnik, V. V., Balek, A. E., Dalatkazin, T. Sh., Usanov, S. V., Panzhin, A. A., Krinitsyn, R. V., Ozornin, I. L., Kharisov, T. F., Konovalova, Yu. P., Zamyatin, A. L., Grigoriev, D. V., Vedernikov, A. S., Usanova, A. V., Zubkov, A. V., Sosnovskaya, E. L. *Geomekhanicheskiye aspekty nedropolzovaniya* [Geomechanical aspects of subsoil use]. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022, 256 p. (In Russian)
4. Печук, И. М. Дегазация спутников угольных пластов скважинами / И. М. Печук. – М. : Углетехиздат, 1956. – 209 с.
Pechuk, I. M. *Degazatsiya sputnikov ugolnykh plastov skvazhinami* [Degassing of coal seams by wells]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1956. 209 p. (In Russian)
5. Савенко, Л. В. Дегазация спутников угольных пластов / Л. В. Савенко, М. И. Озеркин. – Киев : Углетехиздат, 1963. – 251 с.
Savenko, L. V., Ozerkin, M. I. *Degazatsiya sputnikov ugolnykh plastov* [Degassing of Coal Seams Satellites]. Kiev, Ugletekhizdat Publ., 1963. 251 p. (In Russian)
6. Забурдяев, В. С. Научные основы дегазации угольных шахт : монография / В. С. Забурдяев. – Москва; Вологда : Инфа-Инженерия, 2023. – 120 с.
Zaburdyaev, V. S. *Nauchnyye osnovy degazatsii ugolnykh shakht: monografiya* [Scientific Foundations of Coal Mine Degassing: Monograph]. Moscow; Vologda, Inf-Engineering Publ., 2023. 120 p. (In Russian)

7. Воронов, П. С. Интенсивность изменения метановыделения на выемочных участках при отключении систем дегазации / П. С. Воронов, Н. В. Карнаух, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 4 (54). – С. 60–69. (In Russian)

Voronov, P. S., Karnaukh, N. V., Mavrodi, A. V. [Intensity of change of methane emission at excavation districts by cutout of the degassing system]. Scientific Bulletin of the NIIGD «Respirator», 2017, no. 4 (54), pp. 60-69. (In Russian)

8. Агеев, В. Г. Инженерный метод расчёта переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт при их обесточивании / В. Г. Агеев, С. П. Греков, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 4 (59). – С. 7–16.

Ageev, V. G., Grekov, S. P., Mavrodi, A. V. [Engineering method for calculating transient gas-dynamic processes in working areas of mines during blackout]. Scientific Bulletin of the NI «Respirator», 2022, no. 4 (59), pp. 7-16. (In Russian)

9. Мавроди, А. В. Прогноз газовой обстановки на выемочном участке при обесточивании угольной шахты / А. В. Мавроди // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 3 (59). – С. 27–35.

Mavrodi, A. V. [Prediction of gas conditions at working area during blackout in coal mine]. Scientific Bulletin of the NI «Respirator», 2022, no. 3 (59), pp. 27-36. (In Russian)

10. Влияние дегазации на газовыделение из спутников / В. Д. Ашихмин [и др.] // Россия молодая: Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 21–24 апреля 2020 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2020. – С. 10115.1–10115.9. – EDN ROBNLH

Ashikhmin, V. D., Podvigin, K. A., Tishin, R. A., Plaksienko, O. V., Overchuk, I. A. *Vliyaniye degazatsii na gazovydeleniye iz sputnikov* [The effect of degassing on gas release from satellites]. *Rossiya molodaya: Sbornik materialov XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem*, Kemerovo, April 21–24, 2020. Kemerovo, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University Publ., 2020, pp. 10115.1–10115.9. EDN ROBNLH (In Russian).

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Е. А. Головченко
Дата поступления рукописи 17.10.2025

Valery Dmitrievich Ashikhmin, Senior Researcher; e-mail: dmitrievich.valery@yandex.ru
State Budgetary Institution «Makeyevka Research Institute for Safety in the Mining Industry»
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

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF DEGASSING IN THE CONDITIONS OF THE PILLAR MINING SYSTEM

Purpose. Evaluation of the effectiveness of degassing of coal seams and satellite seams by wells, as well as setting requirements for degassing equipment for its safe operation.

Methods. Analysis and generalization of the results of theoretical and field studies of the effectiveness of degassing of coal mines in Donbass. The data obtained characterize the distribution of total methane emissions by individual satellites in half of all degassed mines in Donbass. Such a sample is quite sufficient to judge the maximum possible effectiveness of de-gassing in general.

Results. The dependences of the degassing efficiency are obtained: on the discharge in wells at different diameters, on the number of simultaneously operating degassing wells, on the discharge in degassing wells and gas release from degassed satellites.

Scientific novelty. The dependence of the degassing efficiency on the discharge in degassing wells and gas release from degassed satellites has been established.

Practical significance. The results obtained will increase the efficiency of degassing of the satellites being worked by degassing wells by an average of 30-35 % and thereby reduce gas contamination and fire safety in mining operations.

Keywords: *pillar mining system; mined coal seams and interlayers (satellites); methane release; degassing wells; parameters of degassing wells; degassing efficiency; methane production.*

For citation: 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. EDN BAPWLT

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.8:614.8

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ РАБОТНИКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ И ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ

Цель. Выполнить оценку финансово-экономической эффективности внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей для повышения безопасности труда и эффективности ликвидации аварий.

Методы. Аналитический и теоретический метод исследования с обработкой результатов при использовании пакетов прикладных компьютерных программ.

Результаты. Проведена оценка финансово-экономической эффективности внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предложенных средств, увеличения производительности труда горноспасателей и снижения ущерба при тушении подземных пожаров составит 45 908 тыс. руб.

Научная новизна. Предложены новые технические средства индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей, внедрение которых в производственную деятельность угольных шахт и подразделения горноспасательной службы позволит сохранить жизнь и здоровье горнорабочих и горноспасателей при высоких эрготермических нагрузках и при этом получить социальный и экономический эффекты путем повышения безопасности труда и эффективности ведения горноспасательных работ.

Практическая значимость. Внедрение новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты позволит повысить безопасность труда работников угольных шахт и горноспасателей, а также эффективность ведения горноспасательных работ.

Ключевые слова: угольная шахта; аварийный участок; горная выработка; противогазотепловая защита; горнорабочий; горноспасатель; повышение безопасности труда; повышение эффективности ликвидации аварий; оценка финансово-экономического эффекта.

Для цитирования: Кирьян А. П. Оценка эффективности внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 77–87. – EDN CTJFMN

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

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

к материальным затратам на лечение и выплату по профессиональному заболеванию [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Как известно, наиболее эффективным методом оказания помощи пострадавшим при высоких эрготермических нагрузках является локальное охлаждение. Анализ результатов исследований по определению интенсивности и физиологической эффективности теплосъема с различных участков тела человека позволил установить, что при гипертермии следует отдавать предпочтение охлаждению головы и шеи [2, 3]. Второе место по эффективности и удобству локального охлаждения занимают надгрудная и лопаточная области, что объясняется хорошо развитой сосудистой сетью и эффектом влияния на область сердца. При этом, охлаждая шею и туловище, можно достичь уменьшения функционального напряжения организма до 72 %. Третье место по эффективности охлаждения поверхности тела занимают кисти, предплечья и голени. Стопы также обладают перечисленными свойствами, однако наиболее существенный эффект их охлаждения происходит при изоляции от теплопритока из окружающей среды.

С учетом вышеперечисленных фактов были предложены новые методы и технические средства индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей [4]. Разработанные новые средства: аккумулятор холода АХ-7, противотепловая и пылевая кутка для горнорабочих КПШ-40, криогенный костюм КР-150, газотеплозащитный костюм ГЗТК-200, костюм для определения тепловой устойчивости ИЗК, переносной теплоизолирующий контейнер К-3. Усовершенствованные средства: куртка ТК-50, костюмы ТК-60М, ПТК-80, ПГТ, ГТЗК-40, ПТК-300, ТОК-200У и ТОК-800. Ранее разработанные средства: охлаждающий жилет ОЖГ, костюм для оказания помощи пострадавшим при тепловых травмах КЭОП и пакет химический охлаждающий ПХО. При этом в ранее выполненных научных работах [1–4] отсутствует оценка финансово-экономической эффективности внедрения новых методов и технических средств индивидуальной противогазотепловой защиты для повышения безопасности труда шахтеров и эффективности ликвидации аварий на обслуживаемых горноспасателями объектах, что является актуальной научной задачей.

Цель работы: оценка финансово-экономической эффективности внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей для повышения безопасности труда и эффективности ликвидации аварий.

Результаты исследований. Для условий Донецкого угольного бассейна ожидаемый годовой экономический эффект (Э, тыс. руб.) состоит из суммы снижения затрат на лечение, восстановления здоровья и выплаты регресса пострадавшим горнорабочим при перегревании организма и дыхании повышенных концентраций пыли окружающей среды, например, при использовании куртки КПШ-40 (Э₁, тыс. руб.); снижения ущерба при тушении пожаров со стороны свежей струи воздуха в горных выработках аварийных участков угольных шахт при использовании горноспасателями более эффективной (предлагаемой) противогазотепловой одежды (Э₂, тыс. руб.); увеличения эффективности работы в одежде (в том числе увеличения времени защитного действия) спасателями МЧС России при ликвидации аварий (Э₃, тыс. руб.); снижения затрат на возведение

армированных взрывоустойчивых перемычек меньшей толщины (\mathcal{E}_4 , тыс. руб.), и определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 \quad (1)$$

Согласно данным ГУП ДНР «НИИ медико-экологических проблем Донбасса и угольной промышленности» ежегодно к ним поступает в среднем 30 пострадавших с тепловыми травмами, что приводит к большим затратам на лечение, восстановление здоровья и выплаты по профессиональному заболеванию, которые составляют в среднем 730 тыс. руб. на одного пострадавшего. Таким образом:

$$\mathcal{E}_1 = n_{\text{п}} \times Z_{\text{п}} = 21\,900 \text{ тыс. руб.} \quad (2)$$

где $n_{\text{п}}$ – количество пострадавших с тепловыми травмами, ед.;

$Z_{\text{п}}$ – затраты на лечение, восстановление здоровья и выплаты по профессиональному заболеванию на одного пострадавшего, руб.

Экономический эффект (\mathcal{E}_2) от внедрения новых методов и технических средств индивидуальной противогазотепловой защиты заключается в том, что при увеличении эффективности ведения работ в противогазотепловых средствах может быть снижено количество осложнившихся пожаров на различных объектах (забои очистных и подготовительных выработок, конвейерный и вентиляционный штреки и т. д.).

Дополнительным фактором сокращения расходов является отсутствие необходимости тушения пожаров III–IV категории. К I категории отнесены пожары, потушенные членами военизированных горноспасательных команд с использованием первичных средств пожаротушения без вызова горноспасательных подразделений, а к II–IV категориям – пожары, потушенные горноспасателями. При этом ко II категории отнесены пожары, потушенные активным способом, или автоматическими средствами пожаротушения, размещенными на объекте, а к III–IV – пожары, ликвидированные путем изоляции аварийных участков (в зависимости от величины материального ущерба). Расчет показателя \mathcal{E}_2 выполняется по формуле:

$$\mathcal{E}_2 = \sum_{i=1}^n (C_{i1} + E_{\text{н}} K_{i1}) A_{i1\text{нас}} \frac{P_1 + E_{\text{н}}}{P_2 + E_{\text{н}}} + \frac{\sum_{i=1}^n (I_{i1} - I_2) - E_{\text{н}} (K_2^1 - K_1^1)}{P_2 + E_{\text{н}}} + \frac{\mathcal{E}_{\text{нас}}^{\text{ав}}}{P_2 + E_{\text{н}}} \times \frac{N}{S} - (C_2 + E_{\text{н}} K_2) A_{2\text{нас}} \ddot{y}_{\text{р}}^1 A_2^1, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n (C_{i1} + E_{\text{н}} K_{i1}) A_{i1\text{нас}}$ – приведенные затраты по базовой технике в расчете на один защищаемый объект с учетом применения средств защиты, руб.;

n – количество различных средств защиты в базовом варианте, ед.;

$A_{i1\text{нас}}$ – необходимое количество единиц i -го средства защиты на данном объекте, ед.;

P_1 – доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (определяют как средневзвешенное значение для n видов средств защиты в базовом варианте), ед.;

P_2 – то же для новых средств защиты, ед.;

I_{i1} – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базовых средств защиты в расчете на один защищаемый объект, руб.;

I_2 – то же для новых средств защиты, руб.;

K_1^1 , K_2^1 – сопутствующие капитальные вложения потребителя при использовании базовых и новых средств пожаротушения в расчете на один защищаемый объект, руб.;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равен 0,15;

N – среднегодовое количество пожаров на защищаемых объектах, ед.;

S – общее количество объектов, подлежащих защите, ед.;

$(C_2 + E_n K_2) A_{2\text{нас}}$ – приведенные затраты по новой технике в расчете на один защищаемый объект с учетом проектируемого насыщения, руб.;

A_2^1 – количество защищаемых объектов, ед.;

$\mathcal{E}_{\text{нас}}^{\text{ав}}$ – экономия текущих и капитальных затрат, связанных с аварийно-восстановительными работами в расчете на одну аварию, руб., рассчитывается согласно формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{нас}}^{\text{ав}} = [M(U_1^T) + E_n M(U_1^K)] - [M(U_2^T) + E_n M(U_2^K)], \quad (4)$$

где $M(U_1^T)$, $M(U_2^T)$ – математическое ожидание текущих затрат, связанных с аварийно-восстановительными работами при использовании базовой и новой противопожарной техники в расчете на один пожар, руб.;

$M(U_1^K)$, $M(U_2^K)$ – то же для капитальных затрат, руб.

В рассматриваемом варианте отсутствует необходимость связывать расчет экономического эффекта с внедрением на защищаемом объекте нового вида средств пожаротушения, поэтому его можно рассматривать как снижение ущерба от возможных пожаров.

Математическое ожидание ущерба от пожара, $M(U_j)$, руб., определяется по формуле:

$$M(U_j) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \bar{U}_{ij}, \quad (5)$$

где P_{ij} , U_{ij} – вероятность развития пожара до i -й категории ($i = 1 \dots 4$) при использовании j -го способа тушения ($j = 1, 2$ – для традиционного способа и разработанных средств соответственно) и средний ущерб от одного пожара i -й категории, руб., соответственно.

Для принятого в исследовании базового варианта математическое ожидание ущерба (рассматриваем пожары II–IV категорий) с учетом применения традиционного способа тушения пожаров, $M(U_1)$, руб., определяется по формуле:

$$M(U_1) = P_{21} \bar{U}_{21} + P_{31} \bar{U}_{31} + P_{41} \bar{U}_{41} \quad (6)$$

Математическое ожидание ущерба от пожара с учетом применения автоматических средств пожаротушения, $M(U_2)$, руб., определяется согласно формуле:

$$M(U_2) = P_{22}\bar{U}_{22} + P_{32}\bar{U}_{32} + P_{42}\bar{U}_{42} \quad (7)$$

В связи с тем, что противопожарная техника воздействует на уже возникший пожар, среднегодовое количество пожаров и загораний по рассматриваемой группе объектов, как для традиционного, так и для нового способа остается неизменным и равным фактическим значениям. Поэтому $U_{i1} = U_{i2}$ для $i = 2 \dots 4$. Сокращение ущерба происходит за счет перераспределения вероятности тушения пожаров между II категорией и III–IV категориями осложнившихся пожаров.

Значение математического ожидания ущерба при использовании разработанных средств пожаротушения определяется из выражения:

$$M(U_2) = (1 - \beta^{\text{II}}) P_{21}\bar{U}_{21} + (1 - \beta^{\text{II}}) P_{31}\bar{U}_{31} + (1 - \beta^{\text{II}}) P_{41}\bar{U}_{41}, \quad (8)$$

где β^{II} – вероятность события, состоящего в том, что пожар, переходивший в III–IV категории, при использовании автоматических средств ликвидируется на стадии активного тушения (II категория).

Значения P_{22} , P_{32} , P_{42} определяются с учетом того, что $\sum_{i=2}^n P_{i2} = 1$, а также с учетом сохранения пропорциональности количества пожаров II–IV категорий:

$$\begin{aligned} P_{22} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{21}; \\ P_{32} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{31}; \\ P_{42} &= (1 - \beta^{\text{II}}) P_{41} \end{aligned} \quad (9)$$

Вероятность того, что возникший пожар будет потушен активным способом (II категория) при использовании автоматических средств, может быть определена согласно формуле:

$$P_{22} = P_{\text{вз}}^{\text{УН}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{вз}}^{\text{УН}}$ – вероятность выполнения задачи по активному тушению пожара при использовании средств противогазотепловой защиты:

$$P_{\text{вз}}^{\text{УН}} = k_{\text{г}} P_{\text{бр}} P_{\text{эт}} k_{\text{ш}}, \quad (11)$$

где $k_{\text{г}}$ – коэффициент, характеризующий готовность технического средства выполнить задачу по активному тушению пожара, ед.;

$P_{\text{бр}}$ – вероятность безотказной работы средств защиты после их срабатывания;

$P_{\text{эт}}$ – вероятность успешного тушения пожара, связанная с готовностью средств защиты поддерживать заданные параметры тушения;

$k_{\text{ш}}$ – коэффициент, характеризующий условия эксплуатации средств защиты на объекте, ед.

Рассмотрим расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения разработанных средств защиты в горных выработках угольных шахт. Для этого используем данные Федерального государственного казенного учреждения «Военизированной горноспасательная часть Донецкой Народной Республики» за 2015–2024 годы (табл. 1).

Таблица 1

Показатели оперативной деятельности ФГКУ «Военизированной горноспасательная часть Донецкой Народной Республики» за 2015–2024 гг.

Показатель, ед. изм.	Количество
Общее количество аварий и аварийных ситуаций, ед.	256
Общее количество аварий, ед., в том числе:	59
– подземных пожаров, ед.	20
– экзогенных	18
– эндогенных	2
– взрывов газовоздушной смеси и угольной пыли, ед.	6
– внезапных выбросов угля, породы и газа, ед.	0
– обрушений горных пород, ед.	13
– затоплений горных выработок, ед.	4
– аварий на поверхности шахт, ед.	22
Общее количество аварийных ситуаций, ед.	192
Длительность ликвидации аварий и аварийных ситуаций, ч	2053
Экономический ущерб, млн руб.	31,7
Общее количество возведенных изоляционных сооружений в период ведения аварийно-спасательных работ, ед.	3
– в том числе гипсовых перемычек, ед.	3
Общее количество выполненных технических работ, ед.	184
Возведено изоляционных сооружений при выполнении технических работ, ед.	9
– в том числе гипсовых перемычек, ед.	2

Распределение экзогенных пожаров в забоях тупиковых горных выработок, в которых возможно использование средств защиты, произошедших за период 2015–2024 гг., вероятности их возникновения и значения ущербов приведены в табл. 2.

Математическое ожидание ущерба $M(U_1)$ от одного пожара при базовом варианте определяем согласно формуле (6):

$$M(U_1) = P_{21}U_{21} + P_{31}U_{31} + P_{41}U_{41} = 0,48 \cdot 12,4 + 0,23 \cdot 627,3 + 0,29 \cdot 2530,3 = 884,1 \text{ тыс. руб.}$$

Вероятность тушения пожара средствами пенного пожаротушения со стороны свежей струи воздуха (в горных выработках со свежей струей воздуха) при использовании костюмов ГЗТК-200, ПТК-300, КР-150 рассчитывается по формуле (11).

Таблица 2

Пожары в горных выработках аварийных участков
угольных шахт за 2015–2024 гг.

Показатель	Категория тяжести			Итого
	II	III	IV	
Количество пожаров	5	7	8	20
Ущерб от пожаров, тыс. руб.	124,0	6273,3	25302,7	31700,0
Средний ущерб, тыс. руб.	12,4	627,3	2530,3	3170,0
Вероятность	0,48	0,23	0,29	1,0

Коэффициент готовности средства выполнить задачу принимаем $\kappa_r = 0,9$. Вероятность безотказной работы $P_{бр} = 0,95$. Вероятность успешного тушения пожара, связанная с готовностью противопогазотепловых средств поддерживать заданные параметры, принимаем $P_{эт} = 0,99$. Коэффициент, учитывающий шахтные условия эксплуатации, $k_{ш} = 0,9$. В таком случае:

$$P_{вз}^{ун} = 0,9 \times 0,95 \times 0,99 \times 0,9 = 0,762.$$

Определяем вероятность β^{II} :

$$b^{II} = \frac{P_{22} - P_{21}}{1 - P_{21}} = \frac{0,762 - 0,48}{1 - 0,48} = 0,542$$

Вероятности развития пожара равны:

$$P_{32} = (1 - \beta^{II}) P_{31} = (1 - 0,542) \cdot 0,23 = 0,105$$

$$P_{42} = (1 - \beta^{II}) P_{41} = (1 - 0,542) \cdot 0,29 = 0,133$$

Поскольку $U_{21} = U_{22}$ и $U_{32} = U_{31}$, то $U_{42} = U_{41}$.

Результаты расчета приведены табл. 3.

При количестве действующих опасных по газу шахт, равном шести, количество защищаемых объектов средствами противопогазотепловой защиты составляет $S = 6$ ед. Среднегодовое количество пожаров в выработках $N = 20/10 = 2$. Принимаем, что в среднем за год будут ликвидированы пожары в 30 горных выработках. Тогда $A_2^1 = 30$.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.

Таблица 3

Экономический ущерб от пожаров в горных выработках угольных шахт

Вариант	Показатель	Категория тяжести последствий пожаров			Математическое ожидание ущерба от одного пожара, тыс. руб.
		II	III	IV	
Базовый	Вероятность	0,48	0,23	0,29	
	Ущерб от пожаров, тыс. руб.	6,0	144,3	733,8	884,1
Новый	Вероятность	0,762	0,105	0,133	
	Ущерб от одного пожара, тыс. руб.	9,4	65,8	336,5	411,7

Таблица 4

Исходные данные для расчета годового экономического эффекта от внедрения новых средств

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Вариант	
			Базовый	Новый
Доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) средств защиты	P_2	—	—	0,15
Нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений	E_n	—	—	0,15
Текущие затраты на аварийно-восстановительные работы, связанные с ликвидацией последствий одного пожара	$M(U_1^T)$ $M(U_2^T)$	тыс. руб.	416,7	191,3
Капитальные затраты на аварийно-восстановительные работы, связанные с ликвидацией последствий одного пожара	$M(U_1^K)$ $M(U_2^K)$	тыс. руб.	3752,7	1721,6
Среднегодовое количество пожаров	N	ед.	2,0	2,0
Количество потушенных объектов	S	ед.	6	6
Количество потушенных объектов, рассчитанное исходя из годового объема их оснащения	A_2^1	ед.		30

Расчёт годового экономического эффекта при защите исключительно длинных тупиковых выработок угольных шахт можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_2 &= \frac{[M(U_1^T) + E_n M(U_1^K)] - [M(U_2^T) + E_n M(U_2^K)]}{P_2 + E_n} \times \frac{N}{S} A_2^1 = \\
 &= \frac{[416,7 + 0,15 \times 3752,7] - [191,3 + 0,15 \times 1721,6]}{0,15 + 0,15} \times \frac{2}{6} \times 30 = 17670 \text{ тыс. руб.}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

В работах [2–4] приведен годовой экономический эффект при использовании спасателями противогазотепловых костюмов ТОК-200 и ТОК-800 с аккумуляторами холода АХ-5 при повышении эффективности в 1,5 раза, который определяли согласно формуле

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_3 = & [(C_1 + E_n K_1) B_2 / B_1 \cdot (P_1 + E_n) / (P_2 + E_n) + (u_1 - u_2) - \\ & - E_n (K_2^1 - K_1^1)] / (P_2 + E_n) - C_2 + E_n K_2) A_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где C_1, C_2 – себестоимость единицы продукции, выпускаемой по базовому и новому варианту, соответственно, руб. ($C_1 = C_2$);

K_1, K_2 – удельные капитальные вложения, необходимые для изготовления единицы выпускаемой продукции, руб. ($K_1 = K_2$);

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности ($E_n = 0,15$);

B_2/B_1 – коэффициент учета изменения производительности нового средства по сравнению с базовым, равен 1,15;

$(P_1 + E_n)/(P_2 + E_n)$ – коэффициент учета изменения срока службы нового средства по сравнению с базовым, равен 1,0;

P_1, P_2 – доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление, соответственно, базового и нового вариантов средств, которая рассчитывается как величина, обратная сроку службы средств ($P_1 = P_2$);

u_1, u_2 – годовые эксплуатационные расходы потребителя при использовании единицы средств в расчете на объем работ, выполненных с помощью нового средства (принимается $u_1 = u_2$);

K_1^1, K_2^1 – сопутствующие капитальные вложения потребителя, необходимые для обеспечения нормальной работы единицы базового и нового вариантов средств (без учета стоимости самого средства), в расчете на объем работ, выполненных с помощью единицы нового средства, руб. ($K_1^1 = K_2^1$);

A_2 – годовой объем внедрения в расчетном году новых средств в натуральных единицах ($A_2 = 10$).

Эксплуатационные расходы потребителя при использовании единицы средств составят: $(u_1 - u_2) = 0$.

Согласно работе [1] $\mathcal{E}_3 = 2\,320$ тыс. руб.

В работе [5] ожидаемый годовой экономический эффект от возведения взрывоустойчивых перемычек из цементно-шлакового материала при толщине сооружения 5,5 м составляет 4 018 тыс. руб. (\mathcal{E}_4). Следовательно, согласно формулам (2), (12) и (13), общий годовой экономический эффект для Донбасса составит:

$$\mathcal{E} = 21\,900 + 17\,670 + 2\,320 + 4\,018 = 45\,908 \text{ тыс. руб.}$$

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, внедрение новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты позволит сохранить жизнь и здоровье горнорабочих и горноспасателей при высоких эрготермических нагрузках.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты, увеличения производительности труда горноспасателей, снижения ущерба при тушении подземных пожаров,

снижения времени и стоимости возведения взрывоустойчивых изолирующих сооружений (перемычек) составит 45 908 тыс. руб.

Внедрение данного вида оборудования – один из важных этапов повышения безопасности труда горноспасателей и шахтеров в шахтах.

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

Список литературы / References

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

Bulgakov, Yu. F., Borshchevskij, S. V., Marijchuk, I. F., Kurbatsky, E. V., Vygovskaya, D. D. *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita: monografiya* [Individual gas and heat protection: monograph]. Donetsk, Nord Kompyuter Publ., 2016, 250 p. (In Russian)

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

Polozhiy, V. O. *Sovershenstvovanie individualnykh sredstv ohlazhdeniya gornyakov v usloviyakh povyshennoy temperatury shakhtnogo mikroklimate* [Improving individual cooling means for miners in conditions of elevated temperature of mine microclimate: 05.26.01 «Labor protection (by industry)» specialty: Thesis abstract for the Candidate of Technical Sciences dissertation / Vitaliy Olegovich Polozhiy]. Makeevka, 2013, 20 p. (In Russian)

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

Voronov, P. S. *Obosnovanie parametrov i sozdanie tekhnicheskikh sredstv dlya protivoteplovoy zashchity gornospasateley s ispolzovaniem szhatogo vozdukha* [Justification of parameters and creation of technical means for heat protection of mine rescuers using compressed air: 05.26.01 «Labor protection (by industry)» specialty: Thesis abstract for the Candidate of Technical Sciences dissertation / Pavel Sergeevich Voronov]. Donetsk, 2007, 21 p. (In Russian)

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

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

5. Методические рекомендации по определению экономического эффекта инновационных проектов для угольной промышленности в условиях рынка / ЦНИЭИУголь. – Москва, 2000. – 25 с.

Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu ekonomicheskogo effekta innovacionnykh projektov dlya ugolnoy promyshlennosti v usloviyakh rynka [Methodological recommendations for determining the economic effect of innovative projects for the coal industry in market conditions]. Moscow, 2000, 25 p. (In Russian)

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

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF NEW MEANS OF INDIVIDUAL GAS AND HEAT PROTECTION FOR COAL MINING WORKERS AND MINE RESCUE WORKERS

Purpose. Conduct an assessment of the financial and economic efficiency of introducing new means of individual gas and heat protection for coal mine workers and mine rescuers to improve occupational safety and the efficiency of accident response.

Methods. Analytical and theoretical research methods were used with the processing of results using application software packages.

Results. Research has been conducted to assess the financial and economic efficiency of introducing new personal gas and heat protection equipment. The expected annual economic effect from introducing the proposed equipment, increasing the productivity of mine rescuers and reducing damage when extinguishing underground fires will amount to 55,487 thousand rubles.

Scientific novelty. New technical means of individual gas and heat protection for coal mine workers and mine rescuers are proposed, the introduction of which into the production activities of coal mines and mine rescue service units will help preserve the lives and health of miners and mine rescuers under high ergothermic loads and at the same time achieve social and economic effects by increasing labor safety and the efficiency of emergency mine rescue operations.

Practical value. Introducing new means of individual gas and heat protection will improve the safety of coal mine workers and rescuers, as well as the effectiveness of mine rescue operations.

Keywords: *coal mine; emergency area; mine workings; gas and heat protection; miner; mine rescuer; improving occupational safety; improving the efficiency of accident response; assessing the financial and economic effect.*

For citation. Kiryan A. P. Assessment of the efficiency of implementation of new means of individual gas and heat protection for coal mining workers and mine rescue workers. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 77-87. EDN CTJFMN

УДК 614.8:622/628

Светлана Александровна Гарелина, канд. техн. наук., доц., профессор кафедры;

e-mail: s.garelina@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.: 8 (498) 699-05-59

КОНЦЕПЦИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Цель. Обоснование параметров интегрированной системы технических средств, объединяющей мониторинг производственного процесса и переработку отходов в рамках риск-ориентированного подхода, для снижения техногенного риска на промышленных предприятиях.

Методы. В работе использован системный подход, основанный на интеграции метрологических характеристик средств мониторинга и контроля с параметрами переработки отходов в модели количественной оценки техногенного риска. Применено математическое моделирование для установления зависимости между неопределённостью измерений и величиной потенциального ущерба, а также для обоснования рациональных сроков эксплуатации полигонов и оптимального момента запуска переработки отходов в условиях ограниченности ресурсов.

Результаты. Получены аналитические соотношения, связывающие неопределённость измерений (среднюю квадратическую погрешность) с оценкой потенциального ущерба; обоснована асимметрия последствий ошибок I и II рода (ложные срабатывания ведут к избыточным затратам, пропуски опасных событий – к росту ущерба от развития сценариев). Сформулирован критерий «ущерб – средняя квадратическая погрешность» для обоснования требований к точности средств мониторинга и контроля. Предложена модель годового техногенного риска для полигонов отходов, в которой риск выражен через скорость накопления и площадь размещения. На основе компромиссной функции затрат на предупреждение и компенсацию ущерба показано существование оптимума и выведены условия расчёта оптимальных параметров (в том числе времени эксплуатации полигона и момента запуска переработки) при заданных исходных данных и ресурсных ограничениях.

Научная новизна. Впервые предложен критерий «ущерб – средняя квадратическая погрешность» для количественной оценки влияния метрологических характеристик на уровень техногенного риска. Разработана концепция интеграции мониторинга и переработки отходов в единую систему технических средств для предупреждения ЧС техногенного характера на промышленных предприятиях. Сформирована модель оптимизации сроков эксплуатации полигонов и запуска переработки, учитывающая риск и ресурсные ограничения. Это позволяет перейти от фрагментарных решений к целостному риск-ориентированному управлению промышленной безопасностью.

Практическая значимость. Возможность применения предложенного подхода при обосновании финансовых решений, разработке программ повышения промышленной безопасности и выборе приоритетных направлений модернизации технической инфраструктуры объектов с высоким техногенным риском. Это особенно актуально в условиях ограниченного бюджета и необходимости соблюдения экологических нормативов.

Ключевые слова: *риск-ориентированный подход; предупреждение ЧС; промышленная безопасность; неопределённость измерений; переработка отходов; средства мониторинга и контроля; количественная оценка риска; материальный ущерб.*

Для цитирования: Гарелина С. А. Концепция риск-ориентированной системы технических средств для предупреждения чрезвычайных ситуаций на промышленных предприятиях // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 88–100. – EDN GHKFHX

Постановка проблемы. Анализ техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) показывает, что наибольший социальный и экономический ущерб связан с авариями на промышленных предприятиях [1–6]. Экономика Российской Федерации во многом опирается на функционирование крупных промышленных предприятий, которые представляют собой потенциально опасные элементы техносферы [7]. Высокий уровень риска ЧС обусловлен сочетанием технологических, инфраструктурных и организационных факторов. К числу основных причин относят ускоренное внедрение новых технологий без соответствующего контроля, критическую степень износа основных фондов, размещение производств вблизи жилых территорий, а также накопление отходов без должного контроля, обезвреживания и переработки и др. [8–13]. Последний фактор представляет собой самостоятельный и всё более актуальный источник отложенного техногенного риска. Особую тревогу вызывают объекты накопленного экологического вреда [13]: в нашей стране насчитывается более 200 таких объектов с объёмом загрязняющих веществ до 100 млрд т. Это указывает на то, что даже при стабильной работе предприятий рост отходов увеличивает потенциальную энергетическую ёмкость аварий. Устойчивый рост объёмов накопленных отходов указывает на дефицит системного управления в сфере их утилизации, а в дополнение на недостаточную эффективность существующих технических и организационных решений.

Мониторинг и контроль параметров производственного процесса является основой системы предупреждения ЧС. Однако действующие системы мониторинга на предприятиях зачастую фрагментарны, технически устарели и не обеспечивают достаточного охвата контролируемых параметров, значимых для оценки риска (как правило, контроль ограничен технологическим процессом, не охватывает инфраструктуру хранения отходов) [14–17]. Одной из системных проблем является отсутствие целостной концепции построения системы мониторинга. Связь между метрологическими характеристиками технических средств мониторинга и контроля (ТСМК) производственного процесса и оценкой риска, как правило, не устанавливается, что затрудняет прогнозирование и управление ситуацией. Несмотря на внедрение отдельных технологий, объёмы отходов продолжают расти, увеличивая отложенный техногенный риск. Переработка осуществляется эпизодически и не рассматривается как инструмент предупреждения аварий. Отсутствие связи с прогнозом и управлением рисками ограничивает её эффективность.

Таким образом, сформировалась устойчивая проблемная ситуация: при наличии отдельных решений в области технологического мониторинга и переработки отходов их разрозненное применение вне единой концепции риск-ориентированного управления снижает эффективность предупреждения ЧС на промышленных предприятиях, что способствует росту их частоты и масштабов.

Мониторинг технологического процесса и полигона отходов, а также переработка отходов представляют собой две самостоятельные меры снижения техногенного риска, опирающиеся на общий ресурс – финансовый, материально-технический и управленческий. Интеграция функций мониторинга и переработки в единой системе технических средств (ТС) позволяет сформировать замкнутый цикл предупреждения ЧС, основанный на рациональном использовании ресурсов и повышении эффективности риск-ориентированного управления.

Система ТС для предупреждения ЧС представляет собой совокупность измерительных, контролирующих, управляющих и перерабатывающих ТС, разработанных, отобранных и применяемых с учётом уровня техногенного риска, нормативных требований и ресурсных ограничений. Она формирует техническую основу управления рисками и включает: ТСМК параметров производственного процесса и состояния окружающей среды; системы мониторинга, обеспечивающие сбор, анализ и интерпретацию данных, а также автоматизацию управленческих действий; ТС для переработки отходов.

Анализ последних исследований. Анализ литературы показывает растущий интерес к количественной оценке техногенного риска и к созданию адаптивных моделей его управления. Существенный вклад в развитие методологии внесли ведущие научные коллективы МЧС России и ряд исследователей, которые заложили теоретические основы анализа риска и разработали отраслевые модели [18–22]. Эти исследования охватывают задачи построения систем мониторинга, прогноза, а также математического моделирования надёжности и устойчивости инфраструктуры. В ряде публикаций освещены вопросы экологических рисков при обращении с отходами, а также опасность отходов как самостоятельного источника ЧС [23, 24]. Однако во многих случаях отсутствует классификация рисков по видам отходов и методы их динамической оценки. Исследования в области мониторинга подчеркивают его значимость для промышленной безопасности, но ограничиваются преимущественно рамками технологического процесса, не охватывая хранилища отходов и зоны вторичного риска [25–27]. Таким образом, несмотря на значительный массив исследований, сохраняется дефицит универсальных решений, обеспечивающих интеграцию мониторинга, переработки отходов и прогнозирования сценариев в рамках единой риск-ориентированной системы управления техногенными рисками.

Цель исследования. Обоснование параметров интегрированной системы технических средств, объединяющей мониторинг производственного процесса и переработку отходов в рамках риск-ориентированного подхода, для снижения техногенного риска на промышленных предприятиях.

Результаты исследований. Математический аппарат установления взаимосвязи ущерба с метрологическими характеристиками ТСМК при оценке риска ЧС. При монотонном изменении контролируемого параметра $X = f(t)$ временная неопределённость определения момента достижения порогового значения равна $\Delta t = t_2 - t \approx t - t_1 = \Delta X / \operatorname{tg} \alpha = \Delta X / (dX/dt)$, где ΔX – неопределённость измерений (рис. 1). Эта величина напрямую влияет на величину ущерба.

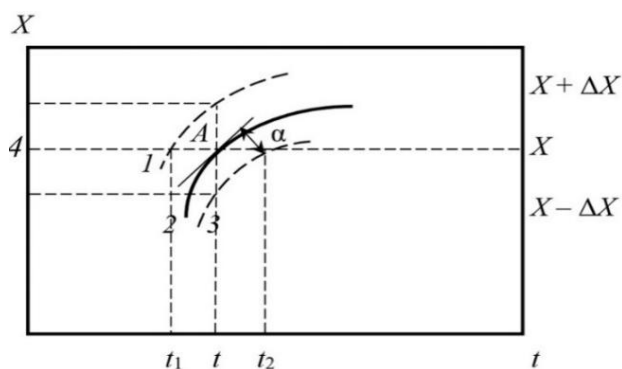


Рис. 1. Обоснование Δt определения наступления заданного значения X

Выделяют два типа ошибок:

- ошибка первого рода: сигнал подаётся до фактического наступления события, что вызывает экономические потери из-за неоправданного запуска реагирования;
- ошибка второго рода: сигнал поступает с опозданием, что увеличивает масштабы последствий ЧС.

В общем случае неопределённость измерения Δ складывается из систематической и случайной составляющих. Поскольку систематические погрешности, как правило, устраняются или учитываются, при оценке риска значимой остаётся лишь случайная составляющая, пропорциональная средней квадратической погрешности (СКП) измерений σ . Неопределённость Δ результата измерений параметра мониторинга равна:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{МВИ}}^2 + \Delta_{\text{пр}}^2 + \Delta_{\text{пп}}^2 + \Delta_{\text{ТСМК}}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{МВИ}}$, $\Delta_{\text{пр}}$, $\Delta_{\text{пп}}$, $\Delta_{\text{ТСМК}}$ – составляющие неопределённости, связанные соответственно с методикой выполнения измерений (МВИ), пробоотбором (ПР), пробоподготовкой (ПП) и ТСМК.

Так как величины $\Delta_{\text{МВИ}}$ и $\Delta_{\text{пр}}$ фиксированы нормативной документацией, уменьшение общей неопределённости достигается за счёт снижения $\Delta_{\text{ТСМК}}$ путём выбора более точных ТСМК и уменьшения $\Delta_{\text{пп}}$ посредством совершенствования или отказа от пробоподготовки.

При ошибке первого рода величина ущерба Y_I определяется как

$$Y_I = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} B_i dt, \quad (2)$$

где B_i – стоимость единицы времени для i -го организационно-технического мероприятия, руб./с;

n – их общее число.

При практическом приближении (интенсивность затрат B_i не зависит от времени, т. е. каждое мероприятие требует примерно одинаковых ресурсов в течение всего периода) получаем

$$Y_I = B_{\Sigma} \Delta t \propto \sigma,$$

где $B_{\Sigma} = \sum B_i$.

Ущерб второго рода Y_{II} является суммой двух слагаемых: ущерба свободной фазы развития аварий, катастроф и иных бедствий (АКБ)/ЧС ($0 \leq t < \Delta t$) Y^1_{II} и ущерба фазы реагирования ($t > \Delta t$) Y^2_{II} :

$$Y^1_{II} = \int_0^{\Delta t} S(t) b^1 dt, \quad (3)$$

$$Y^2_{II} = b^2 S(\Delta t) = b^2 k \pi v^2 \Delta t^2 \propto \sigma^2, \quad (4)$$

где $S = k\pi(v\Delta t)^2$ – площадь распространения АКБ/ЧС на начальной стадии во многих аварийных сценариях (например, пожаре) в условиях отсутствия оперативного вмешательства растёт пропорционально квадрату времени, м² [28];

b^1 – ущерб на единице площади в единицу времени, руб./м²с;

b^2 – агрегирует все дополнительные факторы реагирования, руб./м²с;

v – скорость распространения АКБ/ЧС, м/с.

При практическом приближении (b^1 и v постоянны во времени) получаем $Y^1_{II} = \frac{1}{3}k\pi v^2 b^1 \Delta t^3 \propto \sigma^3$. Вклад свободной фазы развития ($Y^1_{II} \propto \sigma^3$) существенен лишь при крайне быстрых сценариях, где даже секундные задержки критичны. Для большинства промышленных предприятий основной вклад в Y_{II} формируется за счёт $Y^2_{II} \propto \sigma^2$.

Следует отметить, что для объёмных сценариев характерны более высокие порядки зависимости: $Y^1_{II} \propto \sigma^4$, $Y^2_{II} \propto \sigma^3$. В статье в качестве базовой используется двумерная модель распространения поражающих факторов.

Оптимизация параметров эксплуатации полигонов отходов на основе модели техногенного риска. Большинство существующих подходов к оценке ущерба от ЧС ориентированы на разовые, эпизодические инциденты. Однако в социально-экономических и экологических системах последствия ЧС часто развиваются постепенно и накапливаются во времени. Это особенно характерно для полигонов отходов, где аварийные и предаварийные ситуации возникают регулярно, а негативное воздействие на окружающую среду и здоровье населения сохраняется на протяжении длительных периодов. В этих условиях более обоснованной представляется оценка техногенного риска как ожидаемых материальных потерь, формирующихся в течение года в результате реализации техногенных угроз.

Прямое влияние на техногенный риск для полигонов отходов оказывает скорость их накопления $u = dS/dt$. Растущие площади S оказывают дополнительную нагрузку на инфраструктуру хранилищ. Два полигона с одинаковым объёмом, но разной u имеют разный уровень риска: при более высоком темпе быстрее достигаются критические параметры. При стационарной эксплуатации полигона отходов, что характерно для промышленных предприятий, скорость их заполнения обычно является постоянной.

Для этого обоснования взаимосвязи между скоростью накопления отходов (u) и ростом риска использован принцип оптимального распределения финансовых ресурсов, при котором обеспечивается надёжное функционирование объекта и одновременно минимизируются общие затраты, связанные как с предупреждением, так и с устранением последствий возможных аварий. Формализовано задача представляется как [29]:

$$\Phi 1 + \Phi 2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\Phi 1$ – затраты на профилактические мероприятия и обеспечение безопасной эксплуатации полигона, руб.;

$\Phi 2$ – ожидаемые расходы на ликвидацию последствий АКБ/ЧС, руб.

Для произвольного момента времени риск можно выразить через интегральную функцию

$$R(S) = \int_0^S a dS, \quad (6)$$

где a – локальная плотность риска, руб./га.

Если в первом приближении предположить, что условия размещения отходов на всём периоде эксплуатации полигона однородны, то локальная плотность риска становится постоянной:

$$a(S) = A \Rightarrow R(S) = AS, \quad (7)$$

где A – удельный коэффициент риска, руб./га.

Таким образом, риск для полигона можно выразить через скорость наполнения отходов, и представить затраты на безопасность как функцию от этого риска:

$$\Phi 1 = \sum_{i=1}^t \Phi 3_i = \sum_{i=1}^t \Gamma (R/R_0)^{-\gamma} = \Gamma (SA/R_0 t)^{-\gamma} \sum_{i=1}^t i^{-\gamma} = \Gamma (uA/R_0)^{-\gamma} \sum_{i=1}^t i^{-\gamma}, \quad (8)$$

где $\Phi 3_i$ – затраты на безопасность в i -м периоде, руб.;

t – время функционирования полигона, год;

u – скорость накопления отходов, га/год;

R_0 – это нормативный или допустимый уровень риска, установленный для стабильных условий функционирования системы (например, уровень риска в «штатный» период без ЧС), руб.;

Γ – коэффициент чувствительности затрат к уровню риска, определяющий исходный масштаб вложений в систему при базовом риске R_0 , руб.;

γ – показатель чувствительности затрат к уровню риска.

Логика модели Ф1. Зависимость от u . Чем выше u , тем выше текущий риск, и тем больше требуется затрат на меры по обеспечению безопасности.

Обратная степень $(uA/R_0)^{-\gamma}$. Модель закладывает эффект масштаба и эффективности: при умеренной скорости заполнения затраты ниже, при высокой скорости ($u \rightarrow \infty$) затратам нужно расти, чтобы обеспечить безопасность полигона.

Сумма по годам $\sum_{i=1}^t i^{-\gamma}$. Учитывается эффект накопления риска и снижение эффективности инвестиций с течением времени (поддерживать высокий уровень безопасности с каждым годом становится дороже, особенно если скорость u не уменьшается).

Зависимость Ф2 моделируется степенной функцией:

$$\Phi 2 = Bu^d, \quad (9)$$

где B – эмпирический коэффициент пропорциональности, обеспечивающий соответствие размерности ущерба Ф2 и u^d , руб.·(год/га) ^{d} ;

d – показатель степени.

Значения коэффициентов B и d определяются на основе аппроксимации статистических данных, обеспечивающей наилучшее соответствие выражения (9) наблюдаемым значениям Ф2 и u . Так, в работе [29] показано, что для 15 полигонов ТКО Московской области на основе анализа статистических данных уравнение зависимости Ф2 от u имеет вид: $\Phi 2 = Bu^{0.7}$, где $B = 2 \cdot 10^9$ руб.·(год/га)^{0.7}.

Логика модели Ф2. Степенная зависимость отражает непропорциональный рост ущерба при достижении критических скоростей накопления, чувствительность объекта к превышению допустимых параметров. При умеренном накоплении объект находится в квазибезопасном режиме, но при резком росте u даже небольшое увеличение объёма может вызвать непредсказуемый каскадный эффект, что оправдывает использование $d > 1$.

Таким образом, оптимальная скорость накопления отходов $u_{\text{опт}}$ определяется как решение задачи компромисса между затратами на безопасность и ущербом от АКБ/ЧС, и может быть рассчитана из уравнения $\partial(\Phi_1 + \Phi_2) / \partial u = 0$

$$u_{\text{опт}} = \left(\frac{\gamma \Gamma \sum_{i=1}^t i^{-\gamma}}{dB \left(\frac{A}{R_0} \right)^{\gamma}} \right)^{\frac{1}{d+\gamma}}, \quad (10)$$

при этом аналитическое выражение для оптимального значения риска имеет вид:

$$R_{\text{опт}} = A u_{\text{опт}} t = A \left(\frac{\gamma \Gamma \sum_{i=1}^t i^{-\gamma}}{dB \left(\frac{A}{R_0} \right)^{\gamma}} \right)^{\frac{1}{d+\gamma}} t. \quad (11)$$

В дополнение к экономико-динамическому подходу в рамках оценки риска эксплуатации полигона отходов целесообразно использовать бюджетно-статистическую модель, основанную на анализе фактических затрат:

$$R = Z_{\text{бп}}(1 - m/n), \quad (12)$$

где $Z_{\text{бп}}$ – плановые затраты на эксплуатацию объекта при отсутствии аварийных ситуаций, руб.;

m – количество периодов (например, лет), в течение которых эксплуатация велась без инцидентов;

n – общее количество бюджетных периодов.

Риск в данной модели интерпретируется как доля недополученной бюджетной эффективности, возникающей вследствие техногенных происшествий. Чем меньше m по отношению к n , тем чаще возникают инциденты, и тем выше совокупный ущерб – как прямой (ремонт, компенсации), так и косвенный (простой, санкции, экологические платежи).

Из (11) и (12) получено выражение для оптимального времени $t_{\text{опт}}$ функционирования полигона отходов:

$$t_{\text{опт}} = \frac{Z_{\text{бп}}(1 - \frac{m}{n})}{A \left(\frac{\gamma \Gamma \sum_{i=1}^t i^{-\gamma}}{dB \left(\frac{A}{R_0} \right)^{\gamma}} \right)^{\frac{1}{d+\gamma}}}. \quad (13)$$

Как только время эксплуатации полигона достигает $t_{\text{опт}}$, необходимо принятие управленческого решения о переходе к активной утилизации или переработке отходов. С этого момента дальнейшее размещение отходов становится экономически нецелесообразным. Кроме того, при известной производительности установок по переработке отходов, полученное значение оптимального срока функционирования полигона $t_{\text{опт}}$ может быть использовано как основной параметр для обоснования решений в области планирования и управления.

Принципы построения системы ТС для риск-ориентированного предупреждения ЧС:

1. Комплексная интеграция источников техногенного риска: мониторинг и контроль параметров производственного процесса и управление обращением с отходами рассматривают как взаимосвязанные компоненты единой системы обеспечения промышленной безопасности.

2. Метрологическая обусловленность техногенного риска: риск зависит от качества результатов измерений, получаемых в ходе мониторинга. Ошибки первого и второго рода напрямую связаны с величиной неопределённости измерений. Следовательно, выбор ТСМК должен исходить из требований к СКП, а не только из бюджета или стандарта.

3. Функциональная зависимость между СКП и потенциальным ущербом: ущерб первого рода $Y_I \propto \sigma$, второго рода – $Y_{II} \propto \sigma^2$.

4. Пропорциональное распределение финансовых ресурсов по источникам риска: финансовые ресурсы на предупреждение и компенсацию ущерба от возможных АКБ/ЧС должны быть распределены в соответствии с величиной ожидаемого риска, возникающего на соответствующем участке (в технологическом процессе или при обращении с отходами).

5. Своевременное внедрение ТС для переработки отходов: результативность мероприятий по переработке и утилизации отходов определяется не только производственной мощностью соответствующих систем, но и сроками их ввода в эксплуатацию, который определяется на основании темпов накопления отходов и параметров риска.

Выводы. Разработана концепция риск-ориентированной системы ТС для предупреждения ЧС, включающая взаимосвязанное рассмотрение мониторинга технологического процесса и обращения с отходами. В её основе – структурно-функциональный подход, увязывающий параметры источников техногенного риска, характеристики ТС, модели оценки ущерба и управленческие решения в единую архитектуру риск-ориентированного управления.

В результате проведённого анализа впервые получена математическая зависимость потенциального ущерба от СКП ТСМК. Установлено, что при фиксированной структуре сценария ЧС величина ущерба возрастает по квадратичному (а в ряде случаев по кубическому) закону при увеличении СКП. Это позволяет формализовать критерий «ущерб – СКП» и использовать его в качестве обоснования для выбора и модернизации систем мониторинга с учётом как технических, так и экономических показателей.

Установлена функциональная взаимосвязь между техногенным риском и скоростью накопления отходов. Введена модель, позволяющая определять оптимальную скорость наполнения полигона и срок ввода в эксплуатацию установок по переработке отходов с учётом соотношения затрат на предотвращение и компенсацию ущерба.

Предложен набор новых принципов оценки и управления техногенными рисками.

Предложенная система количественных оценок и методологических принципов создаёт основу для перехода к более точному и экономически обоснованному управлению рисками ЧС в промышленности, что делает концепцию

востребованной как для предприятий, так и для органов государственного регулирования в сфере безопасности и экологии.

Список литературы / References

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году». – М.: МЧС России, 2024. – URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343?ysclid=lvz3yp3ey5194253142> (дата обращения: 01.09.2025).

[State Report «On the State of Protection of the Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Technogenic Emergencies in 2023»]. Moscow: EMERCOM of Russia, 2024. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343?ysclid=lvz3yp3ey5194253142> (accessed: 01.09.2025). (In Russian)

2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году». – М.: МЧС России, 2023. – URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god?ysclid=lvz44p2t2t931101996> (дата обращения: 01.09.2025).

[State Report «On the State of Protection of the Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Technogenic Emergencies in 2022»]. Moscow: EMERCOM of Russia, 2023. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (accessed: 01.09.2025). (In Russian)

3. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году». – М.: МЧС России, 2022. – URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2021-god> (дата обращения: 01.09.2025).

[State Report «On the State of Protection of the Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Technogenic Emergencies in 2021»]. Moscow: EMERCOM of Russia, 2022. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2021-god> (accessed: 01.09.2025). (In Russian)

4. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году». – М.: МЧС России, 2021. – URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2020-god> (дата обращения: 01.09.2025).

[State Report «On the State of Protection of the Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Technogenic Emergencies in 2020»]. Moscow: EMERCOM of Russia, 2021. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2020-god> (accessed: 01.09.2025). (In Russian)

5. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году». – М.: МЧС России, 2020. – URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2019> (дата обращения: 01.09.2025).

[State Report «On the State of Protection of the Population and Territories of the Russian Federation from Natural and Technogenic Emergencies in 2019»]. Moscow: EMERCOM of Russia, 2020. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2019> (accessed: 01.09.2025). (In Russian)

6. Методика по организации деятельности в территориальных органах МЧС России по реализации Основ государственной политики Российской Федерации в области гражданской обороны до 2030 года. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) МЧС России, 2017. – 157 с.

Metodika po organizatsii deyatelnosti v territorial'nykh organakh MCHS Rossii po realizatsii Osnov gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v oblasti grazhdanskoy oborony do 2030 goda. Moscow: VNII GOChS, 2017, 157 p. (In Russian)

7. Быков, А. И. О проблемах техногенного риска, безопасности техносферы и технологическом будущем: взгляды, идеи и мысли академика В. А. Легасова / А. И. Быков // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 73–89. – EDN OJWKPJ

Bykov, A. I. *O problemakh tekhnogennogo riska, bezopasnosti tekhnosfery i tekhnologicheskoy budushchem: vzglyady, idei i mysli akademika V.A. Legasova*. Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya, 2011, no. 1(1), pp. 73-89. EDN OJWKPJ (In Russian)

8. Фурсова, Т. В. Износ основных фондов на предприятиях России как проблема реализации программы импортозамещения / Т. В. Фурсова, К. В. Фатеев // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. – 2024. – № 1. – С. 209–216. DOI:10.52210/2224669X_2024_1_209

Fursova, T. V., Fateev, K. V. [Depreciation of fixed assets at Russian enterprises as a problem in the implementation of the import substitution program]. Herald of the Moscow University of Finances and Law MFUA, 2024, no. 1, pp. 209-216. DOI:10.52210/2224669X_2024_1_209 (In Russian)

9. Кудреватых, Н. В. Экономическая безопасность региона: учебное пособие для студентов / Н. В. Кудреватых. – СПб. : ИЦ Интермедия, 2016. – 168 с.

Kudrevatykh, N. V. [Economic security of the region: Textbook for students]. St. Petersburg: Intermedia Publ., 2016, 168 p. (In Russian)

10. Гуменюк, В. И. Радиационная, химическая и биологическая безопасность / В. И. Гуменюк, В. Н. Ломасов. – СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет, 2016. – 347 с.

Gumenyuk, V. I., Lomasov, V. N. [Radiation, chemical and biological safety]. St. Petersburg: Saint Petersburg Polytechnic University Publ., 2016, 347 p. (In Russian)

11. Акимов, В. А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

Akimov, V. A., Lesnykh, V. V., Radaev, N. N. [Fundamentals of risk analysis and management in natural and man-made spheres]. Moscow: Delovoy Express, 2004, 352 p. (In Russian)

12. Рауфов, Р. Н. История и развитие Рогунской ГЭС / Р. Н. Рауфов, Х. Ф. Наимов, Л. С. Кулматова // Проблемы науки. – 2019. – № 4 (40). – С. 65–69. – EDN NRZZAU.

Raufov, R. N., Naimov, Kh. F., Kulmatova, L. S. *Istoriya i razvitiye Rogunskoy GES* [History and development of the Rogun HPS]. Problems of Science, 2019, no. 4 (40), pp. 65-69. (In Russian)

13. Блоков, И. П. Накопленный вред окружающей среде: разрушения здоровья и бюджетов / И. П. Блоков, О. Ю. Таргулян, Е. И. Усов. – М. : Greenpeace Russia, 2020. – 61 с.

Blokov, I. P., Targulyan, O. Yu., Usov, E. I. [Accumulated environmental damage: harm to health and budgets]. Moscow: Greenpeace Russia Publ., 2020, 61 p. (In Russian)

14. Barateiro, J., Antunes G., Borbinha J. Managing risk through the enterprise architecture. 45th Hawaii International Conference on System Sciences. 2012 – URL: https://www.researchgate.net/publication/254051828_Manage_Risks_through_the_Enterprise_Architecture (accessed: 01.09.2025). DOI:10.1109/HICSS.2012.419 (In English)

15. Yadav, G., Paul, K. Architecture and security of SCADA systems: a review. International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2021. Vol. 34. 100433. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874548221000251> (accessed: 01.09.2025). DOI: 10.1016/j.ijcip.2021.100433 (In English)

16. Kayan, H., Nunes, M., Rana, O., Burnap, P., Perera, C. Cybersecurity of industrial cyber-physical systems: a review. arXiv:2101.03564. 2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2101.03564> (accessed: 01.09.2025). (In English)

17. Zerdazi, I., Fezari, M., Mokhtar, B., Bayart, M. Evolution and Vulnerability in SCADA Systems. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/345497237_Evolution_and_Vulnerability_in_SCADA_Systems (accessed: 01.09.2025). (In English)

18. Арефьева, Е. В. Оценка техногенного риска на основе интегрального индекса / Е. В. Арефьева, А. В. Рыбаков, С. Б. Арифджанов // Новости науки Казахстана. – 2018. – № 1 (135). – С. 30–42. – EDN UPHAXE.

Arefyeva, E. V., Rybakov, A. V., Arifdzhanov, S. B. [Assessment of technogenic risk based on an integral index]. News of Kazakhstan Science, 2018, no. 1 (135), pp. 30-42. EDN UPHAXE. (In Russian)

19. Комплексная оценка риска возникновения аварии на опасных производственных объектах на основе аппарата нечётких множеств и логико-вероятностного подхода / А. В. Рыбаков, А. Д. Сорокин, В. В. Кочетков, Е. В. Арефьева // Проблемы анализа риска. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 18–25. – EDN YQLIJT.

Rybakov, A. V., Sorokin, A. D., Kochetkov, V. V., Arefyeva, E. V. [Comprehensive risk assessment of accidents at hazardous industrial facilities based on fuzzy set theory and the logic-probabilistic approach]. Problems of Risk Analysis, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 18-25. EDN YQLIJT. (In Russian)

20. Рыбаков, А. В. Технология прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера на пожаровзрывоопасных объектах: монография / А. В. Рыбаков. – М. : Изд-во Российского гос. социального ун-та, 2017. – 297 с.

Rybakov, A. V. [Technology for forecasting technogenic emergencies at fire and explosion hazardous facilities: Monograph]. Moscow: Russian State Social University Publ., 2017, 297 p. (In Russian)

21. Воскобоев, В. Ф. Методика обоснования рациональных параметров технических средств контроля технологического процесса предприятия / В. Ф. Воскобоев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 4 (55). – С. 66–72. – EDN ZVXOLL

Voskoboyev, V. F. [Methodology for substantiating the rational parameters of technical means for enterprise process control]. Scientific and Educational Problems of Civil Protection, 2022, no. 4 (55), pp. 66-72. EDN ZVXOLL (In Russian)

22. Быков, А. А. Статистические методы прогнозирования риска чрезвычайных ситуаций: монография / А. А. Быков. – М. : Анкил, 2014. – 155 с.

Bykov, A. A. [Statistical methods for forecasting the risk of emergencies: Monograph]. Moscow: Ankil Publ., 2014, 155 p. (In Russian)

23. Яковлев, В. В. Экологическая безопасность, оценка риска: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. В. Яковлев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 501 с.

Yakovlev, V. V. [Environmental safety and risk assessment: Textbook for university students]. St. Petersburg: Polytechnic University Publ., 2008, 501 p. (In Russian)

24. Ваганов, П. А. Экологические риски: учебное пособие / П. А. Ваганов, Им Ман-Сунг. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2001. – 152 с.

Vaganov, P. A., Im Man-Sung. [Environmental risks: Textbook]. St. Petersburg: Saint Petersburg State University Publ., 2001, 152 p. (In Russian)

25. Зыков, В. И. Математическая модель комплексной системы мониторинга пожарной безопасности объектов энергетики / В. И. Зыков, Д. Е. Журавлев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 2. – С. 9–15. DOI: 10.25257/FE.2019.2.9-15

Zykov, V. I., Zhuravlev, D. E. [Mathematical model of an integrated fire safety monitoring system for energy facilities]. Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2019, no. 2, pp. 9-15. DOI: 10.25257/FE.2019.2.9-15 (In Russian)

26. Пузач, С. В. Развитие математического моделирования динамики опасных факторов пожара / С. В. Пузач // Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. – М. : АГПС МЧС России, 2024. – С. 287–291. EDN YYCLDT

Puzach, S. V. [Development of mathematical modeling of the dynamics of hazardous fire factors]. In Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 90th Anniversary of the Establishment of the Academy of State Fire Service of the EMERCOM of Russia. Moscow: AGPS EMERCOM of Russia Publ., 2024, pp. 287-291. EDN YYCLDT (In Russian)

27. Метод оценки достоверности количественного анализа риска на объектах нефтегазовой отрасли / А. В. Матвеев, А. В. Максимов, О. В. Щербаков, А. С. Смирнов // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 1. – С. 35–49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.35-49

Matveev, A. V., Maksimov, A. V., Shcherbakov, O. V., Smirnov, A. S. [Method for assessing the reliability of quantitative risk analysis at oil and gas industry facilities]. Fire and Explosion Safety, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 35-49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.35-49 (In Russian)

28. Рашоян, И. И. Физико-химические основы развития и тушения пожара: учебное пособие / И. И. Рашоян. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 107 с.

Rashoyan, I. I. [Physical and chemical principles of fire development and extinguishing: a textbook]. Tolyatti: Togliatti State University Publ., 2013, 107 p. (In Russian)

29. Экологический риск и оптимальное время функционирования полигонов твердых коммунальных отходов / С. А. Гарелина, М. В. Глубоков, К. П. Латышенко, А. И. Мазаник // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 6. – С. 20–26. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-6-20-26. – EDN DXIQMD.

Garelina, S. A., Glubokov, M. V., Latyshenko, K. P., Mazanik, A. I. [Environmental risk and optimal operation time of the solid municipal waste landfills]. Occupational Safety in Industry, 2022, no. 6, pp. 20-26. DOI 10.24000/0409-2961-2022-6-20-26. – EDN DXIQMD. (In Russian)

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 08.10.2025*

*Svetlana Aleksandrovna Garelina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Professor of the Department;
e-mail: s.garelina@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: 8(498)699-05-59*

THE CONCEPT OF A RISK-ORIENTED SYSTEM OF TECHNICAL MEANS FOR THE PREVENTION OF EMERGENCIES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Objective. To reduce man-made risk at industrial enterprises through the substantiation of parameters of an integrated system of technical means that combines process monitoring and waste processing within a risk-oriented approach.

Methods. The study employs a system approach, which considers the enterprise as an integrated set of interrelated elements. The metrological characteristics of monitoring and control instruments are analyzed in conjunction with waste-processing parameters within a quantitative risk assessment model. Mathematical modeling is applied to establish the relationship between measurement uncertainty and potential damage, as well as to substantiate rational landfill operation periods and the optimal timing for initiating waste processing under resource constraints.

Results. Analytical relationships have been obtained linking measurement uncertainty (root mean square error) with the delay in detecting a threshold state and the estimation of potential damage. The asymmetry of the consequences of Type I and Type II errors has been substantiated: false alarms lead

to excessive costs, while missed hazardous events result in increased damage due to the development of accident scenarios. A «damage–root mean square error» criterion has been formulated to justify the accuracy requirements for monitoring and control systems. A model of annual technogenic risk for waste disposal sites has been proposed, in which the risk is expressed through the waste accumulation rate and the disposal area. Based on a compromise function of prevention and damage compensation costs, the existence of an optimum has been demonstrated, and conditions have been derived for calculating optimal parameters – including landfill operation time and the initiation moment of waste processing – under specified initial data and resource constraints.

Scientific novelty. For the first time, the «damage – root mean square error» criterion is proposed for the quantitative assessment of the influence of metrological characteristics on risk levels. A concept is developed for integrating monitoring and waste processing into a unified system of technical means for the prevention of man-made emergencies at industrial enterprises. A model has been formed for optimizing landfill operation periods and the initiation of waste processing, taking into account integral risk and resource limitations. This makes it possible to shift from fragmented solutions to a holistic risk-oriented management of industrial safety.

Practical value. The practical significance of the proposed approach lies in its applicability for substantiating financial decisions, developing programs to enhance industrial safety, and selecting priority directions for the modernization of technical infrastructure at high-risk facilities. This is particularly relevant under conditions of limited budgets and strict environmental regulations.

Keywords: *risk-oriented approach; emergency prevention; industrial safety; measurement uncertainty; waste processing; monitoring and control instruments; quantitative risk assessment; material damage.*

For citation: Garelina S. A. The concept of a risk-oriented system of technical means for the prevention of emergencies at industrial enterprises. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 88-100. EDN GHKFHX

УДК [614.891.1:62-712]:614.873.24

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, д. 28. Тел.: +7 (3842) 39-63-70

ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЗАЩИТНЫЕ КАСКИ

Цель. Исследовать процессы воздействия повышенных температур на человека при выполнении технологических операций на химическом производстве для повышения эффективности управления тепловой нагрузкой путем применения интегрированных вентиляционных систем в защитные каски и оценки преимущества и потенциала внедрения вентиляторов в каски для активного отвода тепла.

Методы. Исследование базируется на современных представлениях о процессах, происходящих с работником при производстве работ в условиях повышенной температуры и влажности, оценке условий трудовой деятельности при проведении специальной оценки условий труда на рабочих местах, выявлении вредных и опасных факторов производственной среды и трудового процесса.

Результаты. Проведенные исследования позволили разработать интегрированную в каску фронтальную и тыльную вентиляционную систему.

Научная новизна. Предлагаемый авторами новый технический подход снижения тепловой нагрузки на голову является инновационным решением в области совершенствования и создания новых современных средств индивидуальной защиты, позволяющий снизить риски общих и профессиональных заболеваний работников и производственного травматизма, создать более комфортные условия труда.

Практическая значимость. Предлагаемая конструкция средства индивидуальной защиты головы – защитная каска не только обеспечивает защиту от внешних воздействий, но и предотвращает тепловой стресс, позволяет управлять тепловой нагрузкой, обеспечивает комфортные и безопасные условия труда на предприятиях химической промышленности, повышать безопасность и эффективность производства, сохранять жизнь и здоровье персонала.

Ключевые слова: защитные каски; СИЗ; технологии вентиляции; тепловой стресс; температурный режим; эффективность и безопасность труда.

Для цитирования: Фомин А. И., Копытов А. И., Михайлов В. Г., Рафиков Р. Р. Внедрение интегрированных вентиляционных систем в защитные каски // Научный вестник НИИ «Респиратор» – 2025. – № 4 (62). – С. 101–108. – EDN NXRDMD

Постановка проблемы. В современных условиях перед химической промышленностью Российской Федерации стоят задачи развития и повышения стандартов безопасности, что в свою очередь создает необходимость в инновационных решениях, направленных на обеспечение максимальной безопасности и комфорта для работников [1].

Кемеровская область – Кузбасс представлен различными отраслями экономики и является крупнейшим промышленно развитым регионом, в то же время показатели общей, профессиональной заболеваемости и травматизма остаются на высоком уровне. Показатели профессиональной заболеваемости на 10 тыс.

работающих в 8 раз превышают общероссийский показатель (2024 г.: РФ – 0,89; Кузбасс – 7,11 случаев).

Каски, являясь одним из основных средств индивидуальной защиты (СИЗ) в химической промышленности, играют ключевую роль в обеспечении безопасности работников. Учитывая разнообразие опасностей, с которыми сталкиваются работники химических производств, каски защищают от:

- механических воздействий – каски предотвращают травмы головы, вызванные падением объектов, ударами или столкновениями; в условиях химических производств, где часто используются тяжелые и острые предметы, этот аспект становится крайне важным;
- химических веществ – специальные материалы и покрытия на касках обеспечивают защиту от химических веществ, предотвращая их проникновение в организм через кожу головы;
- перегрева – каски могут иметь термическую изоляцию для предотвращения ожогов от горячих поверхностей или воздушных потоков;
- электрических ударов – некоторые каски предназначены для защиты от электрических ударов в условиях, где присутствует электрическое оборудование.

Современные каски обладают эргономичным дизайном для обеспечения долгосрочного комфорта работников. Таким образом, каски являются неотъемлемой частью средств индивидуальной защиты человека, обеспечивая комплексную защиту от различных опасностей и способствуя общей безопасности труда на предприятии.

Анализ последних исследований. Требования к защитным каскам устанавливаются ГОСТ 12.4.207-99 «ССБТ. Каски защитные». Все защитные каски должны иметь соответствующие защитные, эксплуатационные и санитарно-гигиенические свойства.

К защитным свойствам относятся устойчивость к проникновению острых падающих предметов, степень амортизации удара, устойчивость к агрессивным средам, наличие вертикального безопасного зазора до и в момент удара, горючесть, электропроводность.

Испытания касок на амортизацию энергии удара проводят на специальном стенде (рис. 1) вертикальным ударом энергией не менее 50 Дж (для облегченной каски – не менее 20 Дж). При этом усилие, переданное на макет головы, не должно превышать 5 кН.

Современные каски состоят из корпуса и внутренней оснастки. Корпус (или колпак) – главная часть каски, несущая основную нагрузку при выполнении каской ее защитных функций. Корпус может быть с козырьком или широкими полями, с желобчатыми полями или без них, а для большей прочности на корпусе могут быть ребра жесткости (рис. 2).

Внутренняя оснастка – это сборная конструкция, предназначенная для фиксации каски на голове, поглощения кинетической энергии, возникающей при ударе, и распределения усилия по поверхности головы. Включает амортизатор, несущую и затылочную ленты.

В ряде касок для усиления подкасовой вентиляции в боках корпуса делают отверстия, при необходимости прикрываемые специальными пластинками [2].

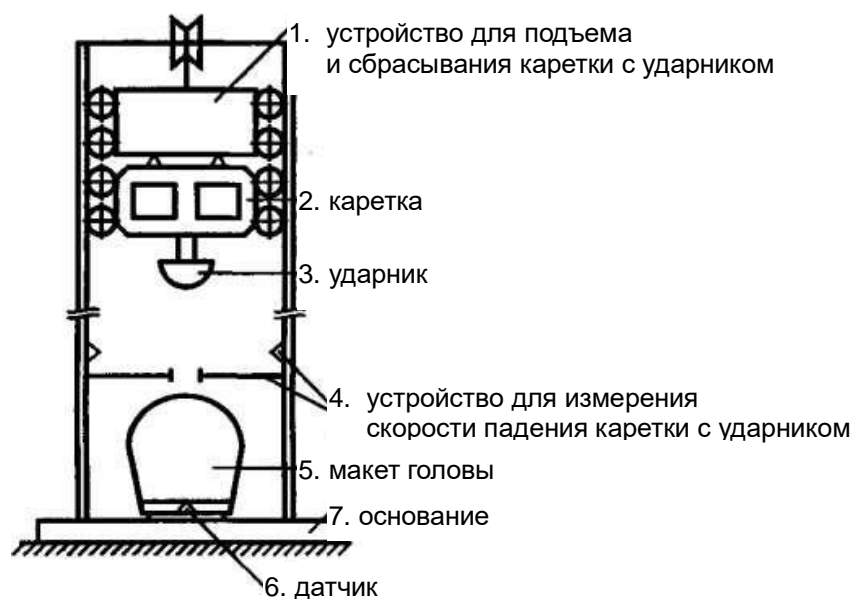


Рис. 1. Схема стенда для испытания защитных касок на амортизацию

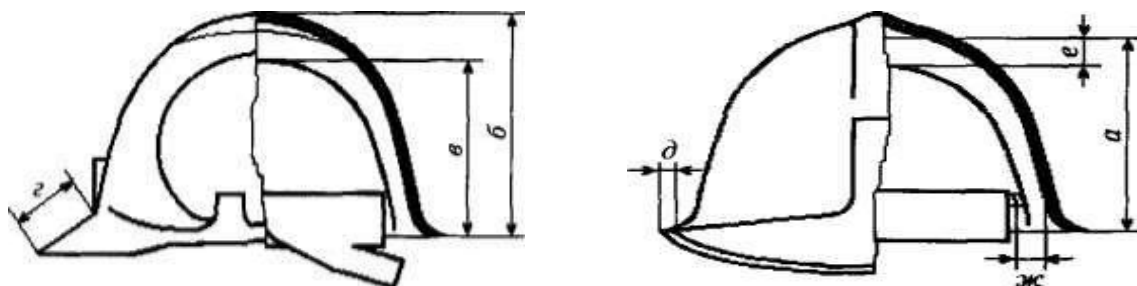


Рис. 2. Корпус каски

a – высота корпуса без учета ребра жесткости; b – высота корпуса с ребром жесткости;
 $в$ – глубина внутренней оснастки; $г$ – ширина козырька; $д$ – ширина полей;
 $е$ – вертикальный безопасный зазор; $жс$ – кольцевой зазор

Одним из насущных вопросов повышения комфорта и безопасности при использовании защитных касок является эффективное управление тепловой нагрузкой, особенно в условиях повышенных температур и влажности, с которыми в процессе своей деятельности сталкиваются работники химических производств, оперативные сотрудники аварийно-спасательных подразделений.

Цель исследования. Исследовать процессы воздействия повышенных температур на человека при выполнении технологических операций на химическом производстве для повышения эффективности управления тепловой нагрузкой путем применения интегрированных вентиляционных систем в защитные каски и оценки преимущества и потенциала внедрения вентиляторов в каски для активного отвода тепла.

Результаты исследований. Химические производства представляют собой сложные преобразования веществ, насыщенные различными технологическими процессами, где работники подвергаются воздействию высоких температур и влажности. Эти условия могут привести к ряду проблем, включая тепловой стресс, дезориентацию и снижение производительности. Для эффективной защиты

работников необходимо разработать интегрированные подходы, учитывающие особенности химической промышленности [3].

При проведении данного исследования в производственных помещениях на рабочих местах выявлены превышения допустимых нормативных величин показателей микроклимата при выполнении работниками технологических операций. Результаты проведенных замеров показали, что на отдельных рабочих местах температура доходит до 25–26 °С при относительной влажности до 60–80 %.

Повышенная температура окружающей среды негативно сказывается на здоровье работников и безопасности труда, а избыточное накопление тепла способствует быстрому повышению температуры организма, изменению ЦНС, приводящим к нарушению терморегуляции (тепловому удару), обезвоживанию, тепловому истощению и судорогам. Особенно это проявляется у молодых работников. В результате длительного воздействия повышенных температур развивается заболевание сердечно-сосудистой системы. При воздействии нагревающего микроклимата отдача тепла затруднена, а при увеличении тяжести трудового процесса происходит его накопление, развивается тахикардия во время выполнения технологических операций, увеличиваются энергозатраты и теплопотери за рабочую смену, повышается риск производственного травматизма. Продолжительное воздействие нагревающего микроклимата способствует развитию таких заболеваний как: артериальная гипертензия, вегетососудистая дистония, ишемическая болезнь сердца.

Средства индивидуальной защиты, которые покрывают голову или другие части тела работников, создают барьер для естественного отвода выделяемого телом тепла, образующегося в результате физической активности и (или) в условиях повышенных температур и влажности, что может привести к ряду негативных последствий – дискомфорт при выполнении рабочих процессов, нарушение теплообмена, и как следствие – угроза для здоровья [4].

Вследствие перегрева организма могут возникнуть головокружение, утомление, дезориентация, тошнота, потеря сознания и нарушение жизненно важных функций. В сочетании с высокой температурой химические испарения и испарения воды создают дополнительный тепловой стресс, что в экстремальных случаях может привести к фатальным последствиям [5]. В таблице представлены данные влияния относительной влажности воздуха на ощущаемую действующую температуру.

Организм работника вынужден регулировать свою температуру в условиях повышенной жары и влажности, что может привести к быстрой потере жидкости из-за интенсивной работы систем терморегуляции [6].

Одним из перспективных инновационных технических решений по обеспечению комфорта и безопасности работников на химических производствах является интеграция вентиляционных систем в конструкцию защитных касок.

Внутренние механизмы такой системы включают в себя вентиляторы и воздушные каналы, обеспечивающие непрерывное движение воздуха вокруг головы работника и регулирование температуры, предотвращая перегрев и обеспечивая комфорт в течение всего рабочего дня. При этом интегрированные вентиляционные системы могут быть как фронтальными, так и тыльными (рис. 3).

Интеграция вентиляционных систем в каски является компромиссом между обеспечением безопасности работников и созданием комфортных условий труда. Это техническое решение спроектировано таким образом, чтобы не только обеспечивать эффективную защиту от внешних воздействий, но и создавать безопасные условия работы в зонах повышенной температуры и влажности.

Таблица

Влияние относительной влажности воздуха
на ощущаемую действующую температуру

Температура воздуха (°C)	Относительная влажность воздуха, %																		
	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
24	20,5	21,0	22,0	22,5	22,5	23,0	23,0	24,0	24,0	24,5	25,0	25,0	25,0	25,5	25,5	26,0	26,0	27,0	
26,5	23,0	24,0	25,0	25,5	26,0	26,0	26,5	27,0	27,0	28,0	29,5	29,5	30,0	30,0	30,5	31,0	31,5	33,0	
29,5	25,5	26,5	28,0	29,0	29,5	30,0	31,0	31,5	32,0	32,5	34,0	34,0	35,0	36,0	37,0	39,0	41,0	46,0	
32	28,0	29,5	32,5	32,5	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0	38,0	39,0	41,0	43,0	45,0	47,5	50,0			
35	30,5	32,0	34,0	36,0	38,5	40,0	42,0	43,5	46,0	48,5	54,5	54,5	58,0						
38	33,0	35,0	37,0	40,0	42,0	43,5	46,0	49,0	52,5	56,0	62,5	62,5							
40,5	35,0	38,0	40,5	45,0	48,0	51,0	54,0	57,5	61,0	65,0									
43,3	37,0	40,5	44,5	51,0	54,5	58,5	62,0	66,0											
46,1	39,5	44,0	49,0	58,5	62,0	66,0													
48,9	41,5	46,6	54,5	64,5															

Примечание. Цветная заливка показывает диапазон температуры при соответствующем уровне влажности:

- красная – тепловой удар близок (ощущаемая температура – более 54,5 °C);
- оранжевая – тепловой удар вероятен (ощущаемая температура – от 40,5 до 54,5 °C);
- желтая – тепловой удар возможен (ощущаемая температура – от 32,5 до 40,5 °C).



Рис. 3. Интегрированная в каску вентиляционная система:
а) фронтальная; б) тыльная

Это техническое решение спроектировано таким образом, чтобы не только обеспечивать эффективную защиту от внешних воздействий, но и создавать безопасные условия работы в зонах повышенной температуры и влажности.

Внедрение интегрированных вентиляционных систем в защитные каски способствует эффективному управлению тепловой нагрузкой: постоянное движение воздуха содействует процессу отвода тепла от головы работника, предотвращая возможные негативные последствия теплового стресса, что особенно важно в ситуациях, когда традиционные средства индивидуальной защиты могут ограничивать естественные механизмы охлаждения [3, 7, 8].

Это техническое решение представляет собой инновационный шаг в области средств индивидуальной защиты работников, учитывая особенности работы на химических производствах.

Выводы. Подход к защите рабочего персонала на химических производствах является ключевым компонентом стратегии повышения общей производительности трудового коллектива.

Предлагаемое техническое решение представляет собой шаг вперед в вопросах обеспечения безопасных и комфортных условий труда. Интеграция вентиляционных систем в защитные каски не только эффективно управляет тепловой нагрузкой, предотвращая тепловой стресс, но и обеспечивает непрерывный комфорт для работников предприятий химической промышленности в условиях повышенных температур и влажности.

Список литературы / Reference

1. Арсеньев, Ю. Н. Менеджмент качества, эффективности и безопасности деятельности / Ю. Н. Арсеньев, В. С. Минаев, М. А. Алимов. – Тула : Тульский государственный университет, 2018. – 228 с. – ISBN 978-5-7679-4001-1.

Arsenyev, Yu. N., Minaev, V. S., Alimov, N. A. *Menedzhment kachestva, effektivnosti i bezopasnosti deyatel'nosti* [Management of quality, efficiency and safety of activities]. Tula, Tula State University Publ., 2018, 228 p. – ISBN 978-5-7679-4001-1 (In Russian)

2. Особенности определения эксплуатационных показателей пожарных касок и предложения по их улучшению / С. М. Дымов, В. И. Логинов, М. В. Вищекин, Д. Ю. Русанов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 185–190.

Dymov, S. M., Loginov, V. I., Vishchekin, M. V., Rusanov, D. Yu. [Determination of the operating characteristics of firefighters helmets and suggestions for their improvement]. Journal of Civil Protection, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 185-190. (In Russian)

3. Правдин, Б. А. Производственная безопасность оборудования и высокотемпературных технологических процессов / Б. А. Правдин, Е. Е. Минликаева, Н. В. Якшина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2020. – 76 с.

Pravdin, B. A., Minlikaeva, E. E., Yakshina, N. V. *Proizvodstvennaya bezopasnost oborudovaniya i vysokotemperaturnykh tehnologicheskikh processov* [Industrial safety of equipment and high-temperature technological processes]. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 2020, 76 p. (In Russian)

4. Кукин, П. П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда) / П. П. Кукин, В. Л. Лапин, Н. Л. Пономарев – М. : Высшая школа, 2007. – 335 с.

Kukin, P. P., Lapin, V. L., Ponomarev, N. L. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti. Bezopasnost tehnologicheskikh processov i proizvodstv (Okhrana truda)* [Life safety. Safety of technological processes and productions (Labor protection)]. Moscow, Higher school Publ., 2007, 335 p. (In Russian)

5. Литвицкий, П. Ф. Нарушения теплового баланса организма: гипертермия, гипертермические реакции, тепловой удар, солнечный удар / П. Ф. Литвицкий // Вопросы современной педиатрии. – 2010. – Т. 9, № 1. – С. 96–102.

Litvitskiy, P. F. [Alteration of thermal balance: hyperthermia, hyperthermic reactions, heat stroke, and sunstroke]. *Current Pediatrics*, 2010, no. 1 (9), pp. 96-102. (In Russian)

6. Павлова, Т. В. Влияние теплового стресса на физическую и психическую работоспособность в экстремальных ситуациях / Т. В. Павлова, В. А. Марковская // Проблемы правоохранительной деятельности. – 2017. – № 4. – С. 34-38.

Pavlova, T. V., Markovskaya, V. A. [Influence of thermal stress on physical and psychic working efficiency in extreme situations]. *Problems of law-enforcement activity*, 2017, no. 4, pp. 34-38. (In Russian)

7. Васяйчева, В. А. Исследование эффективности обеспечения безопасности труда на предприятии / В. А. Васяйчева, С. А. Иванушкина // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2023. – Т. 14, № 4. – С. 22-28. DOI : 10.18287/2542-0461-2023-14-4-22-28

Vasyaycheva, V. A., Ivanushkina, S. A. [Research into the effectiveness of occupational safety at an enterprise]. *Vestnik of Samara University. Economics and Management*, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 22-28. DOI: 10.18287/2542-0461-2023-14-4-22-28 (In Russian)

8. Макаров, В. М. Необходимость обработки шлем-касок пожарных огнезащитными покрытиями / В. М. Макаров // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. – 2024. – № 2 (14). – С. 62–64. DOI : 10.34987/2712-9233.2024.53.88.012

Makarov, V. M. [The need to treat firefighters' helmets with fire-resistant coatings]. *Actual problems of safety In the technosphere*. 2024, no. 2 (14), pp. 62-64. DOI : 10.34987/2712-9233.2024.53.88.012 (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 16.10.2025

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: mv.g.eohp@kuzstu.ru

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

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

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

INTRODUCTION OF INTEGRATED VENTILATION SYSTEMS INTO PROTECTIVE HELMETS

Objective. To investigate the processes of the effect of elevated temperatures on a person when performing technological operations in a chemical production and to improve the efficiency of heat load management by applying integrated ventilation systems in protective helmets and to evaluate the advantages and potential of introducing fans in helmets for active heat dissipation.

Methods. The study is based on modern ideas about the processes that occur to an employee when performing work in conditions of high temperature and humidity, assessing the working conditions during a special assessment of working conditions at workplaces, and identifying harmful and dangerous factors of the production environment and the work process.

Results. The conducted research made it possible to develop a front and rear ventilation system integrated into the helmet.

Scientific novelty. The new technical solution proposed by the authors is an innovative solution in the field of improving and creating new modern personal protective equipment.

Practical significance. The proposed design of a personal protective headgear – a protective helmet not only provides protection against external influences, but also prevents heat stress, allows for the management of thermal load, provides comfortable and safe working conditions in chemical industry enterprises, increase the safety and efficiency of production, preserve the life and health of personnel.

Keywords: *protective helmets; personal protective equipment; ventilation technologies; heat stress; temperature conditions; efficiency and occupational safety.*

For citation: Fomin A. I., Kopytov A. I., Mikhailov V. G., Rafikov R. R. Introduction of integrated ventilation systems into protective helmets. *Scientific bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 101-108. EDN NXRDMD

УДК 355.58"364":[351.862.22:699.85]

Алексей Николаевич Янченко, начальник управления гражданской обороны и защиты населения; e-mail: a.yanchenko@80.mchs.gov.ru

*Главное управление МЧС России по Донецкой Народной Республике
283048, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел.: +7 (856) 340-62-88*

Екатерина Кайржановна Джалетова, мл. науч. сотр.; e-mail: e.dzhaletova@80.mchs.gov.ru

Максим Константинович Томилов, мл. науч. сотр.; e-mail: m.tomilov@80.mchs.gov.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

ОБОСНОВА КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПРОСТЕЙШИХ УКРЫТИЙ

Цель работы. Обоснование требований к переводу простейшего укрытия в разряд защитных сооружений гражданской обороны при военных конфликтах и при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с учетом оценки его фактического технического состояния, защищенности в целом или отдельных элементов и технических систем.

Методы. Расчетные методы определения объемно-планировочных решений основных и вспомогательных помещений защитных сооружений гражданской обороны.

Результаты. Рекомендации о пригодности и возможности перепрофилирования простейшего укрытия, представленного в виде подвального помещения административного пятиэтажного здания, в убежище в условиях современных угроз и чрезвычайных ситуаций.

Научная новизна. Впервые обоснованы требования к простейшему укрытию для перевода его в разряд защитных сооружений гражданской обороны при военных конфликтах и при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на базе существующих инфраструктурных элементов.

Практическая значимость. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по адаптации простейшего укрытия, представленного в виде подвального помещения административного здания, к требованиям, предъявляемым к убежищам в условиях военных конфликтов и при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера для повышения защищенности укрываемых.

Ключевые слова: гражданская оборона; защитные сооружения гражданской обороны; простейшие укрытия; убежища; чрезвычайная ситуация; изменение типа защитных сооружений гражданской обороны; объемно-планировочные решения.

Для цитирования: Янченко А. Н., Джалетова Е. К., Томилов М. К. Обоснова комплекс мероприятий по повышению уровня защищенности простейших укрытий // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2025. – № 4 (62). – С. 109–117. – EDN KYPVOT

Постановка проблемы. Современная концепция обеспечения безопасности населения от воздействия традиционных средств поражения противника, а также от последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера предполагает активное использование подземных пространств городских территорий для оборудования защитных сооружений гражданской обороны (далее – ЗС ГО).

Актуальная задача настоящего времени – содержание подземных и подвальных помещений жилых, общественных и производственных зданий в готовности к приспособлению их под ЗС ГО, разработка мероприятий по поддержанию их в состоянии постоянной готовности к использованию.

В зависимости от состояния их ограждающих конструкций, защитных устройств и оборудования инженерно-технических систем, ЗС ГО оцениваются как готовые, не готовые или ограниченно готовые к приему укрываемых¹.

Защитные сооружения считаются не готовыми, если они не соответствуют хотя бы одному из требований по обеспечению защитных свойств, а находящиеся в состоянии ограниченной готовности обладают недостатками, которые не влияют на защитные свойства сооружений и могут быть устранены в течение 24 часов.

Для решения этой задачи необходимо обеспечить использование подземных помещений в соответствии с нормативными требованиями, заблаговременно разработать объемно-планировочные и конструктивные решения этих помещений, оснастить их необходимыми инженерно-техническими системами, а также составить планы перевода подвальных помещений на режим укрытий. Выполнение перечисленных инженерно-технических и организационных мероприятий позволит обеспечить эффективную защиту населения от опасностей мирного и военного времени.

Анализ последних исследований. Современные исследования в области ЗС ГО сосредоточены на разработке новых материалов [1], автоматизированных систем мониторинга и управляемых конструкций, способных быстро адаптироваться к различным видам угроз, включая радиационные, химические и биологические воздействия [2–4]. Также активно развиваются методы модульного [5, 6] и мобильного проектирования, позволяющие быстро развертывать защитные объекты в различных условиях [7].

Недостаточный уровень модернизации и технического состояния существующих ЗС ГО, а также ограниченные ресурсы для быстрого восстановления и повышения их устойчивости создают угрозу безопасности граждан. Немаловажным фактором является проведение всесторонней оценки пригодности использования имеющихся укрытий и убежищ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к ЗС ГО, согласно действующему законодательству Российской Федерации.

Цель работы. Обоснование требований к переводу простейшего укрытия в разряд защитных сооружений гражданской обороны при военных конфликтах и при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с учетом оценки его фактического технического состояния, защищенности в целом или отдельных элементов и технических систем.

Методика эксперимента. Пригодность к использованию в качестве ЗС ГО подвального помещения административного пятиэтажного здания будет проводиться на основании:

- расчетной оценки реальных и требуемых площадей помещений (основных и вспомогательных) для простейшего укрытия, рассчитанного на 75 человек;
- оценки объемно-планировочных решений;
- расчета необходимого количества продовольствия и минимального объема технической и питьевой воды и т. д.

¹ Правила эксплуатации защитных сооружений гражданской обороны: [утв. Приказом Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации от 15 декабря 2002 г. № 583 (с изменениями, Приказом Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации от 26.06.2018 № 258)]. – М., 2002. – 90 с.

Расчеты параметров предполагаемого укрытия будут производиться в соответствии с требованиями санитарных правил СП 88².

Результаты исследования. Состав и площадь помещений убежища определяются расчётом в зависимости от количества укрываемых, назначения убежища, местных условий и требований нормативных документов. Согласно пункту 4.3 СП 88 подвальные, цокольные этажи зданий и сооружений различного назначения можно приспособлять под ЗС ГО в военное время, а также в случаях возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Анализируемое укрытие (рис.) представлено в виде подвального помещения административного пятиэтажного здания и относится к простейшим ЗС ГО малой вместимости (до 150 человек). Характеристики помещений анализируемого простейшего укрытия представлены в табл. 1.

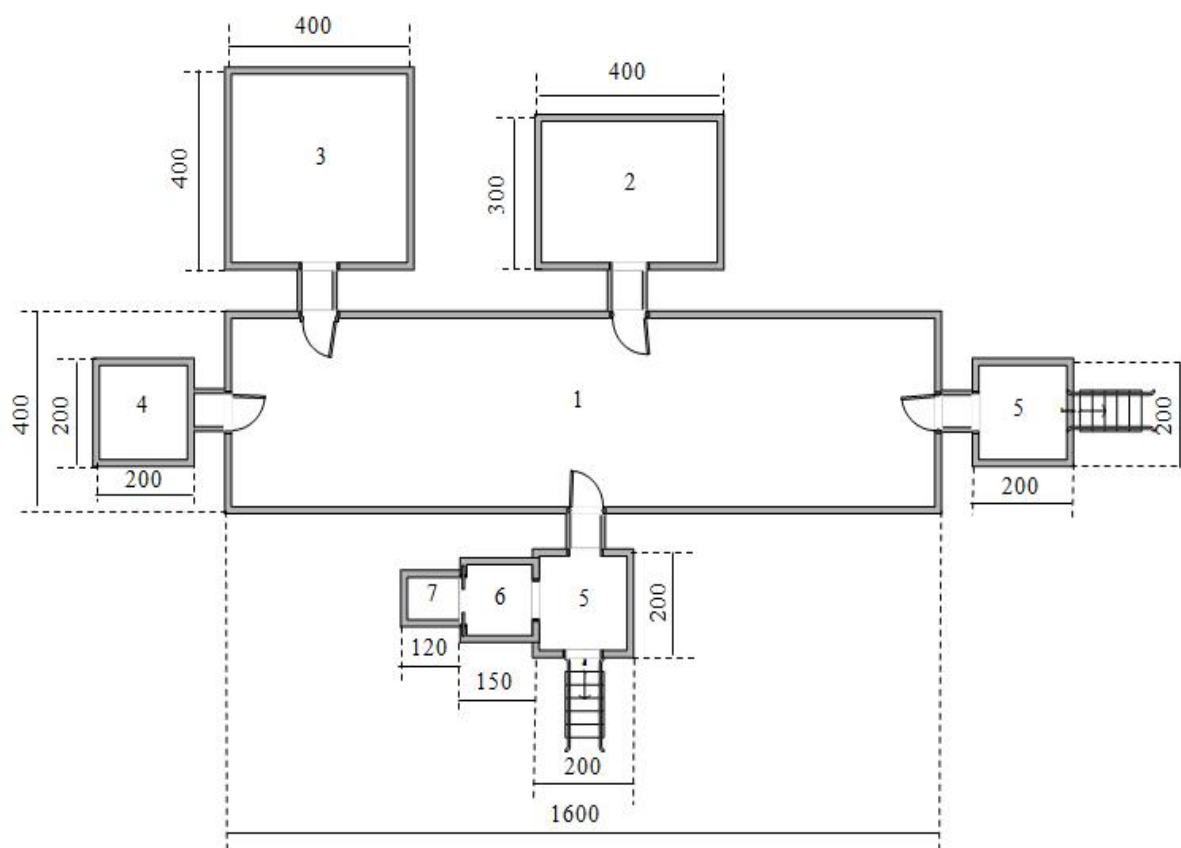


Рис. Схема простейшего укрытия в виде подвального помещения административного пятиэтажного здания:

1 – основное помещение; 2 – санузел; 3 – вспомогательное помещение;
4 – электрощитовая; 5 – тамбур; 6 – лифтовая зона (лифтовой холл); 7 – лифт

Согласно СП 88, для расчета ЗС ГО на 75 человек необходимо определить минимальный объем основного помещения согласно нормативам, из которых следует, что значение объема должно быть не менее $1,5 \text{ м}^3$ на одного человека. Проверку данного нормативного положения можно рассчитать по формуле:

² СП 88.13330.2014 Свод правил. Защитные сооружения гражданской обороны: [утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 18 февраля 2014 г. № 59/ПР (с изменениями, внесенными Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 21 декабря 2022 г. № 1101/ПР)]. – М., 2014. – 153 с.

$$V_1 = \frac{(S_{\text{общ}} - S_{\text{вспом}}) \times h}{N_{\text{укр}}} \geq 1,5, \quad (1)$$

где V_1 – внутренний объём помещений на одного укрываемого, м³/чел;
 $S_{\text{общ}}$ – общая площадь убежища, м²;
 $S_{\text{вспом}}$ – площадь вспомогательных помещений убежища (тамбуров, санузлов, электрощитовой, помещения для хранения продовольствия), м²;
 h – высота помещений убежища, м;
 $N_{\text{укр}}$ – количество укрываемых в убежище людей, чел;
1,5 – санитарная норма объёма на одного укрываемого, м³/чел.

Таблица 1

Характеристики помещений анализируемого простейшего укрытия

№	Название помещения	Размеры помещения, м			Площадь помещения, м ²
		Ширина	Длина	Высота	
1	Основное помещение	16,0	4,0	3,1	64,00
2	Санузел	4,0	3,0	3,1	12,00
3	Вспомогательное помещение	4,0	4,0	3,1	16,00
4	Электрощитовая	2,0	2,0	3,1	4,00
5	Тамбур	2,0	2,0	3,1	4,00
6	Лифтовая зона (лифтовой холл)	1,5	1,5	3,1	2,25

Согласно данным, представленным в табл. 1, действительное значение внутреннего объема помещений на одного укрываемого составило 2,6 м³, что соответствует нормам. Однако данный показатель учитывает полное заполнение пространства убежища. Таким образом, размещение людей в пространстве основного помещения простейшего укрытия теоретически возможно, но не в полной мере соответствует требованиям СП 88, что вызывает необходимость адаптировать данное укрытие под убежище малой вместимости.

Одним из решений представленной задачи является использование ярусных нар в основном помещении укрытия. Согласно СП 88 высота скамей первого яруса должна быть 0,45 м, нар второго яруса – 1,4 м и третьего яруса – 2,15 м от пола. Расстояние от верхнего яруса до перекрытия или выступающих конструкций потолка должно быть не менее 0,75 м. Число мест для лежания при двухъярусном использовании нар должно составлять 20 % от вместимости ЗС ГО. При этом учитываются размеры мест для сидения (ширина – 0,45 м, длина – 0,45 м) и для лежания (ширина – 0,55 м, длина – 1,8 м) на одного человека.

Следует также отметить, что исследуемое простейшее укрытие включает далеко не все необходимые вспомогательные помещения, которые должны быть предусмотрены для обеспечения функционирования ЗС ГО и жизнедеятельности укрываемых. К ним относят, например, санузел, помещение для хранения продуктов питания и воды, и другие.

Согласно СП 88, санитарные узлы проектируются раздельными для мужчин и женщин. Число укрываемых в убежище женщин и мужчин на одно санитарное оборудование – 75 и 150 человек соответственно. Площадь санитарных узлов рассчитывают, исходя из нормы площади пола 2 м² и 2,5 м² по формулам (2) и (3) соответственно.

$$S_{суж} = 2 \times \frac{N_{ж}}{75}, \quad (2)$$

$$S_{сум} = 2,5 \times \frac{N_{м}}{150}, \quad (3)$$

где $S_{суж}$ – площадь санитарных узлов для женщин, м²;
 $S_{сум}$ – площадь санитарных узлов для мужчин, м²;
 $N_{ж}$ – количество укрываемых в убежище женщин, чел.;
 $N_{м}$ – количество укрываемых в убежище мужчин, чел.

Площадь помещения для хранения продовольствия принимается 6 м² при количестве укрываемых в ЗС ГО до 150 человек.

При использовании простейшего укрытия в качестве убежища одним из обязательных условий является наличие фильтровентиляционного помещения (далее – ФВП). В нем размещаются фильтры и другое оборудование для очистки наружного воздуха. Размеры ФВП определяются в зависимости от габаритов оборудования и площади, необходимой для его обслуживания. Площадь ФВП, согласно СП 88, рассчитывается исходя из количества фильтровентиляционных комплектов по формуле (4). Количество обязательных фильтровентиляционных комплектов, которые должны присутствовать в убежище составляет 1 шт.

$$S_{ФВП} = S_1 + S_2 \cdot (n_1 - 1), \quad (4)$$

где $S_{ФВП}$ – площадь ФВП, м²;
 S_1 – площадь, отведенная на первый фильтровентиляционный комплект ($S_1 = 8$ м²), м²;
 S_2 – площадь, отведенная на каждый последующий фильтровентиляционный комплект ($S_2 = 3$ м²), м²;
 n_1 – количество фильтровентиляционных комплектов (для убежища малой вместимости – 3), шт.;

Размеры проемов и проходов в помещения, приспособляемые под убежища, должны удовлетворять требованиям нормативных документов, предъявляемым к помещениям в зависимости от их назначения в мирное время. Во всех случаях число входов должно быть не менее двух с дверным проемом размерами: ширина – 0,8 м и высота – 1,8 м.

Результаты исследования по подготовке простейшего ЗС ГО к использованию при военных конфликтах, а также в случаях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера представлены в табл. 2, которые соответствуют нормативным требованиям и позволяют эффективно использовать подвальное помещение административного пятиэтажного здания в качестве убежища при максимальном времени непрерывного пребывания в нем людей.

Таблица 2

Расчетные значения параметров защитного сооружения гражданской обороны малой вместимости для обеспечения его эффективного использования

Параметр	Расчетное значение	Характеристика помещений
Внутренний объем исследуемого ЗС ГО на одного человека, м ³ /чел	2,60	Действительное значение внутреннего объема помещений на одного укрываемого составило 2,6 м ³ /чел, что соответствует нормам
Количество ярусов, шт.	2,00	Помещение позволяет по объему использовать и 3-ярусную комплектацию нар, однако при вместимости ЗС ГО 75 человек достаточно использования 2 ярусов
Места для лежания в основном помещении, шт.	15,00	Места для лежания были определены из условия, что число мест для лежания при 2-ярусном использовании нар должно составлять 20 % от вместимости ЗС ГО
Места для сидения в основном помещении, шт.	60,00	Оставшиеся 80 % от вместимости ЗС ГО приходятся на места для сидения в основном помещении для эффективного использования простейшего ЗС ГО при максимальном времени непрерывного пребывания в нем людей – 48 часов
Расстояние между нарами, м	0,75	Согласно СП 88 определена нормативная ширина между продольными рядами нар
Площадь санитарных узлов для женщин, м ²	1,00	Площадь санитарных узлов рассчитывается исходя из нормы площади пола 2 м ² (на 1 санитарный прибор для женщин)
Площадь санитарных узлов для мужчин, м ²	1,00	Площадь санитарных узлов рассчитывается исходя из нормы площади пола 2,5 м ² (на 1 санитарный прибор и писсуар для мужчин)
Количество санитарного оборудования, шт.	5,00	В ЗС ГО, размещаемых на предприятиях, согласно СП 88 на 75 человек укрываемых для разных видов санитарного оборудования предусмотрен 1 прибор для женщин, 1 прибор для мужчин и писсуар, а также 2 раковины для мытья рук
Минимальный объем технической воды в ЗС ГО на 75 человек, м ³	0,30	В ЗС ГО на 75 человек запас питьевой воды рассчитывается исходя из 2 л в сутки на каждого укрываемого
Площадь помещения для хранения продовольствия, м ²	6,00	Площадь помещения для хранения продовольствия принимается 6 м ² при числе укрываемых до 150 человек. На каждых 100 укрываемых сверх 150 человек площадь увеличивают на 2 м ²
Минимальный объем питьевой воды в ЗС ГО на 75 человек, м ³	0,34	Минимальный объем питьевой воды в ЗС ГО на 75 человек считается из требований по количеству не менее 4,5 л воды в сутки на каждого человека. В жару потребность в воде увеличивается вдвое. Вода должна храниться в пластиковой или эмалированной таре
Площадь ФВП, м ²	15,00	На первый фильтровентиляционный комплект отводится 8 м ² , на каждый последующий – по 3 м ² . Размещать ФВП следует у наружных стен убежища

Параметр	Расчетное значение	Характеристика помещений
Количество фильтровентиляционных комплектов, шт.	3,00	Для убежища на 75 человек обычно рекомендуется использовать 3 фильтровентиляционных комплекта. Это связано с необходимостью обеспечить стабильную вентиляцию и фильтрацию воздуха для такого количества людей, а также иметь резервные комплекты на случай обслуживания и неожиданных ситуаций
Размеры проемов и проходов в помещения, м	0,80	Размеры проемов и проходов в помещения, приспособляемые под убежище, должны удовлетворять требованиям нормативных документов, предъявляемым к помещениям в зависимости от их назначения в мирное время. Количество и ширину входов определяют при проектировании в зависимости от вместимости убежища и количества укрываемых, приходящихся на один вход. Ширина входа, согласно нормативам, должна быть не менее 0,8 м

Размеры проемов и проходов в помещения соответствуют реальным значениям, не являются загроможденными. В качестве помещения для хранения продовольствия есть возможность использования вспомогательного помещения.

Реальная площадь санузла составляет 12 м², что соответствует требованиям СП 88 и позволяет разместить в помещении все необходимое санитарное оборудование.

Двухъярусное использование нар позволяет разместить необходимое количество укрываемых (75 человек) в условиях узкого пространства подвального помещения административного пятиэтажного здания.

Для использования простейшего укрытия, представленного в виде подвального помещения административного пятиэтажного здания, в качестве убежища необходимо у наружных стен убежища оборудовать ФВП с определенным количеством фильтровентиляционных комплектов.

Вывод и перспектива дальнейших исследований. В процессе исследований был выполнен анализ определенного типа укрытия в соответствии с действующей классификацией ЗС ГО, дана оценка целостности простейшего укрытия, состояние входов и выходов (свободные от загромождения проходы), произведён расчёт оценки реальных и требуемых площадей, основных и вспомогательных помещений для конкретного числа укрываемых в нём людей – 75 человек.

Обоснованы требования по приведению данного простейшего укрытия в состояние готовности к эксплуатации в условиях чрезвычайной ситуации:

- установка мест для сидения в основном помещении – 60 шт.;
- мест для лежания в основном помещении – 30 шт.
- необходимо оборудовать площадь помещения для хранения продовольствия на максимальное время непрерывного пребывания в нем требуемого количества человек.

При условии выполнения предложенных рекомендаций появляется возможность перепрофилирования подвального помещения административного

пятиэтажного здания в убежище, необходимое для защиты сотрудников при возникновении чрезвычайных ситуаций в условиях современных угроз, в том числе и военного характера.

Список литературы / References

1. Трушихина, М. В. Совершенствование конструктивно-технологических решений устройства защитных сооружений гражданской обороны / М. В. Трушихина // Молодой ученый. – 2019. – № 22 (260). – С. 199–201. – EDN LJKUMA

Trushikhina, M.V. *Sovershenstvovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy ustroystva zashchitnykh sooruzheniy grazhdanskoy oborony* [Improving the design and technological solutions for the construction of civil defence protective structures]. Young Scientist, 2019, no. 22 (260), pp. 199-201. EDN LJKUMA (In Russian)

2. Инженерная защита населения. Часть 1. Основы инженерной защиты населения и территорий / В.Н. Шульгин, В.А. Седнев, А.И. Овсяник, А.П. Платонов, А. Б. Шевчук. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2011. – 582 с.

Shulgin, V.N., Sednev, V.A., Ovsyanik, A.I., Platonov, A.P., Shevchuk, A.B. *Inzhenernaya zashchita naseleniya. Chast' 1. Osnovy inzhenernoy zashchity naseleniya i territoriy* [Engineering protection of the population. Part 1. Fundamentals of engineering protection of the population and territories]. Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2011, 582 p. (In Russian).

3. Богатырев, С. А. Актуальные проблемы обеспечения защищенности населения в мирное время / С. А. Богатырев // Сборник статей по материалам CCLI студенческой международной научно-практической конференции «Молодежный научный форум». – 2024. – С. 11–15.

Bogatyrev, S. A. *Aktualnyye problemy obespecheniya zashchishchennosti naseleniya v mirnoye vremya* [Current issues of ensuring the safety of the population in peacetime]. A collection of articles based on the materials of the CCLI student international scientific and practical conference «Youth Scientific Forum», 2024, pp. 11-15. (In Russian)

4. Ластовкин, В. Ф. Защитные сооружения гражданской обороны / В. Ф. Ластовкин, А. П. Козлов, В. А. Забелин. – Н.-Новгород : ННГАСУ, 2020. – 79 с.

Lastovkin, V. F., Kozlov, A. P., Zabelin, V. A. *Zashchitnye sooruzheniya grazhdanskoy oborony* [Civil defence protective structures]. Nizhny Novgorod: NNGASU Publ., 2020, 79 p. (In Russian)

5. Посохов, Н. Н. Защитное сооружение блок модульного типа полной заводской готовности «КУБ-М»: история создания и вопросы практического внедрения на территории России / Н. Н. Посохов // Защитные сооружения гражданской обороны. Актуальные вопросы проектирования, строительства, эксплуатации и снятия с учета. Опыт специальной военной операции на Украине : сборник материалов научно-практической конференции, Москва, 14 ноября 2024 года. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2024. – С. 8–14. – EDN APBQJS

Posokhov, N. N. *Zashchitnoe sooruzhenie blok-modul'nogo tipa polnoy zavodskoy gotovnosti «KUB-M»: istoriya sozdaniya i voprosy prakticheskogo vnedreniya na territorii Rossii* [Protective structure modular type block of full factory readiness «KUB-M»: the history of creation and issues of practical implementation on the territory of Russia]. Civil defense protective structures. Current issues of design, construction, operation, and deregistration. Experience from a special military operation in Ukraine: Collection of materials of the scientific and practical conference, Moscow, 14.11.2024. Moscow: FSBI VNI GOCHS Publ., 2024, pp. 8-14. (In Russian)

6. Посохов, Н. Н. Расчетное обоснование несущей способности защитных сооружений гражданской обороны блок-модульного типа полной заводской готовности: экономические

аспекты / Н. Н. Посохов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14, № 11 (1). – С. 586–593. DOI : 10.34670/AR.2024.65.98.064

Posokhov N.N. *Raschetnoye obosnovaniye nesushchey sposobnosti zashchitnykh sooruzheniy grazhdanskoy oborony blok-modulnogo tipa polnoy zavodskoy gotovnosti: ekonomicheskiye aspekt* [Calculation justification of the bearing capacity of block-modular civil defense protective structures of full factory readiness: economic aspects]. Economics: Yesterday, Today and Tomorrow, 2024, vol. 14, no 11 (1), pp. 586-593. DOI: 10.34670/AR.2024.65.98.064 (In Russian)

7. Руководство по проектированию и расчету защитных сооружений гражданской обороны. – М. : ЦНИИПромзданий, 2003. – 131 с.

Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu zashchitnykh sooruzheniy grazhdanskoy oborony [Guide to the design and calculation of civil defence protective structures]. – Moscow: TSNIIPROMZDANIY Publ., 2003, 131 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 15.10.2025

Alexey Nikolaevich Yanchenko, Head of the Department of Civil Defence and Population Protection;
e-mail: a.yanchenko@80.mchs.gov.ru

Main Directorate of the EMERCOM of Russia for the Donetsk People's Republic
283048, Donetsk, Shchorsa St., 60. Phone: +7 (856) 340-62-88

Ekaterina Kairzhanovna Dzhaletova, Junior Researcher; e-mail: e.dzhaletova@80.mchs.gov.ru

Maksim Konstantinovich Tomilov, Junior Researcher; e-mail: m.tomilov@80.mchs.gov.ru

Federal State Institution «The Scientific Research Institute «Respirator» EMERCOM of Russia»
283048, Donetsk, Artema St., 157. Phone: +7 (856) 252-78-43

JUSTIFICATION OF A SET OF MEASURES TO INCREASE THE SECURITY OF SIMPLE HIDES

Objective. To conduct an assessment of a simple shelter, represented by a basement room of an administrative five-story building, in order to evaluate its actual technical condition, including overall protection level or individual elements and technical systems. The goal is to substantiate requirements for upgrading it to the category of civil defence protective structures in case of military conflicts and emergencies of natural and man-made origin.

Methods. Calculation methods for determining the volumetric and planning solutions of the main and auxiliary rooms of civil defence protective structures.

Results. Recommendations regarding the suitability and possibility of re-purposing the simple shelter, represented by a basement room of an administrative five-story building, into a shelter suitable for modern threats and emergencies.

Scientific novelty. For the first time, the requirements for a simple shelter have been substantiated in order to convert it into a civil defense shelter in the event of military conflicts and natural and man-made emergencies based on existing infrastructure elements.

Practical significance. Based on the conducted research, recommendations have been developed for adapting the simplest shelter, which is a basement in an administrative building, to the requirements for shelters in the event of military conflicts and natural and man-made emergencies, in order to increase the safety of those who are sheltered.

Keywords: civil defence; civil defence protective structures; shelters; simple shelters; emergency situation; change of type of civil defence protective structures; space-planning solutions.

For citation: Yanchenko A. N., Dzhaletova E. K., Tomilov M. K. Justification of a set of measures to increase the security of simple hides. *Scientific Bulletin of the NII «Respirator»*, 2025, no. 4 (62), pp. 109-117. EDN KYPVOT

**Указатель статей, опубликованных в 2025 году
в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»**

	Выпуск	Стр.
I. Пожарная безопасность		
Агарков Ал. В., Политучий Д. А., Балта Д. Ф., Буряк Д. С. Огнетушитель с раздельным хранением воды и пенообразователя для тушения пожаров в шахтах	3	7
Алексеев С. Г. Сравнительный анализ методик прогнозирования избыточного давления воздушной ударной волны в режиме детонации	4	35
Алексеев С. Г. Оценка взрывоопасности горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей	3	22
Борисенко Д. И. Теоретические основы акустической диагностики очагов пожара в угольных пластах	3	15
Головченко Е. А., Гусар Г. А. Турбулентная фильтрация газа в пористых средах	2	7
Добрякова Е. И. Идентификация опасностей и оценка внешних рисков в процессе тушения пожаров в условиях военного конфликта	1	26
Канин В. А., Пивень Ю. А. Автоматизированный контроль содержания в шахтной атмосфере взрывоопасных непредельных углеводородов	2	20
Кириян А. П., Пефтибай Г. И., Галухин Н. А. Газодинамический способ повышения эффективности порошкового тушения пожара	4	7
Ковалев А. П., Якимишина В. В. Влияние надежности автоматических средств защиты на пожарную безопасность сети 6–10 кВ	4	17
Лебедева В. В. Оценка устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию внешних факторов	2	28
Лебедева В. В., Храпоненко О. В. Влияние времени водонасыщения на кратность вспучивания огнезащитного покрытия строительных конструкций	3	33
Лебедева В. В., Томилов М. К. Оптимизация огнетушащих свойств водной композиции	1	18
Мамаев В. В., Пефтибай Г. И., Галухин Н. А., Татаров И. А. Обоснование конструктивных параметров ствола устройства пожаротушения тонкораспыленной водой	2	13
Пефтибай Г. И., Галухин Н. А., Татаров И. А. Математическая модель истечения газокapельного потока с оптимизированным профилем канала сопла пожаротушающей установки	1	7

	Выпуск	Стр.
Удавихин Д. В., Черный К. А. Способ обеспечения электростатической безопасности СИЗОД во взрыво- и пожароопасных средах	1	36
Хафизов И. Ф., Султанов Р. М., Бакиров Д. Р. Исследование физико-химических свойств и противопожарной эффективности ингибитора коррозии на основе полиакрилата натрия	4	26

II. Безопасность труда

Ашихмин В. Д., Тишин Р. А., Мавроди А. В. Оценка эффективности дегазации в условиях столбовой системы разработки	4	64
Баринов А. В., Баринов М. Ф., Кучербаев А. А., Иванов Е. В. Исследование многофункциональной защиты спасателя с использованием полимерных материалов	2	45
Гарелина С. А., Латышенко К. П., Скрынников А. Ю. К вопросу обоснования системы локализации разливов нефти и нефтепродуктов	4	42
Дмитриев С. А. Законы распределения случайных величин в обосновании требований к измерениям при координатном управлении робототехническими комплексами	1	64
Долженков А. Ф., Мороз Т. О. Оценка эффективности защитной одежды спасателей при воздействии высокотемпературных факторов	2	55
Захарова В. В., Подвигина Е. В., Подвигин К. А., Горохова Т. Ю. Прогнозирование динамики изменения объема зоны с нормативными микrokлиматическими условиями в горной выработке нефтяной шахты	3	48
Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И. Совершенствование защитного футляра шахтного самоспасателя	2	61
Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И. Методика измерения относительной влажности при испытании самоспасателей на стенде, имитирующем дыхание человека	1	44
Кириян А. П., Мамаев В. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С. Особенности экономного кислородопитания респиратора	3	40
Косарев И. В., Мезников А. В., Косарев В. В., Андреев Г. В., Чайков Е. М. Импортозамещающий очистной комбайн КДК 1000 для продуктивной и техногенно безопасной отработки угольных пластов мощностью 2,5–5,5 м	1	51
Лебедева В. В. Быстротвердеющий материал для возведения околострековых полос	3	59
Лебедева В. В., Храпоненко О. В., Щербакова О. Н. Влияние метакрилатов на свойства быстротвердеющего материала взрывоустойчивых перемычек	4	58
Мавроди А. В., Ивахненко А. В. Повышение безопасности работников поверхностных комплексов шахт при подземных пожарах	3	66

	Выпуск	Стр.
Плетенецкий Р. С. Математическая модель динамики сорбции в регенеративном дыхательном аппарате	4	49
Симонов А. М., Мавроди А. В., Ивахненко А. В. Ведение горноспасательных работ в необслуживаемых горных выработках шахт	1	69
Федоров Д. А. Влияние лобовых аэродинамических сопротивлений на безопасность горных предприятий	2	68
Филатьева Э. Н., Павленко А. Т., Филатьев М. В., Красногрудов А. В., Малкин В. Ю. Актуальные проблемы исследования процессов углеобразования и проявления опасных свойств шахтопластов	2	35

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Веселов А. В., Давыдов Р. М., Кузьмин А. В. К вопросу оценки эффективности технических средств поиска пострадавших	2	101
Гарелина С. А. Концепция риск-ориентированной системы технических средств для предупреждения чрезвычайных ситуаций на промышленных предприятиях	4	88
Гарелина С. А., Латышенко К. П. Модульный аналитико-экспериментальный метод прогнозирования загрязнения воздушной среды в замкнутых объёмах	3	97
Добрякова Е. И. Обоснование целесообразности применения навигационных систем при вынужденной эвакуации	2	84
Иванов Е. В. Принципы построения системы поддержки принятия решений по обеспечению защищенности населения от чрезвычайных ситуаций техногенного характера	1	91
Кириян А. П. Оценка эффективности внедрения новых средств индивидуальной противогазотепловой защиты работников угольных шахт и горноспасателей	4	77
Кириян А. П. Методы и технические средства экстренного охлаждения пострадавших горнорабочих и спасателей при высоких температурах в горных выработках шахт	3	73
Колеров Д. А., Щетка В. Ф., Шупенько А. М. Систематика чрезвычайных ситуаций, обусловленных военными конфликтами	3	80
Кузнецова М. А., Зарипова С. Н. Обоснование рационального варианта комплектования штатов территориальных подразделений Государственного пожарного надзора	3	89

	Выпуск	Стр.
Кузьмин А. В., Васин М. М., Баринов М. Ф., Мясников Д. В. Предиктивная диагностика аварийно-спасательных машин тяжелого класса с применением средств телеметрии	1	75
Кушнир О. Г. Требования к перспективным техническим средствам обеспечения жизненно важных потребностей населения при ликвидации последствий наводнений	1	98
Мамаев В. В., Иваненко А. Ф., Мухин П. Е. Оценка профессионального риска горноспасателя при разработке мероприятий плана ликвидации аварий	2	76
Матвийчук А. А. Анализ парашютных систем, применяемых парашютистами-спасателями	1	81
Руденко В. А. Методика расчёта численности и оптимальной расстановки членов вспомогательных горноспасательных команд для угольных шахт	2	94
Фомин А. И., Копытов А. И., Михайлов В. Г., Рафиков Р. Р. Внедрение интегрированных вентиляционных систем в защитные каски	4	101
Янченко А. Н., Джалетова Е. К., Томилов М. К. Обоснование комплекса мероприятий по повышению уровня защищенности простейших укрытий	4	109

Публикационная этика

Редакция «Научного вестника НИИ «Респиратор»» придерживается принятых международным сообществом принципов публикационной этики (Рекомендации Комитета по этике научных публикаций (COPE)) и учитывает опыт авторитетных отечественных изданий, руководствуется международными правилами охраны авторского права, нормами действующего законодательства РФ, а также международными издательскими стандартами.

Все рукописи проходят рецензирование и редактуру.

Во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (плагиат, изложение недостоверных сведений и др.), в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, признания общественностью полученных автором научных результатов члены редакции, авторы, рецензенты обязаны соблюдать нижеизложенные этические стандарты.

Этические обязательства редакторов

1. Редакторы и рецензенты должны уважать интеллектуальную независимость авторов, при этом редакция оставляет за собой право отклонять, сокращать и редактировать статьи, исходя из редакционной политики издания. Правка согласуется с автором.

2. Редактор должен без предубеждения рассматривать представленные к публикации рукописи, независимо от места работы авторов, их национальной, религиозной принадлежности, гражданства или политических предпочтений.

3. Все публикуемые материалы проходят тщательный отбор и рецензирование. Редакция оставляет за собой право отклонить статью или вернуть ее на доработку. Автор обязан доработать статью в соответствии с замечаниями рецензентов или редакторов.

4. В основе решения о публикации лежат достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость с учетом актуальных требований в отношении авторского права, плагиата и допустимости открытой публикации отдельных материалов.

5. Рукописи, не соответствующие профилю издания, могут быть отклонены без рецензирования. Редактор может совещаться с членами редакционной коллегии и рецензентами во время принятия решения о публикации.

6. Ответственность за принятие или отклонение рукописи лежит на редакторе, при этом учитывается рекомендация рецензента с ученой степенью соответствующего научного направления относительно качества рукописи и достоверности представленных материалов.

7. Редактор и члены редакции не должны предоставлять другим лицам, кроме лиц, которые участвуют в профессиональной оценке данной рукописи, никакой информации, связанной с содержанием рукописи, находящейся на рассмотрении.

8. Ответственность и права редактора научного рецензируемого издания в отношении любой представленной рукописи, автором которой является сам редактор, должны быть делегированы какому-либо другому квалифицированному лицу.

9. В случае наличия конфликта интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с авторами редакторы должны брать самоотвод от рассмотрения рукописей.

10. Если редактору представлены убедительные свидетельства того, что основное содержание или выводы опубликованной работы являются ошибочными, он должен способствовать публикации соответствующего сообщения, указывающего на данную ошибку и, если возможно, исправляющего ее. Это сообщение может быть написано лицом, обнаружившим данную ошибку, или независимым автором.

11. Статьи, нарушающие нормы этики научных публикаций, могут быть ретрагированы после публикации, о чем редакция сообщает авторам статьи и организации, где выполнялась работа.

Этические обязательства рецензентов

1. Процедура рецензирования помогает редактору в принятии редакционных решений, а также может помочь автору повысить качество его работы. Рецензент осуществляет научную экспертизу авторских материалов, вследствие чего его действия должны носить непредвзятый характер.

2. Любая рукопись, полученная для рецензирования, является конфиденциальным документом, который нельзя обсуждать с лицами, не имеющими на то полномочий от редактора.

3. Рецензенты не должны использовать или раскрывать неопубликованную информацию, аргументы или интерпретации, содержащиеся в рассматриваемой рукописи, если на это нет согласия автора.

4. Если рецензент считает свою квалификацию недостаточной для рассмотрения рукописи или не имеет достаточно времени для быстрого выполнения рецензирования, или в случае наличия конфликта интересов с авторами, он должен уведомить об этом редактора и отказаться от рецензирования соответствующей рукописи.

5. Рецензент обязан давать объективную оценку. Личная критика автора неприемлема. Суждения, замечания и вопросы рецензентов должны быть аргументированы и по существу. Любое указание на избыточное заимствование материалов (плагиат, самоплагиат) должно сопровождаться соответствующей ссылкой.

Этические обязательства авторов

1. Представленная статья должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

2. Авторы гарантируют, что подают на рассмотрение полностью оригинальные работы. Плагиат во всех формах является неэтичным поведением и неприемлем.

3. Авторы несут ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования. Результаты проведенных исследований должны быть достоверны. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

4. Недопустимо представление в несколько изданий одной и той же рукописи для публикации, или уже опубликованной в другом издании статьи. При этом возможна публикация статьи, расширяющей ранее опубликованный краткий предварительный отчет (сообщение) о той же самой работе с обязательным цитированием в данной рукописи более ранней публикации.

5. Авторами публикации (не более 4 человек) могут выступать только лица, которые внесли значительный вклад в формирование замысла, разработку, исполнение или интерпретацию представленного исследования. Окончательный вариант статьи должен быть согласован со всеми авторами и подписан ими. В статье, написанной несколькими авторами, тот из авторов, кто представляет в редакцию контактные сведения, документы и ведет переписку с редакторами, берет на себя ответственность за согласие остальных авторов статьи на ее публикацию в издании.

6. Автор должен цитировать те публикации, которые оказали определяющее влияние на существо излагаемой работы. Следует минимизировать цитирование работ, которые не имеют непосредственного отношения к данному сообщению.

7. В рукописи четко указываются любые опасности и риски, связанные с проведенными исследованиями.

8. Авторы должны поставить редактора в известность о любом потенциальном конфликте интересов, на которые могла бы повлиять публикация результатов, содержащихся в данной рукописи.

Порядок рецензирования авторских рукописей

1. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию авторских рукописей, соответствующих специализации и тематике издания, с целью их экспертной оценки.

2. Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю издания. Если рукопись соответствует тематике и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

3. Рецензент оценивает рукопись и дает заключение о целесообразности ее публикации.

4. При наличии в положительной рецензии замечаний по содержанию статьи, статья отправляется автору на доработку.

5. Если рецензия содержит в целом отрицательный отзыв на статью, по решению редакции статья может быть либо снята с публикации, либо направлена автору для доработки. Доработанная статья после поступления в редакцию в обязательном порядке направляется на повторное рецензирование. Статьи, получившие две отрицательные рецензии подряд, не публикуются.

6. После рецензирования редакция регистрирует авторскую рукопись и совместно с автором ведет подготовку к публикации. Перед публикацией автору представляется отрецензированный сверстаный вариант рукописи для ознакомления.

7. Оригиналы рецензий хранятся в редакции в течение 5 лет.

Правила оформления авторских рукописей

К рассмотрению принимаются авторские рукописи в печатной и электронной версиях (Microsoft Word). Электронный вариант должен быть полностью идентичен печатному. Печатный вариант работы должен быть подписан всеми авторами.

Текст рукописи размещается на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев с отступом 1,0 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки структурных элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура рукописи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- для всех авторов (не более 4 человек) – полностью имя, отчество и фамилия, ученая степень, ученое звание, должность; e-mail, название организации, почтовый адрес, номера телефонов;

- название статьи (до 10 слов) на русском языке;
- реферат на русском языке (от 150 до 250 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован с выделением следующих элементов: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов и словосочетаний);

- основной текст статьи;
- список литературы / References;
- кем рекомендована статья к публикации;
- полный список авторов на английском языке, идентичный русскоязычному варианту;
- название статьи на английском языке;
- реферат на английском языке, идентичный русскоязычному варианту, с выделением соответствующих структурных элементов (objective, methods, results, scientific novelty, practical value, keywords).

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы (и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями);
- анализ последних исследований и публикаций;

- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- цель работы (постановка задания);
- описание методов (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая таблицы и рисунки, должен быть от 7 до 10 страниц. При этом графический материал не должен занимать более 25 % общего объема рукописи. Рукопись должна быть изложена лаконично, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Формулы – в редакторе Math Type (кроме однострочных), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом и располагают по центру строки. Номер формулы – справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Весь графический материал располагают в тексте после ссылок на него.

Диаграммы, схемы, графики, таблицы должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Paint, CorelDRAW, Компас-SD и др.).

Таблицы должны быть компактными, расположены в книжной ориентации, их размер не должен превышать страницу. Все таблицы должны иметь заголовки и быть пронумерованы, если их две или более.

Рисунки (схемы, фотоснимки и др.) должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подрисовочные подписи обязательны, недопустимо их включать в рисунок.

Все физические величины приводят в системе СИ. Недопустимо математические операторы заменять знаками пунктуации или элементами форматирования текста (например, вместо «минус» ставить «тире», вместо «плюс-минус» – подчеркнутый «плюс», вместо «меньше или равно» – подчеркнутое «меньше»). В тексте, в формулах, в таблицах, на рисунках размер и начертание одних и тех же символов должны совпадать.

Список литературы (от 5 до 15 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; обозначают цифрами в квадратных скобках. Порядок изложения элементов библиографического описания на русском языке определен требованиями ГОСТ Р 7.0.100-2018. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. Самоцитирование допускается в объеме не более 20 % источников.

Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты – ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

References размещается непосредственно в списке русскоязычного библиографического описания по следующей универсальной схеме: транслитерация списка авторов; *транслитерация заглавия источника информации* (курсивом) и в квадратных скобках его [перевод на английский язык]; *транслитерация* или *перевод названия журнала / сборника* (курсивом); выходные данные с обозначениями на английском языке; обозначение источника информации после точки в круглых скобках (In Russian). Для англоязычных источников транслитерация не требуется, указывается источник информации (In English).

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами. Ответственность за содержание статьи несет авторский коллектив.

Статья сопровождается Экспертным заключением о возможности опубликования материалов в открытой печати, Согласием на публикацию.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Небрежно оформленные авторские рукописи, или рукописи, которые не соответствуют вышеизложенным требованиям, не рассматриваются.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2025, № 4 (62)

На русском языке

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

Издатель: Министерство Российской Федерации по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных
бедствий (. . . , 1); Федеральное государственное
казенное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор»
МЧС России» (. . . , 157)

Ответственный редактор Л. В. Барзый

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 15.12.2025. 19.12.2025.
Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать лазерная.
Усл. печ. л. 15,0. Тираж 20 экз. Заказ № 10.

ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» ул. Артема, 157, Донецк,
283048 Телефоны: +7 (856) 252-78-01; 252-78-60

E-mail: respirator@80mchs.gov.ru
URL: <https://niirespirator.organizations.mchs.gov.ru/vestnik>