



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 3(60)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2023

Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2023. – № 3(60). – 104 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. Журнал внесен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (приказ МОН ДНР № 1134 от 01.11.2016).

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В. Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	В. В. Мамаев – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	<u>С. П. Греков</u>
д-р техн. наук	С. Е. Гулько
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

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

Подписан к печати по рекомендации Ученого совета ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России» (протокол № 3 от 11.09.2023).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000264 от 09.08.2022.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NII “RESPIRATOR”

No. 3(60)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NII "Respirator". – Donetsk, 2023. – No. 3(60). – 104 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, anthropogenic safety, prevention and fighting the fires in mines, development of mine-rescue equipment, people rescue in underground accidents are presented. The journal is included in the list of reviewed scientific publications where the main scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences must be published (order of the Ministry of Education and Science of the Donetsk People's Republic no. 1134 from 01.11.2016).

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

Founder and publisher – 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".

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V. G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	V. V. Mamayev – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	<u>S. P. Grekov</u>
Dr. Sci. (Tech.)	S. Ye. Gulko
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

The journal is included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database (contract no. 157-03/2016 from 23.03.2016).

Approved for printing according to the reference of the Academic council of FSI NII "Respirator" EMERCOM of Russia (proceeding no. 3 from 11.09.2023).

Registered by the Ministry of Information of the Donetsk People's Republic.

Registration certificate of the network publication AAA no. 000264 from 09.08.2022.

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная безопасность***

- Агеев В. Г., Пефтибай Г. И.,
Галухин Н. А., Марийчук И. Ф.**
Метод определения напряженно-
деформированного состояния
взрывоустойчивой перемычки
под действием динамической нагрузки **7**

- Симонов А. М., Мавроди А. В.,
Агарков Ал. В.**
Переходные газодинамические
процессы в изолированном пожарном
участке шахты **19**

- Коляда А. Ю., Дикенштейн И. Ф.,
Буряк Д. С.**
Оценка устойчивости проветривания
при локализации подземных пожаров
в горных выработках **31**

II. Безопасность труда

- Агеев В. Г., Пефтибай Г. И.,
Галухин Н. А., Ивахненко А. В.**
Модальный метод определения
весовых коэффициентов в нечеткой
задаче принятия решений **40**

- Лебедева В. В., Щербакова О. Н.,
Сиверский А. В.**
Параметры оптимизации условий
идентификации нефтепродуктов **50**

TABLE OF CONTENTS***I. Fire safety***

- Ageyev V. G., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A., Mariychuk I. F.**
Method for determination of stress-
deformed state of blast-resistant bulkhead
under acting dynamic load

- Simonov A. M., Mavrodi A. V.,
Agarkov Al. V.**
Transient gas-dynamic processes
in contained fire area of coal mine

- Kolyada A. Yu., Dikenshteyn I. F.,
Buryak D. S.**
Assessment of ventilation stability
in containment of underground fires
in mine workings

II. Occupational safety

- Ageyev V. G., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A., Ivakhnenko A. V.**
Modal method for determination of weight
coefficients in a fuzzy problem of decision
making

- Lebedeva V. V., Shcherbakova O. N.,
Siverskiy A. V.**
Parameters for optimizing the conditions
of oil products identification

Иваненко А. Ф., Мухин П. Е.
Модель оценки экологического риска
при ликвидации и консервации
угольных шахт

58

Ivanenko A. F., Mukhin P. Ye.
Model of environmental risk assessment
in case of liquidation and conservation
of coal mines

***III. Безопасность
в чрезвычайных ситуациях***

**Ехилевский С. Г., Голубева О. В.,
Забелендик О. Н.**
Критерий прироста защитного
действия изолирующего респиратора
с неоднородно снаряженным
регенеративным патроном

69

**Yekhilevskiy S. G., Golubeva O. V.,
Zabelendik O. N.**
Criterion of enhancement of protective
power time of self-contained breathing
apparatus with heterogeneously loaded
regenerative cartridge

**Медгаус В. М., Зборщик Л. А.,
Плетенецкий Р. С., Францев В. И.**
Пусковое устройство дыхательного
аппарата с химически связанным
кислородом

80

**Medgaus V. M., Zborshchik L. A.,
Pletenetskiy R. S., Frantsev V. I.**
Oxygen-regenerating breathing apparatus
activator

Медгаус В. М., Попов Н. Н.
Разработка требований к конструкции
устройства для создания вакуума
в средствах иммобилизации
пострадавших

90

Medgaus V. M., Popov N. N.
Development of requirements
for a vacuum pump construction employed
in devices for immobilization of victims

I. Пожарная безопасность

УДК [622.864.42:622.81]:001.891.3

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, начальник; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

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

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

Иван Филиппович Марийчук, канд. техн. наук, доцент; e-mail: const@mine.donntu

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+7 949) 457-79-59

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Цель. Разработать метод определения напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием динамической нагрузки при взрыве метановоздушной смеси для расчета необходимой толщины перемычки и обеспечения безопасности горноспасателей.

Методы. Теоретические исследования динамического напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, метод теории упругости.

Результаты. Получены зависимости для расчета напряжений и перемещений, которые могут быть использованы для определения основной технической характеристики – толщины перемычки.

Научная новизна. Решена нестационарная динамическая краевая задача теории упругости для системы уравнений пространственного деформирования изотропной идеально упругой среды, формулируемой для многосвязного пространственного тела с принятым законом распределения нагрузки.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят определить толщину взрывоустойчивой перемычки, обеспечивающую безопасность горноспасателей во время ведения аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: угольная шахта; пожар; взрыв; взрывоустойчивая перемычка; отверстия; динамическая нагрузка; напряженное состояние.

Постановка проблемы. Переход работ на более глубокие горизонты, увеличение протяженности горных выработок и газообильности массивов горных пород приводит к возникновению аварий, характеризующихся пожарами и взрывами. В результате взрывов газопылевых смесей возникают ударные волны [1, 2], которые распространяются на большие расстояния, приводят к значительному материальному ущербу, потере здоровья, иногда и жизни горноспасателей. Для предотвращения негативных последствий необходимо проводить изоляцию аварийных участков взрывоустойчивыми перемычками [3–6].

Анализ последних исследований. В ранних работах приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возведенной из строительного гипса, под действием постоянной ударной волны и давления разрушенных горных пород в верхней ее части. Для решения задачи использовали прием полного прогиба в виде двух слагаемых: изгиба и сдвига массива с принятым линейным законом распределения касательных напряжений. В работах [7, 8] представлено решение задачи напряженно-деформированного состояния перемычки под действием горного давления, ударной волны и температуры, возведенной из материала с цементным вяжущим и отходов местного производства [9], в которой принят квадратичный закон распределения касательных напряжений с определением одного ее перемещения, а также представлен разработанный материал для возведения сооружений гидромеханическим способом и параметры взрывоустойчивой перемычки. В вышеприведенных работах задачи решены в статической постановке с использованием вариационного метода, то есть без учета динамической нагрузки от ударной волны, которая может оказаться разрушающей.

Цель исследования – разработать метод определения напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием динамической нагрузки при взрыве метановоздушной смеси для расчета необходимой толщины перемычки и обеспечения безопасности горноспасателей.

Результаты исследований. Рассмотрена расчетная схема взрывоустойчивой перемычки в виде изотропной пластины с двумя проемными трубами и граничными условиями под действием ударной нагрузки при взрыве метановоздушной волны с принятым законом ее распределения. Для решения задачи использован один из методов теории упругости.

Принимаем следующие предположение и допущение: рассматриваем малые перемещения и в упругой области деформирования; радиальными напряжениями в отверстиях пренебрегаем.

В формализованной постановке рассматриваемая задача сводится к нестационарной динамической краевой задаче теории упругости для системы уравнений пространственного динамического деформирования изотропной идеально упругой среды, формулируемой для многосвязного пространственного тела, занимающего в нормированных прямоугольных координатах область

$$V = \{(x_1, x_2) \in S, \quad x_3 \in [-h, h]\},$$

где $2h$ – толщина перемычки.

Нормирующий параметр для всех координатных переменных – величина R_* . Срединная поверхность рассматриваемого тела $x_3 = 0$ и способ соотнесения дополнительно вводимых локальных систем координат с координатами Ox_1x_2 имеет вид, представленный на рисунке 1.

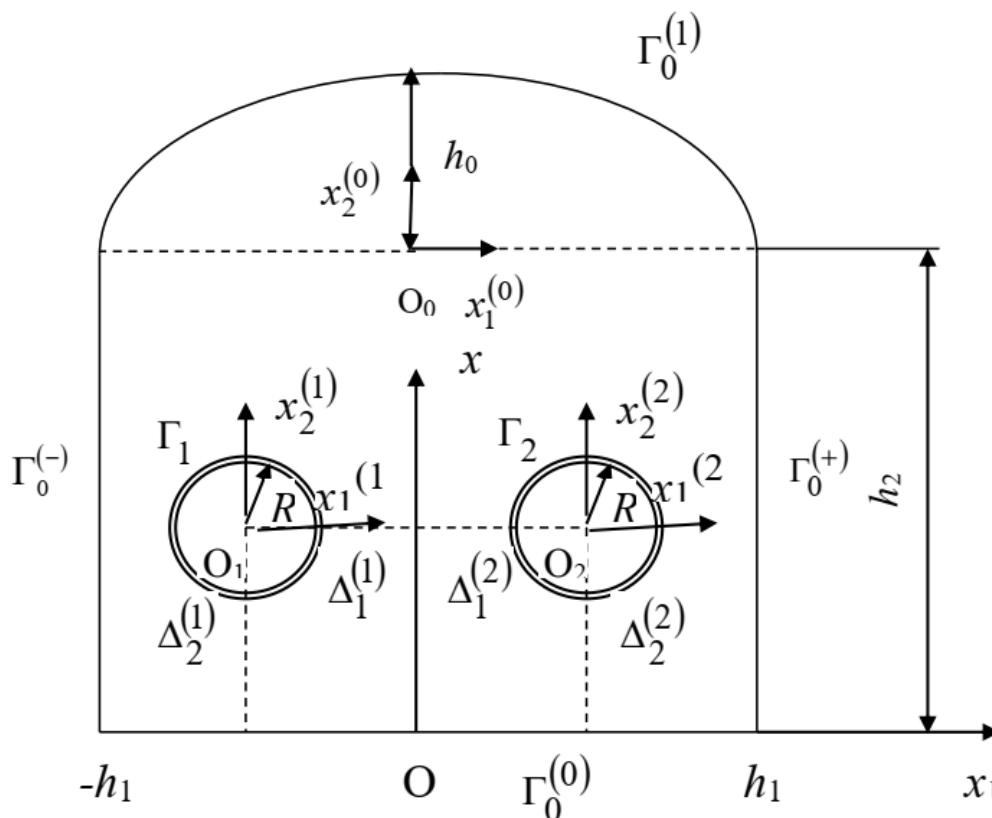


Рис. 1. Схема сечения перемычки

Многосвязный контур области S образован участками Γ_0 (внешний контур S), Γ_1 (круговой контур сечения левого отверстия-полости), Γ_2 (круговой контур сечения правого отверстия-полости). Полагаем, что радиусы круговых контуров Γ_1 и Γ_2 одинаковы и равны R . Центры окружностей Γ_1 и Γ_2 , рассматриваемые в дальнейшем как полюсы локальных координатных систем $O_1 x_1^{(1)} x_2^{(1)}$ и $O_2 x_1^{(2)} x_2^{(2)}$ соответственно, имеют в системе Ox_1x_2 координаты $(-\Delta_1^{(1)}, \Delta_2^{(1)})$ и $(-\Delta_1^{(2)}, \Delta_2^{(2)})$.

Внешний контур Γ_0 состоит из прямолинейных фрагментов

$$\Gamma_0^{(0)} = \{x_1 \in [-h_1, h_1], x_2 = 0\}, \quad \Gamma_0^- = \{x_1 = -h_1, x_2 \in [0, h_2]\};$$

$$\Gamma_0^{(+)} = \{x_1 = h_1, x_2 \in [0, h_2]\}$$

и фрагмента $\Gamma_0^{(1)}$ в виде полуэллипсоида с фиксированной горизонтальной полуосью h_1 и варьируемой вертикальной полуосью h_0 .

Точки на участке контура $\Gamma_0^{(1)}$ имеют координаты, задаваемые параметрическими соотношениями вида

$$x_1 = \operatorname{Re} \omega(e^{i\Theta});$$

$$x_2 = h_2 + \operatorname{Im} \omega(e^{i\Theta}); \quad \Theta \in [0, \pi],$$

где $\omega(\zeta)$ – функция, с помощью которой реализуется конформное отображение $z = \omega(\zeta)$ внешности эллипса в области $z = x_1^{(0)} + i x_2^{(0)}$ на внешность единичного круга во вспомогательной области ζ и которая имеет вид

$$\omega(\zeta) = \left(\frac{h_0 + h_1}{2} \right) \left(\zeta + \frac{h_1 - h_0}{h_1 + h_0} \zeta^{-1} \right).$$

Величина h_0 при этом является мерой эллиптичности контура верхнего свода перемычки.

Внешнюю нормаль к контуру в произвольной точке $\Gamma_0^{(1)}$ определяем углом ψ между ее положительным направлением и координатным направлением оси Ox_1 , используя соотношение

$$e^{i\psi} = \omega'(\sigma) \cdot \sigma \left(|\omega'(\sigma)| \right)^{-1}.$$

Для характеристик искомого тела динамического напряженно-деформированного состояния применяем обозначения:

u_j – для компонент вектора динамических упругих перемещений;

δ_{ij} – для компонент тензора динамических напряжений на основных площадках декартовой координатной системы.

Рассматриваемая задача включает следующую совокупность граничных условий:

– на плоской поверхности $\tilde{\Gamma}_+ = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = h\}$

$$\sigma_{31} \equiv \sigma_{32} \equiv 0, \quad \sigma_{33} = P(t);$$

– на плоской поверхности $\tilde{\Gamma}_- = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = -h\}$

$$\sigma_{31} \equiv \sigma_{32} \equiv \sigma_{33} = 0;$$

– на поверхностях $\tilde{\Gamma}_i$ цилиндрических отверстий-полостей, подкрепленных жесткими оболочками ($i = 1, 2$),

$$u_{ri} = u_{\Theta i} = u_{zi} = 0.$$

На внешней поверхности $\tilde{\Gamma}_0 = \{(x_1, x_2) \in G_0, x_3 \in [-h, h]\}$ контакту перемычки с границей выработки задаем краевые условия вида

$$\begin{aligned}(\sigma_{nn})_{\tilde{\Gamma}_0} &= f_{nn}^\alpha(s, x_3); \\ (\sigma_{ns})_{\tilde{\Gamma}_0} &= \alpha_s(s, x_3)u_s; \\ (\sigma_{nx_3})_{\tilde{\Gamma}_0} &= \alpha_3(s, x_3)u_3.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь подразумеваем, что вдоль участков кусочно-однородного контура сечения перемычки введена дуговая параметризация (n, s) . В связи с геометрическими особенностями участков $\tilde{\Gamma}_0$ краевые условия (1) сводим к совокупности следующих краевых условий:

– на участке поверхности $\{x_1 \in [-h_1, h_1], x_2 = 0, x_3 \in [-h, h]\}$:

$$\sigma_{22} = f_{22}^{(0)}(x_1, x_3); \quad \sigma_{21} = \alpha_1^{(0)}(x_1, x_3)u_1; \quad \sigma_{23} = \alpha_3^{(0)}u_3;$$

– на участке поверхности $\{x_1 = h_1, x_2 \in [0, h_2], x_3 \in [-h, h]\}$:

$$\sigma_{11} = f_{11}^{(+)}(x_2, x_3), \quad \sigma_{12} = \alpha_2^{(+)}(x_2, x_3)u_2; \quad \sigma_{13} = \alpha_3^{(+)}(x_2, x_3)u_3;$$

– на участке поверхности $\{x_1 = -h_1, x_2 \in [0, h_2], x_3 \in [-h, h]\}$:

$$\sigma_{11} = f_{11}^{(-)}(x_2, x_3); \quad \sigma_{12} = \alpha_2^{(-)}(x_2, x_3)u_2; \quad \sigma_{13} = \alpha_3^{(-)}(x_2, x_3)u_3;$$

– на криволинейном (полуэллиптическом) участке $\Gamma_0^{(1)}$ поверхности $\{\Theta \in [0, \pi], x_3 \in [-h, h]\}$:

$$\begin{aligned}\sigma_{nn}(\Theta, x_3) &= \frac{1}{2} \left[(\sigma_{11}(\Theta, x_3) + \sigma_{22}(\Theta, x_3)) + \right. \\ &\quad \left. + (\sigma_{11}(\Theta, x_3) - \sigma_{22}(\Theta, x_3)) \cos 2\psi + 2\sigma_{12}(\Theta, x_3) \sin 2\psi \right] = f_{nn}^{(1)}(\Theta, x_3); \\ \sigma_{ns}(\Theta, x_3) &= \frac{1}{2} \left[(\sigma_{22}(\Theta, x_3) + \sigma_{11}(\Theta, x_3)) \sin 2\psi + 2\sigma_{12}(\Theta, x_3) \cos 2\psi \right] = \\ &= \alpha_s^{(1)}(\Theta, x_3) [u_2(\Theta, x_3) \cos \psi - u_1(\Theta, x_3) \sin \psi]; \\ \sigma_{n3} &= [\sigma_{13}(\Theta, x_3) \cos \psi + \sigma_{23}(\Theta, x_3) \sin \psi] = \alpha_3^{(1)}(\Theta, x_3) \cdot u_3(\Theta, x_3).\end{aligned}$$

Сформулированная таким образом краевая задача определения динамического напряженно-деформированного состояния перемычки при ударной нагрузке на одну из его плоских граней может быть сведена к суперпозиции двух задач по определению ударного динамического напряженно-деформированного состояния рассматриваемого тела при следующих двух типах граничных условий на плоских гранях $\tilde{\Gamma}_+$, $\tilde{\Gamma}_-$, соответственно, имеющих вид

$$(\sigma_{33})_{\tilde{\Gamma}_+} = P(t)/2; \quad (\sigma_{33})_{\tilde{\Gamma}_-} = -P(t)/2; \quad (2)$$

$$(\sigma_{31})_{\tilde{\Gamma}_\pm} = (\sigma_{32})_{\tilde{\Gamma}_\pm} = 0;$$

$$(\sigma_{33})_{\tilde{\Gamma}_+} = P(t)/2; \quad (\sigma_{33})_{\tilde{\Gamma}_-} = P(t)/2; \quad (3)$$

$$(\sigma_{31})_{\tilde{\Gamma}_\pm} = (\sigma_{32})_{\tilde{\Gamma}_\pm} = 0,$$

где $P(t)$ – функция интенсивности задаваемой ударно-пульсирующей нагрузки.

Задача с граничными условиями (2) может классифицироваться как задача антисимметричного относительно плоскости $x_3 = 0$ динамического деформирования перемычки. Граничные условия (3) определяют симметричную относительно плоскости $x_3 = 0$ динамическую задачу деформирования перемычки.

Решения указанных задач с кривыми условиями (2), (3) строятся в обозначенной последовательности, а искомое поле динамических напряжений и деформаций формируется как сумма соответствующих полей, описываемых решениями этих задач.

При построении решений каждой из задач о нестационарной динамической нагрузке интенсивности $P(t)$, определенной во временном промежутке $t \in [0, T_p]$, применяется подход, предполагающий сведение нестационарной динамической задачи к ряду задач стационарного динамического нагружения. Исходную задачу сводим к задаче действия периодически продолжаемой импульсной нагрузки

$$\tilde{P}(t) = \begin{cases} P(t), & t \in [0 + nT, T_p + nT]; \\ 0, & t \in [T_p + nT, (n+1)T], \end{cases}$$

где n – целые числа в интервале $(-\infty, \infty)$; $T \gg T_1$.

Предполагаем, что профиль интенсивности ударного нагружения $\tilde{P}(t)$ на промежутке периодического продолжения может иметь треугольную форму (рис. 2).

Здесь T_1 – длительность промежутка времени линейного нарастания интенсивности давления в импульсе; T_2 – длительность промежутка времени линейного спада интенсивности давления в импульсе; A – максимальная интенсивность треугольного импульса давления; T – параметр периодического продолжения импульса.

Аналитическое описание функции интенсивности периодически продолжаемого треугольного импульса давления может быть представлено в виде

$$\tilde{P}(t) = \begin{cases} A T_1^{-1} t; & nT \leq t \leq nT + T_1; \\ A T_2^{-1} (T_1 + T_2 - t); & nT + T_1 \leq t \leq nT + T_1 + T_2; \\ 0, & nT + T_1 + T_2 \leq t \leq (n+1)T, \end{cases} \quad (4)$$

где $n \in (-\infty, \infty)$.

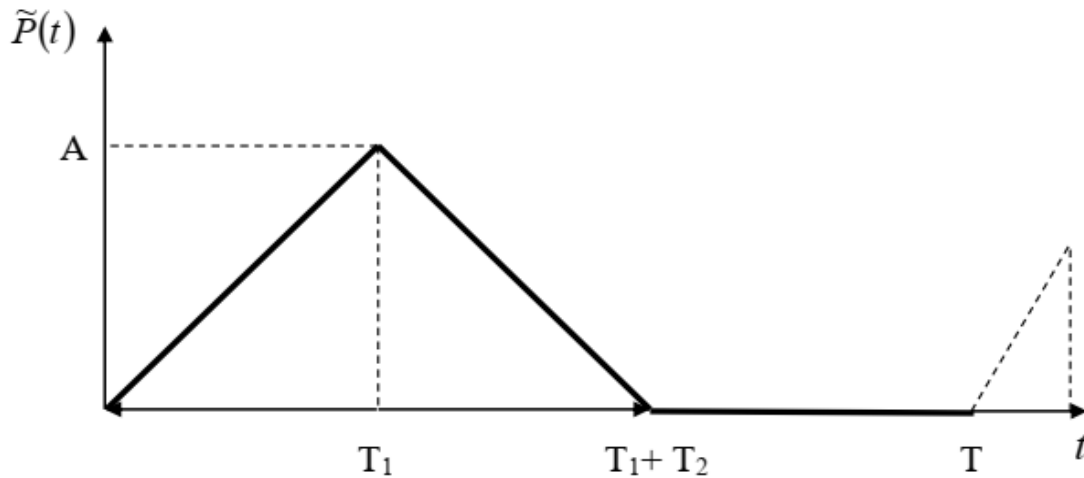


Рис. 2. Закон распределения динамической нагрузки

Раскладывая функцию $\tilde{P}(t)$ (4) в комплексный ряд Фурье, получим

$$\tilde{P}(t) = \operatorname{Re} \left[\sum_{k=0}^{N_T} \alpha_k e^{-i\omega_k t} \right]. \quad (5)$$

Здесь

$$\omega_0 = \omega^* \ll 1, \quad \alpha_0 = \frac{A(T_1 + T_2)}{2T}, \quad \omega_k = 2\pi K/T, \quad \alpha_k = a_k - b_k, \quad (k \geq 1);$$

$$a_k = \frac{AT}{2\pi^2 K^2 T_1 T_2} \left[(T_1 + T_2) \cos \frac{2\pi K T_1}{T} - T_2 - T_1 \cos \frac{2\pi K (T_1 + T_2)}{T} \right];$$

$$b_k = \frac{AT}{2\pi^2 K^2 T_1 T_2} \left[(T_1 + T_2) \sin \frac{2\pi K T_1}{T} - T_1 \sin \frac{2\pi K (T_1 + T_2)}{T} \right],$$

где N_T – число слагаемых в редуцированном отрезке ряда.

Разложение (5) используем для сведения исходной нестационарной динамической задачи теории упругости к серии стационарных задач о действии гармонических внешних усилий.

Методология построения решений базисных стационарных задач динамического деформирования перемычки с частотой ω_l заключается в представлении соответствующих полей динамических упругих перемещений в виде суммы общего решения системы стационарных динамических уравнений, удовлетворяющего однородным условиям на плоских границах перемычки $\tilde{\Gamma}_{\pm}$ и имеющего достаточную степень функционального произвола для удовлетворения краевым условиям на каждом из участков боковой поверхности Γ , а также частного решения указанных уравнений, удовлетворяющих условиям задания на плоских гранях равномерно распределенных усилий в случае σ_{33} симметричной и антисимметричной относительно плоскости $x_3 = 0$ деформации.

Считаем, что перемычка изготовлена из однородного изотропного идеально упругого по своим физико-механическим характеристикам материала. Тогда система уравнений, описывающая поведение стационарного динамического деформирования перемычки, с использованием безразмерных нормированных характеристик может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} &((\lambda + 2\mu)\partial_1^2 + \mu\partial_2^2 + \mu\partial_3^2 + \Omega_l^2)u_1 + (\lambda + \mu)\partial_1\partial_2u_2 + (\lambda + \mu)\partial_1\partial_3u_3 = 0, \\ &(\lambda + \mu)\partial_1\partial_2u_1 + (\mu\partial_1^2 + (\lambda + 2\mu)\partial_2^2 + \mu\partial_3^2 + \Omega_l^2)u_2 + (\lambda + \mu)\partial_2\partial_3u_3 = 0, \quad (6) \\ &(\lambda + \mu)\partial_1\partial_3u_1 + (\lambda + \mu)\partial_2\partial_3u_2 + (\mu\partial_1^2 + \mu\partial_2^2 + (\lambda + 2\mu)\partial_3^2 + \Omega_l^2)u_3 = 0, \end{aligned}$$

где $u_i(x_1, x_2, x_3)$, $(i=1,2,3)$ – амплитудные безразмерные функции динамических волновых перемещений, отнесенные к нормирующему параметру R_* ;

$\partial_j = \frac{\partial}{\partial x_j}$ ($j=1,2,3$) – операторы дифференцирования по нормированным координатным переменным, отнесенным к R_* ;

λ, μ – безразмерные, отнесенные к нормирующему параметру C_* величины параметров Ламе для материала, из которого изготовлена перемычка;

Ω_l – приведенный безразмерный частотный параметр вида

$$\Omega_l = \omega_l R_* (\rho / C_*)^{1/2},$$

ρ – плотность материала перемычки, кг/м³.

Частные решения уравнений (6), отвечающие заданию на $\Gamma_{\pm}$ неоднородных условий (2), (3), могут быть представлены следующим образом:

– для краевых условий (3)

$$\hat{u}_1 \equiv \hat{u}_2 \equiv 0; \quad \hat{u}_3 = u_{30}^{(+)} \sin \tilde{k}_l x_3; \quad (7)$$

– для краевых условий (2)

$$\hat{u}_1 \equiv \hat{u}_2 \equiv 0; \quad \hat{u}_3 = u_{30}^{(-)} \cos \tilde{k}_l x_3. \quad (8)$$

Здесь $\tilde{k}_l$ и $u_{30}^{\pm}$ – неизвестные, подлежащие определению. Подставив (7), (8) в систему уравнений динамического деформирования (6), приходим к уравнению

$$u_{30}^{(\pm)} \cdot [(\lambda + \mu) \tilde{k}_l^2 - \Omega_l^2] = 0.$$

Откуда для $\tilde{k}$ получим соотношение

$$\tilde{k}_l = (\lambda + 2\mu)^{-1/2} \Omega_l.$$

Удовлетворяя граничным условиям, определим $u_{30}^{(+)}$ и $u_{30}^{(-)}$

$$u_{30}^{(+)} \cos \tilde{k}_l h = \frac{P}{2}; \quad u_{30}^{(-)} \sin \tilde{k}_l h = \frac{P}{2}.$$

Отсюда

$$u_{30}^{(+)} = \frac{P}{2 \cos \tilde{k}_l h}; \quad u_{30}^{(-)} = \frac{P}{2 \sin \tilde{k}_l h}.$$

Концепция второй фазы построения решений для каждой из базисных стационарных задач заключается в: использовании представлений амплитудных функций волновых перемещений для тела с однородными краевыми условиями на плоских поверхностях $\tilde{\Gamma}_{\pm}$ в виде суперпозиции рядов по множествам однородных решений стационарных динамических задач о симметричном и антисимметричном по толщине деформировании изотропного упругого слоя с произвольными подлежащими определению коэффициентами; формировании указанной суперпозиции рядами, записываемыми в специально вводимых локальных координатных системах с полюсами внутри и вне области S ; формулировке задачи удовлетворения краевым условиям на всех элементах многосвязной боковой поверхности рассматриваемого тела с использованием дискретного варианта метода наименьших квадратов.

После решения полученных алгебраических систем, то есть определения коэффициентов разложений по базисным однородным решениям в стационарных задачах с частотами Ω_l по различным вышеприведенным формулам, рассчитывают анализируемые характеристики напряженно-деформированного состояния для стационарных деформационных процессов с этими частотами в представляющие интерес моменты времени $\hat{t}_q$.

Совокупные оцениваемые характеристики нестационарного динамического деформирования в моменты времени $\hat{t}_q$ определяют как суммарные величины для соответствующих характеристик, последовательно определяемых из всех рассматриваемых базисных стационарных задач.

Выводы. Разработанный метод определения напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки с двумя проемными трубами и граничными условиями под действием динамической нагрузки при взрыве метановоздушной смеси позволит установить зависимость для определения необходимой толщины перемычки, обеспечивающей ее прочность в зависимости от максимального воздействия динамической нагрузки.

Список литературы / References

1. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д. Ю. Палеев, И. М. Васенин, В. Н. Костеренко, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов, О. Ю. Лукашов, Ю. Ф. Руденко. – Москва : Киммерийский центр, 2012. – 312 с.

Paleyev D. Yu., Vasenin I. M., Kosterenko V. N., Shrager E. R., Kraynov A. Yu. *Udarnye volny pri vzryvakh v ugolnykh shakhtakh* [Blast waves caused by explosions in coal mines]. Moscow, Kimmeriyskiy tsentr Publ., 2012, 312 p. (In Russian)

2. Калякин, С. А. Идеология взрывобезопасности угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли / С. А. Калякин // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 11. – С. 38 – 43.

Kalyakin S. A. *Ideologiya vzryvobezопасnosti ugolnykh shakht, opasnykh po gazu i ugolnoy pyli* [Explosion safety ideology for gas-and-dust hazardous coal mines]. *Bezопасnost truda v promyshlennosti*, 2010, no. 11, pp. 38-43. (In Russian)

3. Палеев, Д. Ю. Состояние и перспективы научного обеспечения горноспасательных работ // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 22 – 28.

Paleyev D. Yu. *Sostoyanie i perspektivy nauchnogo obespecheniya gornospasatelnykh rabot v ugolnoy promyshlennosti* [State and prospects of scientific support for mine-rescue operations in mining industry]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezопасnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2020, no. 1, pp. 22-28. (In Russian)

4. Смоланов, С. Н. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки / С. Н. Смоланов, В. И. Голинько, М. С. Мартиненко. – Днепропетровск : Наука и образование, 2002. – 260 с.

Smolanov S. N., Golinko V. I., Martinenko M. S. *Izolyatsionnye, ventilyatsionnye i vzryvoustoychivye peremychki* [Isolation, ventilation and blast-resistant bulkheads]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovanie Publ., 2002, 260 p. (In Russian)

5. Технология возведения изолирующих, водопорных и взрывоустойчивых перемычек на шахтах ОАО «Южный Кузбасс» / И. А. Шундулиди, А. В. Чубриков, В. А. Пуртов, И. Б. Коржов // Уголь. – 2005. – № 6. – С. 33 – 35.

Shundulidi I. A., Chubrikov A. V., Purtov V. A., Korzhov I. B. *Tekhnologiya vozvedeniya izoliruyushchikh, vodoupornykh i vzryvoustoychivyykh peremychek na shakhtakh OAO “Yuzhnyy Kuzbass”* [Technology of construction of sealing water- and blast-resistant bulkheads in OAO “Yuzhnyy Kuzbass” mines]. *Ugol*, 2005, no. 6, pp. 33-35. (In Russian)

6. Кайдаш, З. Современные технические средства, содействующие контролю и управлению горноспасательными работами / З. Кайдаш // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 2. – С. 301 – 309.

Kaydash Z. *Sovremennye tekhnicheskie sredstva, sodeystvuyushchie kontrolyu i upravleniyu gornospasatelnyimi rabotami* [Modern technical equipment facilitating monitoring and management of mine-rescue operations]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2005, no. 2, pp. 301-309. (In Russian)

7. Агеев, В. Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления без учета действия воздушной ударной волны / В. Г. Агеев, Г. И. Пефтибай // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли. – 2017. – № 4. – С. 68 – 74.

Ageyev V. G., Peftibay G. I. *Matematicheskaya model napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya vzryvoustoychivoy peremychki pod deystviem gornogo davleniya bez uchyota deystviya vozdushnoy volny* [Mathematical model of blast-resistant bulkhead stress-deformed state under acting rock pressure without consideration for the air-wave impact]. *Vestnik NTs VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti v gornoy otrasli*, 2017, no. 4, pp. 68-74. (In Russian)

8. Агеев, В. Г. Напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки под действием ударных волн / В. Г. Агеев, Г. И. Пефтибай // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 3(55). – С. 7 – 18.

Ageyev V. G., Peftibay G. I. *Napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie vzryvoustoychivoy peremychki pod deystviem udarnykh voln* [Blast-resistant bulkhead stress-deformed state under acting blast waves]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”*, 2018, no. 3(55), pp. 7-18. (In Russian)

9. Пефтибай, Г. И. Параметры шахтной взрывоустойчивой перемычки из материалов на основе цементного вяжущего / Г. И. Пефтибай // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли. – 2018. – № 4. – С. 24 – 30.

Peftibay G. I. *Parametry shakhtnoy vzryvoustoychivoy peremychki iz materialov na osnove tsementnogo vyazhushchego* [Parameters of mine blast-resistant bulkhead made of cement binder-based materials]. *Vestnik NTs VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti v gornoy otrasli*, 2018, no. 4, pp. 24-30. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 12.09.2023

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Georgy Ivanovich Peftibay, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, senior scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru
Federal State Institution "The Scientific Research Institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36
Ivan Filippovich Mariychuk, Cand. Sci. (Tech.), assistant professor; e-mail: const@mine.donntu
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Donetsk National Technical University"
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 949) 457-79-59

METHOD FOR DETERMINATION OF STRESS-DEFORMED STATE OF BLAST-RESISTANT BULKHEAD UNDER ACTING DYNAMIC LOAD

Purpose. To develop a method for determining the stress-deformed state of blast-resistant bulkhead under the acting dynamic load caused by the methane-air mixture blast in order to calculate the required bulkhead thickness and to ensure the safety of mine-rescuers.

Methods. Theoretical studies of dynamic stress-deformed state of the blast-resistant bulkhead, theory of elasticity method.

Results. The dependences for calculating the stresses and rotations have been derived for possible application in determining the basic performance characteristic, i.e. thickness of bulkhead.

Scientific novelty. The non-stationery dynamic boundary value problem of the elasticity theory has been solved for the system of spatial deformation equations for the isotropic perfectly elastic medium formulated for a multiply connected spatial body with assumed load distribution law.

Practical value. The study results will make it possible to determine the thickness of the blast-resistant bulkhead ensuring the mine-rescuers safety during emergency-rescue operations.

Keywords: coal mine; fire; explosion; blast-resistant bulkhead; holes; dynamic load; stress state.

УДК 622.868.42:622.411.33*Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: simonov54_54@mail.ru;**Александр Викторович Мавроди, науч. сотр.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;**Александр Владиславович Агарков, канд. техн. наук, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru**Федеральное государственное казенное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-34*

ПЕРЕХОДНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗОЛИРОВАННОМ ПОЖАРНОМ УЧАСТКЕ ШАХТЫ

Цель. Установить зависимость метановыделения в изолированном пожарном участке шахты от длительности переходного газодинамического процесса для повышения безопасности ведения горноспасательных работ.

Методы. Использован комплексный метод исследования, включающий анализ научных публикаций, проведение теоретических исследований и сравнение результатов с данными, полученными эмпирическим путем.

Результаты. Получены зависимости метановыделения в изолированном аварийном участке от объема заперемывленного пространства, дебита источников метановыделения и утечек воздуха в нем.

Научная новизна. Установлены зависимости процесса метановыделения от длительности переходного газодинамического процесса в изолированном пожарном участке шахты, отличающиеся от известных учетом совокупного влияния горнотехнических параметров, характеризующих объем аварийного участка и дебит основных источников метановыделения. Предложены безопасные параметры изоляции пожарного участка путем сокращения утечек воздуха.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы при разработке нормативной документации в области горноспасательного дела, при прогнозировании времени переходного газодинамического процесса в изолированном пожарном участке. Это позволит повысить безопасность ведения горноспасательных работ при изоляции аварийных участков шахт с целью тушения пожаров.

Ключевые слова: шахта; подземный пожар; изолированный участок; газодинамические процессы; прогнозирование метановыделения; утечки воздуха.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Наибольшую опасность в угольных шахтах представляют аварии, в результате которых шахтный воздух становится непригодным для дыхания. К таким авариям относятся подземные пожары, взрывы газа и пыли, выбросы угля, породы и газа [1].

При борьбе с подземными пожарами применяют средства подавления очагов горения: воду, воздушно-механическую пену, огнетушительные порошки и инертные газы. Однако в ряде случаев активным способом пожар потушить не удастся. В таких ситуациях прибегают к изоляции пожара специальными перемычками [1, 2]. После закрытия проемов в изолирующих сооружениях и прекращения проветривания в изолированном пространстве происходят

переходные газодинамические процессы, что, в свою очередь, может привести к взрыву метановоздушной смеси. Соответственно, необходимо использовать методы прогнозирования процессов, происходящих в изолированном пространстве, с учетом своевременной оценки и изменения параметров, влияющих на взрывоопасность.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованиям газодинамических процессов в изолированных аварийных участках при тушении подземных пожаров посвящены работы В. Г. Агеева, С. П. Грекова, П. С. Пашковского, В. И. Лебедева, К. З. Ушакова и других [1–7]. Учеными установлено, что утечки воздуха через изолированные пожарные участки не нормируются. Однако известно, что для прекращения пламенного горения содержание кислорода в изолированном участке должно быть не более 8,0 %, а для прекращения тления – не более 2,0 % [1–3].

Соответственно, во всех случаях утечки воздуха через изолированный участок стремятся свести к минимуму. При этом практика показала, что закрытие проемов в изолирующих перемычках не позволяет поддерживать необходимый для тушения пожара уровень утечек воздуха и возникает необходимость выполнения дополнительного объема работ по «снятию» депрессии из изолированного участка [3]. Действующие нормативные документы запрещают вести работы в шахте, в том числе работы по тушению пожара, если объемная доля метана в выработке превышает 2,0 %. Поэтому необходимо заранее знать время образования взрывоопасной и взрывобезопасной концентрации, длительность переходного газодинамического процесса и содержание метана при установившемся (стационарном) режиме проветривания.

Цель работы – установить зависимость метановыделения в изолированном пожарном участке шахты от длительности переходного газодинамического процесса для повышения безопасности ведения горноспасательных работ.

Результаты исследований. Тушение и изоляцию подземного пожара проводят при отсутствии работ в очистных забоях, что уменьшает метановыделение и снижает концентрацию метана в исходящих вентиляционных струях. Этот фактор рассчитывается или учитывается при проведении замеров в аварийных условиях.

После изоляции аварийного участка большая часть объема метана, поступающего в аварийные выработки, выделяется из отбитого угля, плоскостей разрабатываемого угольного пласта и сближенных пластов-спутников. Рассмотрим период действия каждого из указанных источников.

Интенсивность выделения метана из угля, отделенного от массива, снижается со временем и определяется по формуле [4]

$$v = v_0 e^{-k_0 t_0}, \quad (1)$$

где ν – интенсивность газовыделения из отбитого от массива угля, $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{т})$;
 ν_0 – интенсивность газовыделения из угля в момент отрыва его от массива, $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{т})$;
 e – основание натурального логарифма;
 k_y – коэффициент, характеризующий свойства угля, определяется опытным путем;
 t_y – время, прошедшее с момента отслоения угля от массива, мин.

Установлено, что формула (1) справедлива для интервала времени 10...12 ч. При большем интервале погрешность увеличивается.

Исследования показали, что газовыделение из угля, измельченного до мелких фракций (при работе комбайнов) в процессе выемки, значительно влияет на общий газовый баланс выемочного участка только в момент отслоения угля от массива [5].

Учитывая, что между моментом возникновения пожара и моментом его изоляции проходит несколько суток, указанный фактор можно не учитывать при моделировании.

Выделение метана с поверхности обнажения угольного пласта характеризуется высокой интенсивностью в момент обнажения и быстрым снижением ее в течение времени. Приблизительно процесс характеризуется уравнением [1]

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \sqrt{\frac{t_2}{t_1}},$$

где ν_1, ν_2 – количество газа, выделившегося с единицы поверхности обнажения угольного пласта в моменты времени t_1 и t_2 , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$;

t_1, t_2 – периоды времени, прошедшие с момента обнажения угольного пласта, сут.

Метановыделение из сближенных угольных пластов в выработанном пространстве для условий Донецкого бассейна составляет 40...60 %. Метан выделяется за счет фильтрации под действием высокого газового давления. Поэтому изменение дебита расхода воздуха или изменение барометрического давления не оказывает существенного влияния на газовыделение из сближенных угольных пластов в выработанное пространство.

Таким образом, после изоляции аварийного участка метан в изолированное пространство поступает с поверхности обнажения угольного пласта и из сближенных угольных пластов. Тогда интенсивность газовыделения в изолированном пространстве в данный момент времени I , $\text{м}^3/\text{мин}$, определим следующим образом:

$$I = I_0 - I_1 t_{\text{п}},$$

где I_0 – начальное значение метановыделения (в момент закрытия проемов в изолирующих перемышках), м³/мин;

I_1 – коэффициент, учитывающий уменьшение метановыделения в изолированном участке с течением времени, м³/мин²;

$t_{\text{п}}$ – время, прошедшее после закрытия проемов в изолирующих перемышках, мин.

При исследовании процесса метанонакопления в изолированном участке необходимо учитывать следующее:

- в изолированное пространство поступает свежий воздух, перемешиваясь с метаном;

- под действием тепловой депрессии, гравитационного напора и диффузии происходит перемешивание газов в изолированном пространстве.

Также необходимо принимать меры по недопущению влияния работы вентилятора главного проветривания на изолированный участок.

Рассмотрим, насколько увеличивается объем метана в изолированном пространстве через произвольный промежуток времени $[t_{\text{п}}; t_{\text{п}} + \Delta t]$ за счет выделения его из отбитого угля, с поверхности обнажения разрабатываемого пласта и вышележащих сближенных угольных пластов. Накоплению метана препятствуют утечки воздуха, которые выносят метан за пределы изолированного участка [2]. Следовательно, получим зависимость

$$V(t_{\text{п}} + \Delta t) = V(t_{\text{п}}) + I(t_{\text{п}} + \frac{1}{2} \Delta t) \Delta t - C(t_{\text{п}} + \frac{1}{2} \Delta t) \Delta t Q_{\text{исх}}, \quad (2)$$

где V – объем метана в изолированном участке, м³;

C – объемная доля метана в изолированном пространстве, %;

$Q_{\text{исх}}$ – утечки воздуха через изолированный пожарный участок, замеренные со стороны исходящей струи, м³/мин.

Перенесем $V(t_{\text{п}})$ в левую часть формулы (2) и поделим равенство на Δt

$$\frac{V(t_{\text{п}} + \Delta t) - V(t_{\text{п}})}{\Delta t} = I(t_{\text{п}} + \frac{1}{2} \Delta t) - C(t_{\text{п}} + \frac{1}{2} \Delta t) Q_{\text{исх}}.$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, будем иметь

$$\frac{dV}{dt} = I(t_{\text{п}}) - C(t_{\text{п}}) Q_{\text{исх}}. \quad (3)$$

Поскольку $C(t_n) = \frac{V(t_n)}{V}$, то из формулы (3) очевидно следует

$$V \frac{dC}{dt} = I - CQ_{\text{исх}}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4) – линейное неоднородное, его решение можно представить в виде

$$C(t_n) = ce^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V}t_n} + A + Bt_n, \quad (5)$$

где c , A и B – константы.

Найдем константы A и B , подставив выражение (5) в исходное уравнение (4)

$$-cQ_{\text{исх}}e^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V}t_n} + BV + cQ_{\text{исх}}e^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V}t_n} + Q_{\text{исх}}A + Q_{\text{исх}}Bt_n = I_0 - I_1t_n. \quad (6)$$

Приравнявая коэффициенты с одинаковыми степенями, получим систему алгебраических уравнений относительно A и B

$$\begin{cases} Q_{\text{исх}}B = -I_1 \\ BV + Q_{\text{исх}}A = I_0 \end{cases},$$

откуда найдем, что

$$\begin{cases} B = -\frac{I_1}{Q_{\text{исх}}} \\ A = \frac{1}{Q_{\text{исх}}} \left(I_0 - \frac{I_1V}{Q_{\text{исх}}} \right) \end{cases}.$$

Тогда уравнение (6) примет вид

$$C(t_n) = ce^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V}t_n} + \frac{1}{Q_{\text{исх}}} \left(I_0 - \frac{I_1V}{Q_{\text{исх}}} - I_1t_n \right). \quad (7)$$

Константу c в уравнении (7) определим из начального условия $C(0) = 0$. Подставив в уравнение (7) значения $t = 0$ и $C = 0$, получим

$$c = \frac{1}{Q_{\text{исх}}} \left(\frac{I_1 V}{Q_{\text{исх}}} - I_0 \right).$$

В результате преобразований формула (7) примет окончательный вид

$$C(t_{\text{п}}) = \frac{1}{Q_{\text{исх}}} \left[\left(I_0 - \frac{I_1 V}{Q_{\text{исх}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V} t_{\text{п}}} \right) - I_1 t_{\text{п}} \right]. \quad (8)$$

В течение первых часов после закрытия проемов возникает необходимость в прогнозировании концентраций метана. Для этого периода можно принять, что метановыделение остается постоянным. В частном случае если газовыделение в изолированном пространстве не изменяется, то есть если $I_1 = 0$, то уравнение (8) примет вид

$$C(t_{\text{п}}) = \frac{I_0}{Q_{\text{исх}}} \left(1 - e^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V} t_{\text{п}}} \right). \quad (9)$$

Через некоторое время после закрытия проемов объемная доля метана в изолированном участке достигнет некоторого максимума. Этот момент свидетельствует о завершении переходного газодинамического процесса и установлении газового равновесия: объем метана, поступающего в изолированное пространство, будет равен объему метана, выделяющегося из него [6]. В этот период концентрация метана достигает максимального значения.

Из формулы (9) можно найти время $t_{\text{п}}$, за которое концентрация метана в изолированном пространстве достигает заданного значения a

$$t_{\text{п}}(C) = -\frac{V}{Q_{\text{исх}}} \ln \left(1 - C \frac{Q_{\text{исх}}}{I_0} \right). \quad (10)$$

Анализ формулы (9) показывает, что при $t_{\text{п}} \rightarrow 0$ выражение $e^{-\frac{Q_{\text{исх}}}{V} t_{\text{п}}}$ стремится к нулю. Утечки воздуха через изолированный участок, замеренные со стороны исходящей струи, состоят из смеси свежего воздуха и метана. Причем

в стационарном режиме проветривания выделившийся метан будет выходить за пределы изолированного участка, то есть для установившегося режима проветривания справедливо равенство

$$Q_{\text{исх}} = Q_{\text{ут}} + I_0,$$

где $Q_{\text{ут}}$ – утечки воздуха через изолированный участок, м³/мин.

Максимальная концентрация метана C_{max} в установившемся режиме проветривания равна

$$C_{\text{max}} = \frac{I_0}{Q_{\text{ут}} + I_0}.$$

Формулы (9) и (10) справедливы для случаев, когда $0 < C < C_{\text{max}}$.

$$C(t_{\text{п}}) = \frac{I_0}{Q_{\text{ут}} + I_0} \left(1 - e^{-\frac{Q_{\text{ут}} + I_0}{V} t_{\text{п}}} \right), \quad (11)$$

$$t_{\text{п}}(C) = -\frac{V}{Q_{\text{ут}} + I_0} \ln \left(1 - C \frac{Q_{\text{ут}} + I_0}{I_0} \right). \quad (12)$$

С целью получения графического выражения зависимости (11) выполнены соответствующие расчеты (рис.) при следующих исходных данных: $V = 50 \cdot 10^3$ м³, $Q_{\text{ут}} = 20$ м³/мин, $I = 10$ м³/мин.

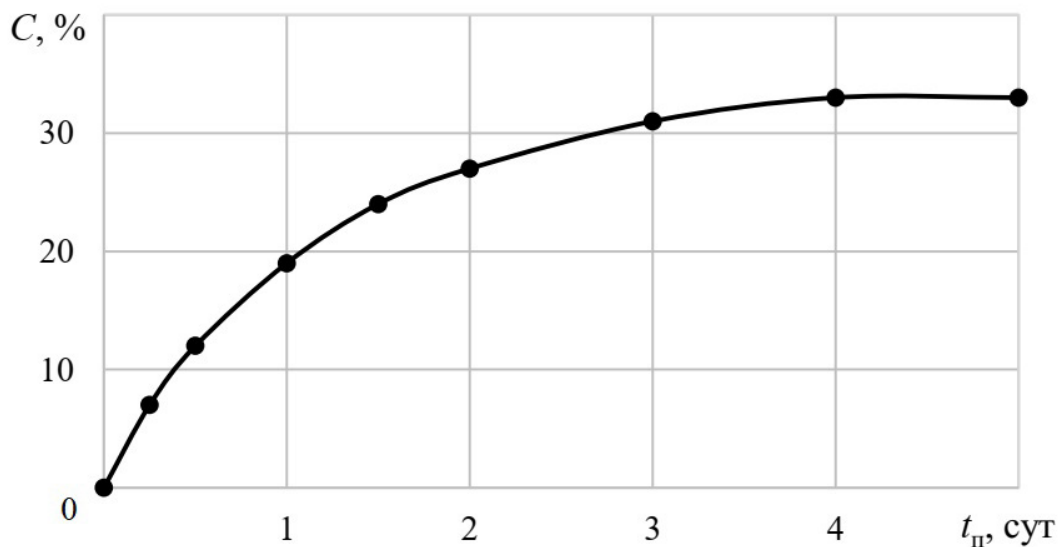


Рис. Динамика объемной доли метана в изолированном пожарном участке

Практический интерес представляет продолжительность переходного газодинамического процесса, когда концентрация метана достигнет максимального значения. Для нахождения указанной величины подставим в формулу (12) значение $C_{\max}$ из формулы (11). Тогда получим

$$t(C_{\max}) = -\frac{V}{Q_{\text{ут}} + I} \ln 0 = \infty. \quad (13)$$

Для прогнозирования максимальной концентрации метана C_m в изолированном пожарном участке после завершения переходного газодинамического процесса формулу (13) преобразуем следующим образом:

$$C_m = kC_{\max} = \frac{100I_0}{Q_{\text{ут}} + I_0},$$

где C_m – объемная доля метана после завершения переходного газодинамического процесса, %;

k – коэффициент снижения концентрации метана, принимается равным 0,95...0,99.

В таблице 1 приведены результаты расчета максимальных концентраций метана в зависимости от утечек воздуха через изолированный участок и значения метановыделения после завершения переходного газодинамического процесса.

Таблица 1

Прогнозирование максимальной концентрации метана
в изолированном пожарном участке

Утечки воздуха через изолированный пожарный участок, м ³ /мин	Метановыделение, м ³ /мин							
	2	4	6	8	10	12	14	16
5	28,6	44,4	54,5	61,5	66,7	70,6	73,7	76,2
10	16,7	28,6	37,5	44,4	50,0	54,5	58,3	61,5
20	9,1	16,7	23,1	28,6	33,3	37,5	41,2	44,4
30	6,2	11,8	16,7	21,1	25,0	28,6	31,8	34,8
40	4,8	9,1	13,0	16,7	20,0	23,1	25,9	28,6

Из таблицы 1 видно, что при значении утечек воздуха 20 м³/мин и метановыделения 2,0 м³/мин образуется взрывоопасная концентрация

метана, равная 9,1 %, что может привести к взрыву метановоздушной смеси. Существенно уменьшить объем взрывоопасной концентрации метана можно, сократив утечки воздуха через изолированный участок до 5...10 м³/мин.

Оценим длительность переходного газодинамического процесса и влияние на него каждого фактора. Примем исходные параметры: $V = 50 \cdot 10^3$ м³, $I_0 = 10$ м³/мин, $Q_{\text{ут}} = 20$ м³/мин.

Как известно, утечки воздуха – основной параметр, от которого зависит успех тушения пожара методом изоляции [1, 6, 7]. Поэтому рассмотрим их влияние на длительность переходного газодинамического процесса. Для практических целей максимальную объемную долю метана достаточно определить с точностью до 5,0 %. Учитывая вышесказанное, из формулы (12) получим

$$t(C_{\text{м. max}}) = -\frac{V}{Q_{\text{ут}} + I_0} \ln(1 - 0,95). \quad (14)$$

Подставив в уравнение (14) исходные данные, после преобразований получим продолжительность переходного газодинамического процесса t_{max} , сут

$$t_{\text{max}} = \frac{103}{10 + Q_{\text{ут}}}.$$

Из формулы (14) видно, что продолжительность переходного газодинамического процесса зависит и от объема изолированного пространства. Поэтому определим продолжительность переходного газодинамического процесса для разных значений объема изолированного пространства, имея исходные значения $I_0 = 10$ м³/мин, $Q_{\text{ут}} = 20$ м³/мин (табл. 2).

Таблица 2

Продолжительность переходного газодинамического процесса

Объем изолированного пожарного участка, м ³	10·10 ³	20·10 ³	50·10 ³	100·10 ³	200·10 ³	500·10 ³
Продолжительность переходного газодинамического процесса, сут	0,7	1,4	3,2	6,4	12,8	32,0

Из таблицы 2 видно, что, принимая значения параметров из формулы (14), продолжительность переходного газодинамического процесса увеличивается в течение 0,7...32,0 сут.

Практический интерес также представляют интервалы времени, в течение которых концентрация метана достигает критических значений. Рассмотрим влияние утечек воздуха на условия образования в изолированном участке критических значений концентраций метана. При расчетах были приняты следующие исходные данные: $V = 50 \cdot 10^3 \text{ м}^3$, $I_0 = 10 \text{ м}^3/\text{мин}$ (табл. 3).

Таблица 3

Длительность образования в изолированном участке критических значений концентраций метана

Объемная доля метана, %	Утечки воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$						
	2	5	10	15	20	30	40
2,0	1,69	1,71	1,72	1,73	1,74	1,75	1,76
4,3	3,68	3,71	3,75	3,79	3,84	3,91	4,03
15,0	13,8	14,2	14,8	15,7	16,5	19,1	23,1

Из таблицы 3 видно, что с увеличением утечек воздуха через изолированный пожарный участок увеличивается длительность образования критических концентраций метана. Соответственно, рассмотрим влияние объема изолированного пространства на образование критических значений концентраций метана (табл. 4) при $I_0 = 10 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{ут}} = 20 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Таблица 4

Влияние объема изолированного пространства на образование критических значений концентраций метана

Объемная доля метана, %	Объем изолированного пожарного участка, м^3					
	$10 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$250 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$
2,0	0,34	0,86	1,72	3,44	8,59	17,2
4,3	0,77	1,91	3,83	7,67	19,20	38,3
15,0	3,32	8,30	16,60	33,20	83,00	166,0

Из таблицы 4 следует, что чем больше объем изолированного пространства, тем позже в нем образуется критическая концентрация.

Выводы. Таким образом, для безопасного выполнения горноспасательных работ по тушению и изоляции подземного пожара установлены зависимости, учитывающие совокупное влияние горнотехнических параметров, характеризующих объем аварийного участка, дебит метана и утечек воздуха, на основании которых разработан численный метод прогноза метановыделения в изолированном пожарном участке шахты.

Проведенные теоретические исследования позволили установить следующее:

- интенсивность переходного газодинамического процесса в аварийном участке зависит от объема изолированного пространства и значения метановыделения в нем;
- продолжительность переходного газодинамического процесса при изоляции пожарного участка на шахтах, опасных по газу, может достигать нескольких десятков суток;
- после завершения переходного газодинамического процесса в изолированном участке вероятно образование взрывоопасной концентрации метана. Устранить это явление можно, сократив утечки воздуха.

Список литературы / References

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

Pashkovskiy P. S. *Provetrivanie shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines in case of underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 448 p. (In Russian)

2. Смоланов, С. Н. Ликвидация сложных подземных аварий методом вентиляционного воздействия / С. Н. Смоланов. – Днепропетровск : Наука и образование, 2002. – 272 с.

Smolanov S. N. *Likvidatsiya slozhnykh podzemnykh avariy metodom ventilyatsionnogo vozdeystviya* [Elimination of complicated underground accidents applying ventilation method]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovanie Publ., 2002, 272 p. (In Russian)

3. Кукоба, Л. И. Снижение утечек воздуха через изолированный пожарный участок / Л. И. Кукоба, В. И. Лебедев // Уголь Украины. – 2002. – № 2 – 3. – С. 61 – 63.

Kukoba L. I., Lebedev V. I. *Snizhenie utechek vozdukha cherez izolirovannyi pozharuyu uchastok* [Reducing ventilation losses in sealed fire area]. *Ugol Ukrainy*, 2002, no. 2-3, pp. 61-63. (In Russian)

4. Ушаков, К. З. Газовая динамика шахт / К. З. Ушаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 481 с.

Ushakov K. Z. *Gazovaya dinamika shakht. 2-e izd., pererab. i dop.* [Gas dynamics of mines. The 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta Press, 2004, 481 p. (In Russian)

5. Полевщиков, Г. Я. Метановыделение из отбитого угля / Г. Я. Полевщиков, М. В. Шинкевич // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 5. – С. 60 – 63.

Polevshchikov G. Ya., Shinkevich M. V. *Metanovydelenie iz otbitogo uglya* [Methane emission from shot coal]. *Vestnik KuzGTU*, 2010, no. 5, pp. 60-63. (In Russian)

6. Перехрест, Ю. Н. Длительность переходного аэродинамического процесса в изолированном аварийном участке шахты / Ю. Н. Перехрест, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2015. – № 52. – С. 208 – 213.

Perekhrest Yu. N., Mavrodi A. V. *Dlitelnost perekhodnogo aerodinamicheskogo protsessa v izolirovannom avariynom uchastke shakhty* [Duration of transient aerodynamic process in the sealed accident area of mine]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2015, no. 52, pp. 208-213. (In Russian)

7. Агеев, В. Г. Управление вентиляцией при изоляции подземных пожаров / В. Г. Агеев // Уголь Украины. – 2012. – № 11. – С. 28 – 30.

Ageyev V. G. *Upravlenie ventilyatsiey pri izolyatsii podzemnykh pozharov* [Ventilation control in containment of underground fires]. *Ugol Ukrainy*, 2012, no. 11, pp. 28-30. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 23.06.2023

Aleksandr Mikhaylovich Simonov, head of department; e-mail: simonov54_54@mail.ru;

Aleksandr Viktorovich Mavrodi, scientific associate; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, Cand. Sci. (Tech.), principle engineer;

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

Federal State Institution "The Scientific Research Institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-34

TRANSIENT GAS-DYNAMIC PROCESSES IN CONTAINED FIRE AREA OF COAL MINE

Purpose. To determine the dependence between methane emission in the contained fire area of coal mine and duration of transient gas-dynamic process in order to improve mine works safety.

Methods. The integrated method of investigation has been applied that contains the analysis of scientific publications, theoretical studies conduction and comparison of results with the data obtained empirically.

Results. The dependences of the methane emission in the contained accident area on the sealed space size, the capacity of sources and the ventilation losses in it have been derived.

Scientific novelty. The dependences of the methane emission process on the transient gas-dynamic process duration in the contained fire area have been determined; they differ from the known ones by accounting for cumulative influence of the mining parameters that characterize the accident area size and the capacity of main sources of methane emission. The parameters for secure sealing of the fire area by reducing the ventilation losses have been proposed.

Practical value. The results of investigations may be applied for development of regulatory documents in the field of mine-rescue works as well as in prediction of transient gas-dynamic process period in the contained fire area. It will make it possible to improve the safety of mine-rescue operations dealing with sealing of accident areas of mines during elimination of fires.

Keywords: mine; underground fire; sealed area; gas-dynamic processes; methane emission predicting; ventilation losses.

УДК [622.822.7:614.844.2"Завеса"]:622.414.3

Андрей Юрьевич Коляда, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

Игорь Феликсович Дикенштейн, науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+7 856) 332-78-40

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Цель. Установить зависимость для определения фактического значения депрессии в горных выработках при работе установок водяной завесы для локализации пожаров.

Методы. Аналитические исследования процессов, протекающих при локализации пожаров распыленной водой.

Результаты. Полученная аналитическая зависимость позволяет рассчитать дополнительную депрессию при работе установок водяной завесы.

Научная новизна. Впервые получена зависимость для определения фактического значения депрессии в горных выработках при работе установок водяной завесы.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы для разработки мероприятий по устойчивому проветриванию аварийных выработок.

Ключевые слова: *пожар; горная выработка; тепловая депрессия; опрокидывание струи; распыленная вода; установка локализации.*

Постановка проблемы. Отечественный и зарубежный опыт ликвидации пожаров свидетельствует, что сложность их протекания и время ликвидации существенно возросли. В некоторых случаях это обусловлено необходимостью решить ряд аэротермодинамических задач для выбора и обоснования аварийного вентиляционного режима. Особую сложность представляют расчеты устойчивости проветривания наклонных выработок при пожарах, ошибка в которых может привести к гибели горнорабочих в результате непредвиденного опрокидывания вентиляционной струи под действием собственной тяги пожара, термического расширения воздуха или напора, создаваемого средствами пожаротушения.

В отличие от пожаров, которые ликвидируют активным способом, то есть непосредственным воздействием на очаг огнетушащими средствами, сложные пожары обычно тушат методом локализации или комбинированным методом, когда после локализации на пожар дополнительно воздействуют огнетушащими средствами.

Одним из примеров сложного пожара может служить авария, случившаяся в вентиляционном ходке, соединявшем 9-й и 8-й западные конвейерные штреки шахты им. А.Ф. Засядько. Быстрому развитию

пожара способствовала тепловая депрессия, величина которой достигала 900 Па. Тушение пожара выполнялось методом локализации с применением средств подачи распыленной воды. Пожар удалось потушить только через 10 месяцев [1].

При разработке оперативных планов ликвидации сложных пожаров большое значение имеет обоснование параметров аварийных вентиляционных режимов, обеспечивающих безопасное ведение горноспасательных работ. В этой связи особая роль отводится учету влияния параметров применяемых средств локализации пожара на аэродинамические характеристики вентиляционной сети аварийного участка.

Анализ последних публикаций. Основные требования к выбору аварийного режима проветривания шахт были опубликованы в «Руководстве по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения» (1985) и «Рекомендациях по выбору эффективных режимов проветривания шахт при авариях» (1995). В работе [2] указанные задачи и решения были дополнены и расширены, в том числе с учетом термодинамических процессов в шахтном воздухе. В работах [3–5] установлены особенности выбора аварийных вентиляционных режимов при ликвидации экзогенных пожаров, обоснованы критерии подобия при моделировании аэродинамического взаимодействия капельной жидкости с вентиляционным потоком. Существующие нормативные документы по этому вопросу устарели и требуют доработки. При этом проблемы учета дополнительной депрессии, возникающей вследствие работы установок водяной завесы, полностью не решены.

Цель исследования – установить зависимость для определения фактического значения депрессии в горных выработках при работе установок водяной завесы для локализации пожаров.

Результаты исследований. Тепловая депрессия, возникающая при пожаре в наклонной выработке, носит локальный характер и может быть определена с помощью специального оборудования или расчетов.

Аэродинамическое сопротивление аварийного участка R_a , Па·с²/м⁶, вычисляют по формуле

$$R_a = k_{тр} R, \quad (1)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент термического расширения воздуха;

R – аэродинамическое сопротивление выработки до возникновения в ней пожара, Па·с²/м⁶.

Коэффициент термического расширения воздуха $k_{тр}$ определм по следующей зависимости [6]:

$$k_{\text{тр}} = 0,5 + \frac{l_{\text{г}}}{2l} \left[\frac{4t_{\text{г}}(1-t_0)}{t_0} + \frac{20\sqrt{S_{\text{в}}}}{k_t t_0 l_{\text{г}}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) \right],$$

где $l_{\text{г}}$ — длина зоны горения, м;

l — длина аварийной выработки, м;

$t_{\text{г}}$ — температура горения материалов, К;

t_0 — температура воздуха, поступающего в аварийный участок, К;

$S_{\text{в}}$ — площадь сечения аварийного участка, м²;

k_t — коэффициент нагрева воздуха;

$t_{\text{в}}$ — температура воздуха на выходе из аварийного участка, К.

Коэффициент нагрева воздуха k_t в зоне горения определяют по формуле

$$k_t = 0,04(3,0 + 3,75 \frac{S_{\text{в}}}{Q}),$$

где Q — расход воздуха, поступающего в аварийный участок, м³/с.

Вычислим температуру воздуха на выходе из аварийного участка $t_{\text{в}}$, К, по формуле

$$t_{\text{в}} = \frac{(t_{\text{м}} + t_0)t_0 + (t_{\text{м}}^2 - t_0^2)e^{-50k_t l \sqrt{0,4S_{\text{в}}}}}{t_{\text{м}} + t_0},$$

где $t_{\text{м}}$ — максимальная температура пожарных газов, К.

$$t_{\text{м}} = t_0 + \frac{(t_{\text{г}} + t_0)(1 - e^{-\frac{2k_t l_{\text{г}}}{\sqrt{S_{\text{в}}}}})}{(1 + e^{\frac{k_t l_{\text{г}}}{\sqrt{S_{\text{в}}}}})},$$

Для локализации пожара горноспасатели устанавливают водяные завесы на пути его движения, а при тушении в выработках, оборудованных ленточными конвейерами, установки водяного пожаротушения включаются автоматически при повышении температуры до порога срабатывания теплового датчика, образуя водяную завесу. Такая завеса должна полностью перекрывать поперечное сечение выработки. Схема наклонной выработки с восходящим потоком воздуха при работе установок водяного пожаротушения для локализации представлена на рисунке.

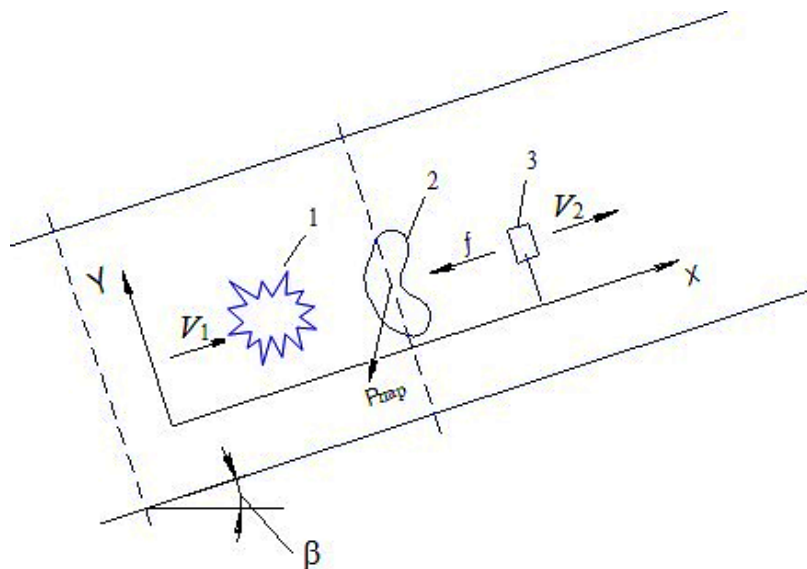


Рис. Схема локализации пожара установками водяного пожаротушения в наклонной выработке:

1 – очаг пожара; 2 – облако пара; 3 – установка пожаротушения (локализации);
 V_1 – скорость восходящего потока воздуха; V_2 – скорость подачи распыленной воды;
 X, Y – направление оси; $P_{\text{пар}}$ – сила тяжести образовавшегося пара;
 β – угол между проекцией силы тяжести образовавшегося пара и продольной осью аварийной выработки; f – сила аэродинамического сопротивления

Установка водяных завес для тушения пожара создает дополнительные воздушные преграды, приводящие к нарушению вентиляции подземных выработок.

При разработке математической модели примем следующие допущения:

- в нагретую очагом пожара газозвоздушную струю впрыскивают сонаправленно или противонаправленно струи тонкораспыленной воды;
- коагуляцию и дробление капель воды не учитывают;
- несущая непрерывная фаза – газозвоздушный поток; дискретная фаза – капли воды, равномерно распыленные в вентиляционном потоке;
- следствие взаимодействия газозвоздушного потока с каплями распыленной жидкости – газодинамическое сопротивление, вызванное различием векторов их скоростей движения.

Рассмотрим взаимодействие газозвоздушного потока с каплями распыленной воды.

В общем случае модуль силы аэродинамического сопротивления $|\vec{f}|$, Н, является степенной функцией скорости обтекания капли $(\vec{V}_1 - \vec{V}_2)$ потоком

$$|\vec{f}| = c_{\omega} S_{\kappa} (\vec{V}_1 - \vec{V}_2)^2, \quad (2)$$

где c_ω – коэффициент аэродинамического сопротивления;

S_κ – площадь сечения капли, м²;

V_1 – скорость газовой воздушного потока, м/с;

V_2 – скорость капли, м/с.

Площадь сечения капли

$$S_\kappa = \frac{\pi d_\kappa^2}{4}, \quad (3)$$

где d_κ – диаметр капли, м.

Коэффициент аэродинамического сопротивления принимают из условия

$$c_\omega = \frac{0,14404}{V_1^2 + V_2^2}. \quad (4)$$

С учетом уравнений (3), (4) преобразуем формулу (2)

$$|\vec{f}| = \frac{0,03\pi d_\kappa^2}{(V_1^2 + V_2^2)} (\vec{V}_1 - \vec{V}_2)^2.$$

Количество капель в завесе N_κ составляет

$$N_\kappa = \frac{6M_\text{в}}{\pi d_\kappa^3},$$

где $M_\text{в}$ – объемный расход воды, м³/с.

Тогда суммарная сила аэродинамического сопротивления F , Н,

$$F = fN_\kappa = \frac{0,216M_\text{в}}{d_\kappa (V_1^2 + V_2^2)} (V_1 - V_2)^2. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что наибольшее влияние на вентиляционный поток в аварийной выработке будут иметь капли малого диаметра при их встречном движении.

Депрессия, возникающая вследствие сопротивления распыленных капель $h_{\text{зав}}^{(1)}$, Па, составит

$$h_{\text{зав}}^{(1)} = \frac{|F|}{S_\text{в}};$$

$$h_{\text{зав}}^{(1)} = \frac{0,216M_{\text{в}}}{d_{\text{к}}S_{\text{в}}(V_1^2 + V_2^2)}(V_1 - V_2)^2.$$

Депрессия увеличивается вследствие испарения капель и образования пара, воздействующего на газозвушной поток.

Объемный расход испарившейся воды $M_{\text{исп}}$, м³/с, составит

$$M_{\text{исп}} = M_{\text{в}}\chi k_{\text{ув}},$$

где χ — доля испарившейся воды в завесе. Определяют согласно [7]

$$\chi = e^{-\frac{(ad_k^2)}{T_{\text{гк}}}},$$

где a — эмпирический коэффициент, равный 7695 °С/мм² [7];

$T_{\text{гк}}$ — температура горючих газов, °С.

$k_{\text{ув}}$ — коэффициент увеличения объема воды при испарении, равный 1700 [8].

Депрессия, возникающая вследствие образования пара из испарившейся воды $h_{\text{зав}}^{(2)}$, Па, составит

$$h_{\text{зав}}^{(2)} = \frac{P_{\text{пар}}}{S_{\text{в}}} = \frac{M_{\text{в}}\chi\rho_{\text{п}}k_{\text{ув}}\sin\beta}{S_{\text{в}}},$$

где $P_{\text{пар}}$ — сила тяжести образовавшегося пара, Н;

β — угол между проекцией силы тяжести образовавшегося пара и продольной осью аварийной выработки, град.

Общая дополнительная депрессия $h_{\text{зав}}$, Па, создаваемая установкой локализации пожара, составит

$$h_{\text{зав}} = h_{\text{зав}}^{(1)} + h_{\text{зав}}^{(2)} = \frac{0,216M_{\text{в}}}{d_{\text{к}}S_{\text{в}}(V_1^2 + V_2^2)}(V_1 - V_2)^2 + \frac{M_{\text{в}}\chi\rho_{\text{п}}k_{\text{ув}}\sin\beta}{S_{\text{в}}}.$$

Выводы. Работа установок водяной завесы приводит к увеличению аэродинамического сопротивления аварийной горной выработки и изменению режима аварийной вентиляции, вплоть до опрокидывания вентиляционной струи. Получено выражение для определения суммарной силы аэродинамического сопротивления, создаваемого водяными завесами, которые устанавливают в аварийных горных выработках. Также определено,

что аэродинамическое сопротивление возрастает при уменьшении диаметра капель и одновременном увеличении их концентрации.

Список литературы / References

1. Минеев, С. П. О некоторых вопросах тушения сложных пожаров в угольных шахтах / С. П. Минеев // Восточно-европейский научный журнал. – 2018. – № 9. – С. 52 – 58.

Mineyev S. P. *O nekotorykh voprosakh tusheniya slozhnykh pozharov v ugolnykh shakhtakh* [On certain issues of extinguishing the complicated fires in coal mines]. *Vostochno-evropeyskiy nauchnyy zhurnal*, 2018, no. 9, pp. 52-58. (In Russian)

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

Pashkovskiy P. S., Lebedev V. I. *Provetrivanie shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation in mines in conditions of underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 448 p. (In Russian)

3. Булгаков, Ю. Ф. Закономерности проявления аэродинамического сопротивления технических средств пожаротушения / Ю. Ф. Булгаков, С. А. Алексеенко, Я. В. Мельникова // Проблемы аэрологии горнодобывающих предприятий. Труды 2-й научно-технической конференции. – Днепропетровск : НГУНАН Украины, 2004. – С. 37 – 43.

Bulgakov Yu. F., Alekseyenko S. A., Melnikova Ya. V. *Zakonomernosti proyavleniya aerodinamicheskogo soprotivleniya tekhnicheskikh sredstv pozharotusheniya* [Regularities of fire-extinguishing equipment aerodynamic resistance]. *Problemy aerologii gornodobyvayushchikh predpriyatiy. Trudy 2-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Dnepropetrovsk, NGUNAN Ukrainy Publ., 2004, pp. 37-43. (In Russian)

4. Булгаков, Ю. Ф. Аэродинамическое взаимодействие капельной жидкости с вентиляционными струями при пожарах / Ю. Ф. Булгаков, В. А. Трофимов, Я. В. Мельникова // Известия Донецкого горного института. – 2004. – № 2. – С. 11 – 16. URL: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/17867/1/131.pdf> (дата обращения: 04.08.2023).

Bulgakov Yu. F., Trofimov V. A., Melnikova Ya. V. *Aerodinamicheskoe vzaimodeystvie kapelnoy zhidkosti s ventilyatsionnymi struyami pri pozharakh* [Aerodynamic interaction of droplet fluid with ventilation streams in case of fires]. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta*, 2004, no. 2, pp. 11-16. Available at: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/17867/1/131.pdf> (accessed on 04.08.2023). (In Russian)

5. Мельникова, Я. В. Исследование аэродинамических параметров сети горных выработок при работе технических средств пожаротушения /

Я. В. Мельникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № S1. – С. 128 – 134. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_15603307_69220101.pdf (дата обращения: 04.08.2023).

Melnikova Ya. V. *Issledovanie aerodinamicheskikh parametrov seti gornykh vyrabotok pri rabote tekhnicheskikh sredstv pozharotusheniya* [Studying the aerodynamic parameters of mine workings network in conditions of operating fire-extinguishing equipment]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2005, no. S1, pp. 128-134. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_15603307_69220101.pdf (accessed on 04.08.2023). (In Russian)

6. Булгаков, Ю. Ф. Оценка параметров шахтной вентиляционной сети при подземных пожарах / Ю. Ф. Булгаков, Я. В. Мельникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S13. – С. 107 – 114. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_13077892_22892129.pdf (дата обращения: 04.08.2023).

Bulgakov Yu. F., Melnikova Ya. V. *Otsenka parametrov shakhtnoy ventilyatsionnoy seti pri podzemnykh pozharakh* [Assessment of mine ventilation network parameters in conditions of underground fires]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, no. S13, pp. 107-114. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_13077892_22892129.pdf (accessed on 04.08.2023). (In Russian)

7. Агеев, В. Г. Параметры локализации подземных пожаров распыленной водой / Агеев, В. Г., А. Ю. Коляда // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2021. – № 3(58). – С. 50 – 59.

Ageyev V. G., Kolyada A. Yu. *Parametry lokalizatsii podzemnykh pozharov raspylyonnoy vodoy* [Parameters of underground fires containment applying the sprayed water]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2021, no. 3(58), pp. 50-59. (In Russian)

8. Дауэнгауэр, С. А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С. А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 78 – 81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives/viewer> (дата обращения: 04.08.2023).

Dauengauer S. A. *Pozharotushenie tonkoraspylyonnoy vodoy: mekhanizmy, osobennosti, perspektivy* [Sprayed water fire-extinguishment: procedures, specifics, prospects]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2004, no. 6, pp. 78-81. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/fire-extinguishing-with-fine-dispersed-water-mechanism-characteristics-perspectives/viewer> (accessed on 04.08.2023). (In Russian)

Andrey Yuryevich Kolyada, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

Igor Feliksovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Dmitry Sergeyevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru

*Federal State Institution "The Scientific Research Institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-40*

ASSESSMENT OF VENTILATION STABILITY IN CONTAINMENT OF UNDERGROUND FIRES IN MINE WORKINGS

Purpose. To establish a dependence for determining the depression actual value in the mine workings during containment of fires using water screen installations.

Methods. Analytical studies of processes proceeding during containment of fires applying the sprayed water.

Results. The derived analytical dependence makes it possible to calculate the additional depression occurring due to operating water screen installations.

Scientific novelty. The novel dependence has been derived for determination of depression actual value in the mine workings with operating water screen installations.

Practical value. The results of investigations may be applied in development of activities for securing the stable ventilation in the accident workings.

Keywords: *fire; mine working; thermal drop of ventilation pressure; airflow reversal; sprayed water; installation for fire containment.*

II. Безопасность труда

УДК 510.644.4:622.867.3

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, начальник; e-mail: respirator@mail.dnmchs.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;

Андрей Викторович Ивахненко, инж.; e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В НЕЧЕТКОЙ ЗАДАЧЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Цель. Упрощение метода определения весовых коэффициентов для повышения эффективности решения многокритериальных задач.

Методы. Аналитические исследования методов определения весовых коэффициентов в нечеткой матрице попарных сравнений.

Результаты. Предложен приближенный модальный метод определения весовых коэффициентов, на двух матрицах попарного сравнения установлена согласованность результатов с известными методами.

Научная новизна. Впервые предложен приближенный модальный метод определения весовых коэффициентов в нечеткой задаче принятия решений.

Практическая значимость. Метод определения весовых коэффициентов – основной этап в задаче принятия решений. Результаты расчета методом определения весовых коэффициентов позволяют быстро и точно определить приоритетность альтернатив и повысить эффективность принятия решений в многокритериальных задачах разных областей науки и техники.

Ключевые слова: нечеткая матрица попарных сравнений; весовые коэффициенты; треугольные числа; целевая функция; расстояние по Евклиду; система алгебраических уравнений.

Постановка проблемы. Нечеткая постановка задачи возникает в многокритериальной модели принятия решений при появлении хотя бы одного нечеткого критерия. Одна из распространенных процедур обработки информации, использующей нечеткие представления критериев, – нечеткий метод анализа иерархий (далее – НМАИ), базирующийся на фазифицированной матрице попарных сравнений Саати, с использованием четкой шкалы, а нечеткость вводится параметрически, так что получаемая треугольная нечеткая оценка элемента матрицы соответствует нечеткому множеству «примерно равно». Обычно параметр нечеткости в матрице попарных сравнений принимает значения $0,5 \dots 1,0$, а все элементы матрицы – треугольные нечеткие числа – симметричные. Выбор наилучшей альтернативы (например, наилучшего технического устройства) в условиях многокритериальной задачи является противоречивым, не имеющим формализованной постановки.

В таком случае чаще всего применяют методы, основанные, например, на взвешенной аддитивной или мультипликативной свертке. Взвешенность сверток отражает факт неравнозначности критериев, которым должны соответствовать альтернативы. Поэтому одна из актуальных задач в НМАИ – определение вектора весовых коэффициентов (приоритетов) критериев, от обоснованности и точности которых зависит эффективность принятия решения.

Анализ последних исследований. В работе [1] рассмотрена задача определения приоритетов проектов НМАИ, в котором оценки проектов по критериям получены экспертным путем. В работе не приведена шкала оценок проектов по критериям, но, судя по числовым значениям оценок, использована стандартная шкала Саати, что неправомерно. Это относительная шкала для попарного сравнения однородных атрибутов (критерия с критерием, проекта с проектом и т.д.). Для ранжирования проектов по критериям необходимо применение абсолютной оценочной шкалы. Поэтому результаты относительного приоритета проектов вызывают сомнение.

Метод Чанга [2], или метод расширенного анализа, является наиболее распространенным для задач принятия решений в условиях нечетких входных данных. Метод Чанга предполагает использование треугольной нечеткой матрицы попарных сравнений, по которой последовательно находят нормализованные построчные суммы, степень возможности того, что каждая из сумм больше или равна остальным суммам. Далее рассчитывают степень предпочтительности каждой из сумм относительно остальных и определяют вектор весовых коэффициентов. В последнее время метод Чанга подвергают серьезной критике из-за неточных, а в ряде случаев и абсурдных результатов решения задач НМАИ. Причина ошибочных результатов – применение нелинейного оператора $\min$ (для определения степени предпочтительности нечетких чисел) к функции, которая может принимать нулевое значение. Таким образом, алгоритм Чанга назначает нулевые значения некоторым весовым коэффициентам и одновременно увеличивает численные значения других весовых коэффициентов до выполнения условия нормировки. Это приводит к тому, что критерии, получившие нулевые значения весовых коэффициентов, практически не участвуют в процедуре ранжирования альтернатив. В работе [3] предложен модифицированный логарифмический метод наименьших квадратов (LLSM – logarithmic least squares method) для получения вектора весовых коэффициентов из нечеткой матрицы попарных сравнений. Это один из немногих методов, в котором компоненты вектора весовых коэффициентов представлены нечеткими треугольными числами. Суть его в том, что задача определения весовых коэффициентов сведена к решению нелинейной оптимизационной задачи – нахождению минимальных квадратов разности логарифмов компонент искомых весовых коэффициентов и числовых значений компонент матрицы попарных сравнений. На целевую функцию

наложена система ограничений в виде алгебраических уравнений и неравенств. Недостаток метода [4] – увеличенное основание нечетких треугольных чисел весовых коэффициентов. Проведенные расчеты также подтверждают увеличенное расстояние между правой и левой границами треугольных чисел. Метод установления нечетких предпочтений (FPP – fuzzy preference programming) сводится к решению нелинейной задачи математического программирования, включающей целевую функцию и систему ограничений на весовые коэффициенты. В работе [5] для решения оптимизационной задачи методом FPP предложено использовать генетический алгоритм вместо классического решения оптимизационной задачи. Результаты сравнительного решения методом FPP и с применением генетического алгоритма на одной и той же матрице попарных сравнений показывают высокое совпадение численных значений компонент вектора весовых коэффициентов.

Недостаток методов FPP и генетического алгоритма – трудоемкость и приближенность решения задачи нахождения вектора весовых коэффициентов.

Цель исследования – упрощение метода определения весовых коэффициентов для повышения эффективности решения многокритериальных задач.

Результаты исследований. Основным источником информации в НМАИ – нечеткая матрица попарных сравнений $\tilde{A}$, ее элементы – нечеткие треугольные числа, для которых выполняется условие ($u_{ij} \geq m_{ij} \geq 0$), где (l_{ij}, u_{ij}) – левая и правая границы треугольного числа, m_{ij} – модальное значение треугольного числа.

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (l_{12};m_{12};u_{12}) & \dots & (l_{1n};m_{1n};u_{1n}) \\ (l_{21};m_{21};u_{21}) & (1;1;1) & \dots & (l_{2n};m_{2n};u_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (l_{n1};m_{n1};u_{n1}) & (l_{n2};m_{n2};u_{n2}) & \dots & (1;1;1) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Каждое треугольное число (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) матрицы $\tilde{A}$ приближенно показывает, во сколько раз i -й сравниваемый атрибут важнее j -го атрибута.

Если принять, что параметр нечеткости треугольных чисел равен p , то каждый элемент матрицы $\tilde{A}$ можно представить в виде ($m_{ij} - p, m_{ij}, m_{ij} + p$). Из этого представления симметричного треугольного нечеткого числа следует, что вся существенная информация о сравниваемых атрибутах i и j содержится в модальном значении m_{ij} . Модальное значение можно представить в виде

$$m_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad (2)$$

где w_i, w_j – весовые коэффициенты i -го и j -го атрибутов.

Из уравнения (2) следует, что искомые весовые коэффициенты w_i, w_j полностью определяются модальными значениями сравниваемых атрибутов в матрице $\tilde{A}$ (1), которые, в свою очередь, полностью определяют нечеткие треугольные числа. Следовательно, w_i, w_j также полностью определяют нечеткие треугольные числа из матрицы $\tilde{A}$ (при фиксированном p). Таким образом, задача нахождения весовых коэффициентов сравниваемых атрибутов в нечеткой матрице попарных сравнений может быть формализована как экстремальная задача нахождения минимума некой метрики D между модальными значениями матрицы (1) и отношениями искомых весовых коэффициентов, то есть необходимо найти

$$\min D\left(m_{ij} - \frac{w_i}{w_j}\right), \quad (3)$$

при условии нормализации нечетких весовых коэффициентов

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \quad (4)$$

где n – количество сравниваемых атрибутов;

D – метрика (функция расстояния).

Существует много функций, удовлетворяющих условиям метрики. Наиболее часто применяемые и наиболее простые из них – расстояние по Евклиду и расстояние по Хэммингу.

Применяя функцию расстояния по Евклиду, выражение (3) запишем в виде

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n \left(m_{ij} - \frac{w_i}{w_j}\right)^2} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Применяя функцию расстояния по Хэммингу, имеем

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n \left| m_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right| \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$.

Таким образом, нахождение экстремума целевой функции (5) или (6) при ограничении (4) представляет собой задачу нелинейного математического программирования. Рассмотрим подробно целевые функции (5), (6). Известно, что сумма квадратов выражений и сумма модулей выражений могут принимать только одно минимальное значение – нулевое.

Поэтому приближенно минимальное значение целевых функций (5), (6) достигается при одном и том же условии: каждое из слагаемых в двойных суммах (5), (6) должно быть равно нулю, то есть

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{ij} - \frac{w_i}{w_j} = 0, \\ \text{при } i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, \\ i \neq j. \end{array} \right. \quad (7)$$

Для приближенного решения число уравнений в системе (7) может быть уменьшено до $n - 1$. Это означает, что первое уравнение системы (7) может быть составлено только по первой строке матрицы $\tilde{A}$, то есть для $i = 1$. С учетом изложенного система алгебраических уравнений (7) и основного соотношения нормализованных весовых коэффициентов (4) имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 - w_2 m_{12} = 0 \\ w_1 - w_3 m_{13} = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ w_1 - w_n m_{1n} = 0 \\ w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

Решение системы уравнений (8) можно выполнить любым известным методом. Воспользуемся методом Крамера

$$w_1 = \frac{\Delta w_1}{\Delta}; w_2 = \frac{\Delta w_2}{\Delta}; \dots w_n = \frac{\Delta w_n}{\Delta}, \quad (9)$$

где Δ – определитель матрицы, составленной из коэффициентов при неизвестных;

Δw_i – определители матрицы, полученной заменой i -го столбца на столбец свободных членов

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -m_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -m_{13} & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -m_{14} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{1n} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix},$$

$$\Delta w_1 = \begin{vmatrix} 0 & -m_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -m_{13} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m_{14} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -m_{1n} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}, \dots,$$

$$\Delta w_n = \begin{vmatrix} 1 & -m_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -m_{13} & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -m_{14} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

Выражения (9) представляют собой искомый вектор весовых коэффициентов нечеткой матрицы попарных сравнений $\tilde{A}$.

Проверку предложенного метода и сравнительный анализ результатов выполним на тестовых нечетких матрицах попарного сравнения, для которых известны весовые коэффициенты, полученные разными методами. Вначале воспользуемся нечеткой матрицей попарных сравнений из публикации [5] с параметром нечеткости $p = 1$.

$$\tilde{B} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2;3;4) & (1;2;3) \\ \left(\frac{1}{4}; \frac{1}{3}; \frac{1}{2}\right) & (1;1;1) & \left(\frac{1}{3}; \frac{1}{2}; 1\right) \\ \left(\frac{1}{3}; \frac{1}{2}; 1\right) & (1;2;3) & (1;1;1) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Для матрицы $\tilde{B}$ (10) размером 3×3 система уравнений примет вид

$$\begin{cases} w_1 - w_2 m_{12} = 0; \\ w_1 - w_3 m_{13} = 0; \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Решение системы (11) следующее:

$$w_1 = \frac{m_{12} m_{13}}{m_{12} + m_{13} (m_{12} + 1)}; \quad w_2 = \frac{m_{13}}{m_{12} + m_{13} (m_{12} + 1)};$$

$$w_3 = \frac{m_{12}}{m_{12} + m_{13} (m_{12} + 1)}.$$

Подставляя численные значения m_{12}, m_{13} из матрицы (10), получаем весовые коэффициенты

$$w_1 = \frac{3 \cdot 2}{3 + 2(3 + 1)} = 0,545; \quad w_2 = \frac{2}{3 + 2(3 + 1)} = 0,182; \quad w_3 = \frac{3}{3 + 2(3 + 1)} = 0,273.$$

Сравним результаты расчетов с весовыми коэффициентами, полученными разными методами [5] на нечеткой матрице $\tilde{B}$ (табл. 1).

Таблица 1

Значения весовых коэффициентов, полученные разными методами для нечеткой матрицы $\tilde{B}$ попарных сравнений с параметром нечеткости $p = 1$

Весовые коэффициенты	Вектор весовых коэффициентов				
	Метод Чанга (расширенный анализ)	Метод FPP	Улучшенный метод FPP	Метод на основе эволюционного подхода	Модальный метод
w_1	0,565	0,538	[0,453; 0; 0,578]	0,537	0,545
w_2	0,079	0,170	[0,156; 0; 0,184]	0,165	0,182
w_3	0,356	0,292	[0,257; 0; 0,325]	0,298	0,273

Следует отметить, что в настоящее время не существует эталонного метода получения весовых коэффициентов, поэтому при сравнении пользуются терминами «согласованность» или «несогласованность» результатов расчета. В нашем случае предложенный метод показывает результаты, согласованные с методом FPP. Так, абсолютное отклонение весовых коэффициентов w_1, w_2, w_3 составляет 0,007; 0,012; 0,020 соответственно, что подтверждает согласованность результатов.

Проверку предложенного метода нахождения весовых коэффициентов проведем дополнительно еще на одной матрице $\tilde{C}$ попарных сравнений с параметром нечеткости $p = 0,5$, взятой из работы [6].

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} (1;1;1) & (2,5;3;3,5) & (2,5;3;3,5) \\ (0,29;0,33;0,4) & (1;1;1) & (0,67;1;1,5) \\ (0,29;0,33;0,4) & (0,67;1;1,5) & (1;1;1) \end{pmatrix}.$$

Аналогично вычисляем

$$w_1 = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3(3 + 1)} = 0,6; \quad w_2 = \frac{3}{3 + 3(3 + 1)} = 0,2; \quad w_3 = \frac{3}{3 + 3(3 + 1)} = 0,2.$$

В таблицу 2 из работы [6] поместим результаты расчетов, полученные разными методами для нечеткой матрицы $\tilde{C}$ попарных сравнений с параметром нечеткости $p = 0,5$.

Таблица 2

Значения весовых коэффициентов, полученные разными методами для нечеткой матрицы $\tilde{C}$ попарных сравнений с параметром нечеткости $p = 0,5$

Весовые коэффициенты	Вектор весовых коэффициентов				
	Метод Чанга (расширенный анализ)	Метод LLSM, согласно [6]	Метод LLSM (пересчитанный)	Метод FPP	Модальный метод
w_1	1,0	(0,59; 0,60; 0,59)	(0,56; 0,60; 0,67)	0,60	0,60
w_2	0,0	(0,17; 0,20; 0,24)	(0,16; 0,20; 0,22)	0,20	0,20
w_3	0,0	(0,17; 0,20; 0,24)	(0,16; 0,20; 0,22)	0,20	0,20

Анализ весовых коэффициентов из таблицы 2 показал, что результаты расчета методом LLSM, приведенные в работе [6], неверны, поскольку не существует нечеткого треугольного числа с компонентами (0,59; 0,60; 0,59). Для сохранения представимости (табл. 2) разных методов были пересчитаны весовые коэффициенты матрицы $\tilde{C}$ методом LLSM по математическим соотношениям из работы [6]. Нелинейная оптимизационная задача решена численным методом с помощью программной надстройки для Microsoft Office Excel – «Поиск решения», а результат помещен в четвертый столбец таблицы 2.

Сопоставление результатов расчетов весовых коэффициентов модальным методом с другими показывает полное совпадение с методом FPP и с модальными значениями треугольных весовых коэффициентов метода LLSM. Метод Чанга показал неудовлетворительные результаты, поскольку исключил из рассмотрения коэффициенты w_2 , w_3 , а их удельный вес присвоил коэффициенту w_1 . Предлагаемый модальный метод расчета весовых коэффициентов (как и метод FPP) не зависит от изменения параметра нечеткости.

Выводы. Предложенный приближенный модальный метод определения весовых коэффициентов отличается от известных простотой и полученными в явном виде аналитическими выражениями, что позволяет сократить время их определения и не применять вычислительную технику.

Сравнительный анализ предложенного и известных методов получения весовых коэффициентов показал хорошую согласованность результатов инженерных расчетов по двум независимым матрицам попарных сравнений.

Разработанный метод может быть использован в задаче принятия решения с неточными и нечеткими выходными данными в разных отраслях

науки, например для обоснования номенклатуры технического оснащения спасательных формирований.

Список литературы / References

1. Артамонов, В. С. Модификация нечеткого метода анализа иерархий / В. С. Артамонов, А. Ю. Лабинский, О. В. Уткин // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – № 4. – С. 77 – 84.

Artamonov V. S., Labinskiy A. Yu., Utkin O. V. *Modifikatsiya nechyotkogo metoda analiza ierarkhiy* [Modification of fuzzy method of hierarchy analysis]. *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*, 2016, no. 4, pp. 77-84. (In Russian)

2. Chang, D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP / Da-Yong Chang // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 95. – № 3. – Pp. 649 – 655.

3. Wang, Y. A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analytic hierarchy process / Ying-Ming Wang, M. S. Taha Elhag, Zhongsheng Hua // Fuzzy Sets and Systems. – 2008. – Vol. 2. – № 4. – Pp. 3055 – 3071.

4. Tsvetinov, P. Reasoning under uncertainty during pre-negotiation using a fuzzy AHP / P. Tsvetinov, L. Mikhailov // Applied Soft Computing. – 2004. – Vol. 5. – Pp. 23 – 33.

5. Дубровин, В. И. Метод получения вектора приоритетов из нечетких матриц попарных сравнений / В. И. Дубровин, Н. А. Миронова // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 464 – 470.

Dubrovin V. I., Mironova N. A. *Metod polucheniya vektora prioritetov iz nechyotkikh matrits poparnykh sravneniy* [Technique for derivation of priority vector out of fuzzy matrices of pair-wise comparisons]. *Iskusstvennyy intellekt*, 2009, no. 3, pp. 464-470. (In Russian)

6. Скороход, А. Б. Применение нечеткого метода анализа иерархий в задаче оценки конкурентных позиций предприятия / А. Б. Скороход // Экономика и управление. – 2011. – № 5. – С. 104 – 110.

Skorokhod A. B. *Primenenie nechyotkogo metoda analiza ierarkhiy v zadache otsenki konkurentnykh pozitsiy predpriyatiya* [Applying the fuzzy method of hierarchy analysis in a problem of enterprise competitive positions evaluation]. *Ekonomika i upravlenie*, 2011, no. 5, pp. 104-110. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 22.06.2023

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Georgy Ivanovich Pefitbay, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, senior scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;
Andrey Viktorovich Ivakhnenko, engineer; e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru
Federal State Institution "The scientific research institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36*

MODAL METHOD FOR DETERMINATION OF WEIGHT COEFFICIENTS IN A FUZZY PROBLEM OF DECISION MAKING

Purpose. Simplification of the weight coefficient determination method for improvement of the decision-making efficiency in solution of the multi-criteria problems.

Methods. Analytical investigations of the methods for determination of the weight coefficients in a fuzzy matrix of pair-wise comparisons.

Results. The approximate modal method of the weight coefficients determination was proposed; the consistency of the results with the available methods was established according to two matrices of the pair-wise comparison.

Scientific novelty. The novel approximate modal method of weight coefficients determination in the fuzzy problem of decision making was proposed.

Practical value. The method of the weight coefficients determination is a key stage in the decision making problem. The results of calculation according to the weight coefficients determination method make it possible to define the priority of alternatives in a quick and precise manner and to improve the efficiency of decision-making in the multi-criteria problems within the different fields of science and technology.

Keywords: *fuzzy matrix of pair-wise comparison; weight coefficients; triangle numbers; objective function; Euclidean distance; system of algebraic equations.*

УДК [543.544.3:54.061]:[665.73+665.74+665.573.4]

Виктория Валентиновна Лебедева, нач. отд.; e-mail: lebedenish@mail.ru;

Оксана Николаевна Щербакова, вед. инж.; e-mail: astra-jasmin@mail.ru

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

Алексей Владимирович Сиверский, мл. науч. сотр.; e-mail: alekseysiverskiy@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко»

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 70. Тел.: (+7 949) 368-41-22

ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Цель. Оптимизировать условия разделения групп предельных углеводородов от ароматических для идентификации нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, повышения достоверности результатов пожарно-технических исследований.

Методы. Экспериментальные исследования методом аккумулятивной газовой хроматографии, анализ результатов исследований.

Результаты. Проведена оптимизация условий хроматографического разделения бензина АИ-92, керосина осветительного, дизельного топлива марки Л (летнее) по параметрам: количество неподвижной жидкой фазы, длина и температура термостата колонки, расход газа-носителя. Это позволило добиться более эффективного группового разделения нефтепродуктов на одной хроматографической колонке длиной 3 м с хроматоном N-AW, модифицированным 15 % полиэтиленгликольадипината (ПЭГА) от массовой доли хроматона N-AW при температуре термостата колонки 120 °С и расходе газа-носителя 40 мл/мин. Определено время удерживания групповых и индивидуальных пиков ароматических углеводородов для исследуемых нефтепродуктов.

Научная новизна. Впервые для идентификации следовых количеств близких по углеводородному составу нефтепродуктов – бензина, керосина и дизельного топлива – применяется метод аккумулятивной газовой хроматографии, отличающийся высокой чувствительностью.

Практическая значимость. На основании результатов экспериментальных исследований определены параметры идентификации бензина, керосина, дизельного топлива – время удерживания группового и индивидуальных пиков ароматических углеводородов, отпечаток групповой хроматограммы, что позволит получать более достоверные результаты пожарно-технических исследований по установлению типа средства поджога.

Ключевые слова: аккумулятивная хроматография; время удерживания; идентификация; нефтепродукты; параметр оптимизации; групповой пик; хроматограмма.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. В настоящее время наиболее распространенные инициаторы горения (средства поджогов) – бензин, керосин и дизельное топливо. Такая «популярность» указанных нефтепродуктов обусловлена прежде всего возможностью их свободного приобретения населением и широкой областью применения в быту [1–3].

Используя результаты предыдущих исследований [4, 5], разработаны сорбенты (табл. 1) на основе хроматона N-AW, свойства которых позволили методом аккумулятивной хроматографии избирательно сконцентрировать группу легколетучих предельных углеводородов (от пентана до декана) и отделить их от ароматических (бензола, толуола, изомеров ксилола).

Таблица 1

Разработанные сорбенты для приготовления колонок

Колонка	Сорбент
колонка № 1	хроматон N-AW, модифицированный 7 % полиэтиленгликольадипината (ПЭГА) от массовой доли хроматона N-AW, зернение 0,250...0,315 мм
колонка № 2	хроматон N-AW, модифицированный 15 % полифенилового эфира 5ф-4э (ПФЭ) от массовой доли хроматона N-AW, зернение 0,250...0,315 мм

Предполагалось, что колонка № 1 будет использована в качестве рабочей для идентификации компонентов исследуемых нефтепродуктов, колонка № 2 – контрольная с целью подтверждения результатов пожарно-технического исследования и повышения достоверности анализа. Исследования сорбентов проводили при следующих условиях:

- температура термостата колонки 130 °С;
- температура детектора 190 °С;
- температура испарителя 200 °С;
- расход газа-носителя 30 мл/мин;
- расход воздуха 300 мл/мин;
- расход водорода 30 мл/мин.

Результаты экспериментальных исследований показали, что недостаточно разделить группы легколетучих предельных углеводородов и отделить от них ароматические углеводороды, входящие в компонентный состав бензина, керосина и дизельного топлива, на колонке № 1, так как время удерживания группового пика бензина и керосина совпадает (табл. 2).

Таблица 2

Время удерживания и порядок выхода идентифицированных компонентов бензина, керосина, дизельного топлива на колонке № 1

Название нефтепродукта	Время удерживания пика, с				
	групповой	индивидуальный			
		бензол	толуол	паракилол	ортокилол
Бензин	30	36	45	58	68
Керосин	30	–	–	58	68
Дизельное топливо	26	–	–	58	68

Таким образом, свойства колонки № 1 не позволяют окончательно идентифицировать средства поджога, поскольку время удерживания группового пика – основной критерий идентификации исследуемых нефтепродуктов [5].

Для решения возникшей задачи необходимо провести оптимизацию условий хроматографического разделения бензина, керосина, дизельного топлива и добиться максимального различия между значениями времени удерживания групповых пиков.

Цель исследования – оптимизировать условия разделения группы предельных углеводородов от ароматических для идентификации нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, повышения достоверности результатов пожарно-технических исследований.

Метод исследования. Обнаружение инициаторов горения, представляющих собой сложные смеси неизвестного состава, и дальнейшую их идентификацию выполняют методом аккумулятивной газовой хроматографии [5], сравнивая значения времени удерживания известных соединений и анализируемой смеси неизвестного состава, а также сравнивая полученные хроматограммы. При одинаковых экспериментальных условиях разделения фиксированное время удерживания компонента смеси, сходство удерживания (порядок выхода, расположение и форма пика на хроматограмме) служат критериями идентификации компонента.

Разделяющая способность метода газовой хроматографии в первую очередь основана на селективности используемого сорбента, свойства которого зависят от характеристик инертного твердого носителя и неподвижной жидкой фазы.

Изложение основного материала и полученных научных результатов. Были оптимизированы следующие параметры группового разделения бензина, керосина и дизельного топлива: количество неподвижной жидкой фазы, длина и температура термостата колонки, расход газа-носителя.

От количества неподвижной жидкой фазы, нанесенной на поверхность твердого носителя, зависит разделяющая способность сорбента. Жидкая фаза может быть селективной к определенным группам веществ, то есть адсорбировать их из потока газа-носителя, и неселективной (инертной) по отношению к остальным группам. Из этого следует, что при увеличении или уменьшении количества жидкой фазы соответственно изменяется время удерживания веществ, к которым она селективна. Оптимизация по количеству неподвижной жидкой фазы предусматривала испытания колонки с сорбентом на основе хроматона N-AW, модифицированного 10 и 15 % ПЭГА от массовой доли хроматона N-AW. Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод, что на хроматоне N-AW, модифицированном 10 % ПЭГА от массовой доли хроматона N-AW, значения времени удерживания групповых пиков бензина и дизельного топлива близки (38...40 с), что затрудняет их дальнейшую идентификацию. Более предпочтительным для достижения цели исследования

оказался сорбент на основе хроматона N-AW, модифицированного 15 % ПЭГА от массовой доли хроматона N-AW.

Степень разделения компонентов в пробе прямо пропорциональна длине колонки. С увеличением длины колонки повышается эффективность разделения пиков компонентов смеси, что улучшает их идентификацию. Но вместе с тем происходит размытие хроматографических пиков, что может негативно повлиять на их идентификацию. Следовательно, необходимо выбрать оптимальную длину колонки, обеспечивающую достаточное разделение смеси без размывания пиков. Для оптимизации приготовлены и испытаны хроматографические колонки длиной 2 и 3 м. Результаты исследования показали, что при разделении бензина и дизельного топлива на колонке длиной 2 м групповые пики исследуемых нефтепродуктов выходят практически за одно и то же время. Это не решает проблему идентификации, а значит, более предпочтительной остается колонка длиной 3 м.

Расход газа-носителя – один из важных параметров, который оказывает значительное влияние на эффективность колонки, следовательно, и на степень разделения. Исследования по оптимизации расхода газа-носителя проводились при показателях 20, 30 и 40 мл/мин. При расходе газа-носителя 40 мл/мин наблюдается наилучшее разделение ароматических углеводородов. Кроме того, увеличивается разница значений времени удерживания групповых пиков бензина и дизельного топлива по сравнению со значениями, полученными при расходе газа-носителя 20 и 30 мл/мин.

Температура термостата колонки – параметр, определяющий продолжительность разделения и селективность сорбента. Для выбора оптимальной температуры термостата колонки исследования проводили при температуре 120 и 130 °С. При температуре термостата колонки 120 °С наблюдается разница в 5 с между временем удерживания групповых пиков исследуемых смесей, что позволяет точнее идентифицировать инициатор горения во фрагментах, изъятых с места пожара, и определять тип легковоспламеняющейся жидкости при анализе проб.

Оптимизация условий хроматографического разделения бензина, керосина и дизельного топлива для получения групповых пиков исследуемых нефтепродуктов с отличающимися между собой значениями времени удерживания позволила установить оптимальные параметры хроматографического анализа:

- количество неподвижной жидкой фазы 15 % ПЭГА;
- длина колонки 3 м;
- расход газа-носителя 40 мл/мин;
- температура термостата колонки 120 °С.

Хроматограммы группового разделения бензина, керосина и дизельного топлива на колонке с ПЭГА после оптимизации условий разделения представлены на рисунке.

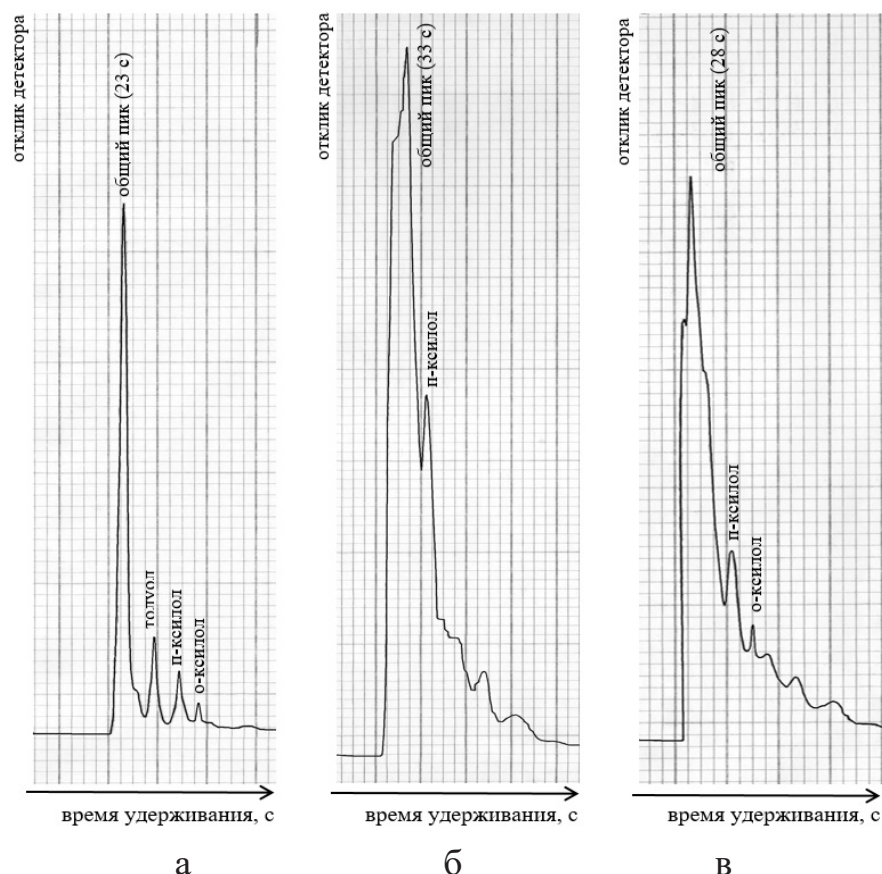


Рис. Хроматограммы на колонке с ПЭГА после оптимизации группового разделения нефтепродуктов:
а – бензин; б – керосин; в – дизельное топливо

Следует отметить, что хроматограммы бензина, керосина и дизельного топлива, подобно «отпечаткам пальцев», отличаются между собой (см. рис.). Время удерживания и порядок выхода идентифицированных компонентов бензина, керосина и дизельного топлива представлены в таблице 3.

Таблица 3

Время удерживания и порядок выхода идентифицированных компонентов бензина, керосина, дизельного топлива на колонке с ПЭГА

Название нефтепродукта	Время удерживания пика, с				
	групповой	бензол	толуол	параксилол	ортоксилол
Бензин	23	—	35	43	49
Керосин	33	—	—	43	—
Дизельное топливо	28	—	—	43	49

После оптимизации условий разделения на хроматограммах бензина, керосина и дизельного топлива (см. рис.) получены групповые пики с отличающимися между собой значениями времени удерживания (табл. 3), которые принимаем за критерий идентификации. Кроме того, по наличию тех или иных ароматических углеводородов на хроматограмме и отпечатку групповой хроматограммы также можно судить о типе средства поджога.

В таблице 4 для сравнения приведены значения времени удерживания группового пика бензина, керосина и дизельного топлива до и после оптимизации условий хроматографического разделения.

Таблица 4

Время удерживания группового пика бензина, керосина, дизельного топлива до и после оптимизации

Название нефтепродукта	Время удерживания группового пика, с	
	до оптимизации	после оптимизации
Бензин	30	23
Керосин	30	33
Дизельное топливо	26	28

Как видно из данных таблицы 4, разница между значениями времени удерживания группового пика до и после оптимизации условий разделения бензина составила 7 с, керосина – 3 с, дизельного топлива – 2 с.

Выводы. Установлены оптимальные параметры идентификации бензина, керосина и дизельного топлива, при которых достигается получение групповых пиков исследуемых нефтепродуктов с максимально отличающимися друг от друга значениями времени удерживания: количество жидкой фазы 15 % ПЭГА от массовой доли хроматона N-AW, длина 3 м и температура термостата колонки 120 °С, расход газа-носителя 40 мл/мин. Методом аккумулятивной газовой хроматографии установлены количественные критерии идентификации нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, – время удерживания группового пика бензина, керосина и дизельного топлива и индивидуальных пиков ряда ароматических углеводородов.

Список литературы / References

1. Чешко, И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / И. Д. Чешко ; под научной редакцией кандидата юридических наук Н. А. Андреева. – 2-е издание, стереотипное. – Санкт-Петербург : СПБИБП МВД России, 1997. – 562 с.

Cheshko I. D., Andreyev N. A. (scientific ed.). *Ekspertiza pozharov (obyekty, metodiki issledovaniya). 2-e izdanie, stereotipnoe* [Fire investigation (subjects, investigation techniques). The 2nd stereotyped edition]. Saint-Petersburg, SPbIPB MVD Rossii Press, 1997, 562 p. (In Russian)

2. Кутуев, Р. Х. Обнаружение и исследование следов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в вещественных доказательствах, изымаемых с места пожара. / Р. Х. Кутуев, И. Д. Чешко, В. Г. Голяев. – Москва : ВНИИПО, 1985. – 49 с.

Kutuev R. Kh., Cheshko I. D., Golyaev V. G. *Obnaruzhenie i issledovanie sledov legkovosplamenyayushchikhsya i goryuchikh zhidkostey v veshchestvennykh dokazatelstvakh, izyemaemykh s mesta pozhara* [Detection and investigation of residues of highly flammable and flammable liquids in pieces of evidence taken from a fire scene]. Moscow, VNIPO Publ., 1985, 49 p. (In Russian)

3. Обнаружение и исследование летучих органических компонентов горючих жидкостей (средств поджога) / Л. А. Яценко, И. В. Клаптюк, М. Ю. Принцева, И. Д. Чешко. – Санкт-Петербург : СПбУ ГПС МЧС России, 2019. – 78 с.

Yatsenko L. A., Klapyuk I. V., Printseva M. Yu., Cheshko I. D. *Obnaruzhenie i issledovanie letuchikh organicheskikh komponentov goryuchikh zhidkostey (sredstv podzhoga)* [Detection and investigation of volatile organic constituents of flammable liquids (arson means)]. Saint-Petersburg, SPbU GPS MChS Rossii Press, 2019, 78 p. (In Russian)

4. Сорбенты для обнаружения компонентов нефтепродуктов в пробах после пожара / А. А. Козлитин, В. В. Лебедева, О. Н. Щербаклова, А. В. Сиверский // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 4(59). – С. 37 – 45.

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V., Shcherbakova O. N., Siverskiy A. V. *Sorbenty dlya obnaruzheniya komponentov nefteproduktov v probakh posle pozhara* [Sorbents for detecting oil product components in samples after the fire]. *Nauchnyy vestnik NII "Respirator"*, 2022, no. 4(59), pp. 37-45. (In Russian)

5. Козлитин, А. А. Методика обнаружения инициаторов горения во фрагментах горевших материалов / А. А. Козлитин, В. В. Лебедева, И. Н. Непочатых // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2020. – № 2(57). – С. 67 – 73.

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V., Nepochatykh I. N. *Metodika obnaruzheniya initsiatorov goreniya vo fragmentakh gorevshikh materialov* [Methodology of detection of accelerants in fragments of burnt materials]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2020, no. 2(57), pp. 67-73. (In Russian)

Viktoria Valentinovna Lebedeva, head of department; e-mail: lebedenish@mail.ru;

Oksana Nikolayevna Shcherbakova, principle engineer; e-mail: astra-jasmin@mail.ru

Federal State Institution "The Scientific Research Institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-55

Aleksey Vladimirovich Siverskiy, junior scientific associate; e-mail: alekseysiverskiy@mail.ru

Federal State Institution "Physical-Organic Chemistry

and Coal Chemistry Institute named after L.M. Litvinenko"

283050, Donetsk, 70, ulitsa Rozy Luksemburg. Phone: (+7 949) 368-41-22

PARAMETERS FOR OPTIMIZING THE CONDITIONS OF OIL PRODUCTS IDENTIFICATION

Purpose. To optimize the conditions for separating the groups of saturated hydrocarbons from the aromatic ones for identification of oil products in the fragments collected at the fire scene in order to improve the accuracy of the fire investigation results.

Methods. Experimental studies applying the accumulative gas chromatography method, analysis of the investigation results.

Results. The optimization of conditions for the chromatographic separation of the АИ-92 gasoline, light kerosene, summer diesel fuel oil was conducted according the following parameters; the amount of stationary liquid phase, the length and temperature of the column oven, the inert carrier gas flow rate which made it possible to achieve more efficient group separation of the oil products in a single three-meters long chromatographic column with the N-AW chromatone modified by the 15% polyethylene glycol adipate out of the N-AW chromatone mass content at a temperature of 120 °C and the inert carrier gas flow rate of 40 milliliters per minute (LPM). The retention period of the group and individual peaks of aromatic hydrocarbons for the oil products in question was determined.

Scientific novelty. For the first time ever the accumulative gas chromatography known for its high precision is applied for identification of the residue amounts of similar in composition hydrocarbons, i.e. gasoline, kerosene and diesel fuel oil.

Practical value. Based on the results of the experimental studies the following parameters for identification of gasoline, kerosene, diesel fuel oil were established: retention time of group and individual peaks of aromatic hydrocarbons, group chromatogram print, which will make it possible to obtain more accurate results of the fire investigations on detection of the arson means type.

Keywords: *accumulative chromatography; retention time; identification; oil products; optimization parameter; group peak; chromatogram.*

УДК [614.8»363»:504.5]:[622.012.2:06.12.7]

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

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

Федеральное государственное казенное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»

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

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ЛИКВИДАЦИИ И КОНСЕРВАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Цель. Исследование экологического риска возможных чрезвычайных ситуаций и разработка модели его оценки для разработки и внедрения высокоэффективных технологий сохранения окружающей среды.

Методы. Вероятностно-статистический метод анализа и оценки экологического риска.

Результаты. Разработаны классификатор техногенных и экологических последствий закрытия угольных шахт и структурная модель оценки экологического риска при ликвидации и консервации угольных шахт.

Научная новизна. Впервые предложена модель оценки экологического риска возможных чрезвычайных ситуаций при закрытии и консервации угольных шахт.

Практическая значимость. Разработанные классификатор и модель оценки позволяют рассчитать экологический риск возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт.

Ключевые слова: *чрезвычайная ситуация; экологический риск; оценка риска; угольная шахта; ликвидация и консервация; окружающая среда.*

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими исследованиями. В последние годы в Донецкой Народной Республике актуальна проблема возможного негативного воздействия ликвидации и консервации угольных шахт на окружающую среду. Под негативным воздействием понимается ухудшение гидрогеологического баланса и состава воздуха в регионе, деградация почв и флоры, нежелательные последствия для населения. Поэтому необходимо прогнозировать, анализировать и оценивать вероятность экологических рисков и их возможные последствия. В основе оценивания негативных последствий лежит разрабатываемая модель оценки рисков, которую можно применять в различных сферах человеческой деятельности: политической, экономической, технической, экологической и т. д.

Действующие нормативные документы направлены на оценку последствий ликвидации и консервации угольных шахт, их влияние на отдельные виды и компоненты окружающей среды, но не предлагают комплексной оценки вероятности возникновения экологических рисков и возможных ущербов в результате их проявления.

Основная проблема заключается в отсутствии системы оценки экологических рисков возникновения чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) на территориях, примыкающих к горным отводам ликвидируемых и консервируемых шахт.

Анализ последних исследований и публикаций. Большое количество научных работ посвящено вопросам экологической безопасности [1–7]. Их обзор показывает, что главная проблема – отсутствие общепринятой классификации экологического риска и системного подхода к его анализу и оценке. Применение разработанных методик оценки других видов рисков при анализе экологических рисков неприемлемо из-за их специфических особенностей: 1) многофакторность (причины, их вызывающие, и последствия); 2) негативные процессы в окружающей среде в цепочке взаимодействующих компонентов и на различных иерархических уровнях; 3) негативные последствия для окружающей среды не всегда пропорциональны их масштабу. Это свидетельствует о том, что окружающую среду логично рассматривать как самоорганизующуюся динамическую систему, одно из основных свойств которой – нелинейность.

Цель работы – исследование экологического риска возможных чрезвычайных ситуаций и разработка модели его оценки для разработки и внедрения высокоэффективных технологий сохранения окружающей среды.

Результаты исследований. При ликвидации и консервации угольных шахт происходят процессы, которые не наблюдались в период эксплуатации. Они оказывают негативное воздействие на экологическую безопасность региона. К ним относятся: загрязнение подземных водоносных горизонтов и водной среды в границах горных отводов шахт; подтопление прилегающих территорий; неконтролируемое выделение опасных и вредных газов в атмосферу; деформации земной поверхности; негативное влияние на состояние надпочвенного слоя в результате поднятия уровня грунтовых вод и т. п.

Анализ опыта ликвидации и консервации угольных шахт, изучение научных публикаций по исследуемому вопросу позволили выявить взаимосвязанные техногенные процессы, оказывающие негативное воздействие на экологическую обстановку в регионе, и разработать классификатор последствий закрытия угольных шахт (рис. 1).

Основное влияние на экологическую обстановку в границах горных отводов закрываемых шахт оказывают гидрогеологические последствия, которые обусловлены способом вывода шахты из эксплуатации. При «мокрой» консервации происходит затопление горных выработок и изменение гидрогеологических связей водоносных горизонтов, что приводит к затоплению и заболачиванию земной поверхности, подтоплению объектов жилищно-коммунального и промышленного назначения, увеличению нагрузок на водоотливы действующих соседних шахт вследствие перетока

шахтных вод (при наличии технологических и аэрогидравлических связей). При «сухой» консервации шахты сбрасывают шахтные воды в поверхностные водоемы, следствием чего становится дренирование и истощение водоносных горизонтов, подработка речной сети, осушение колодцев и других источников питьевой воды, загрязнение поверхностных вод.

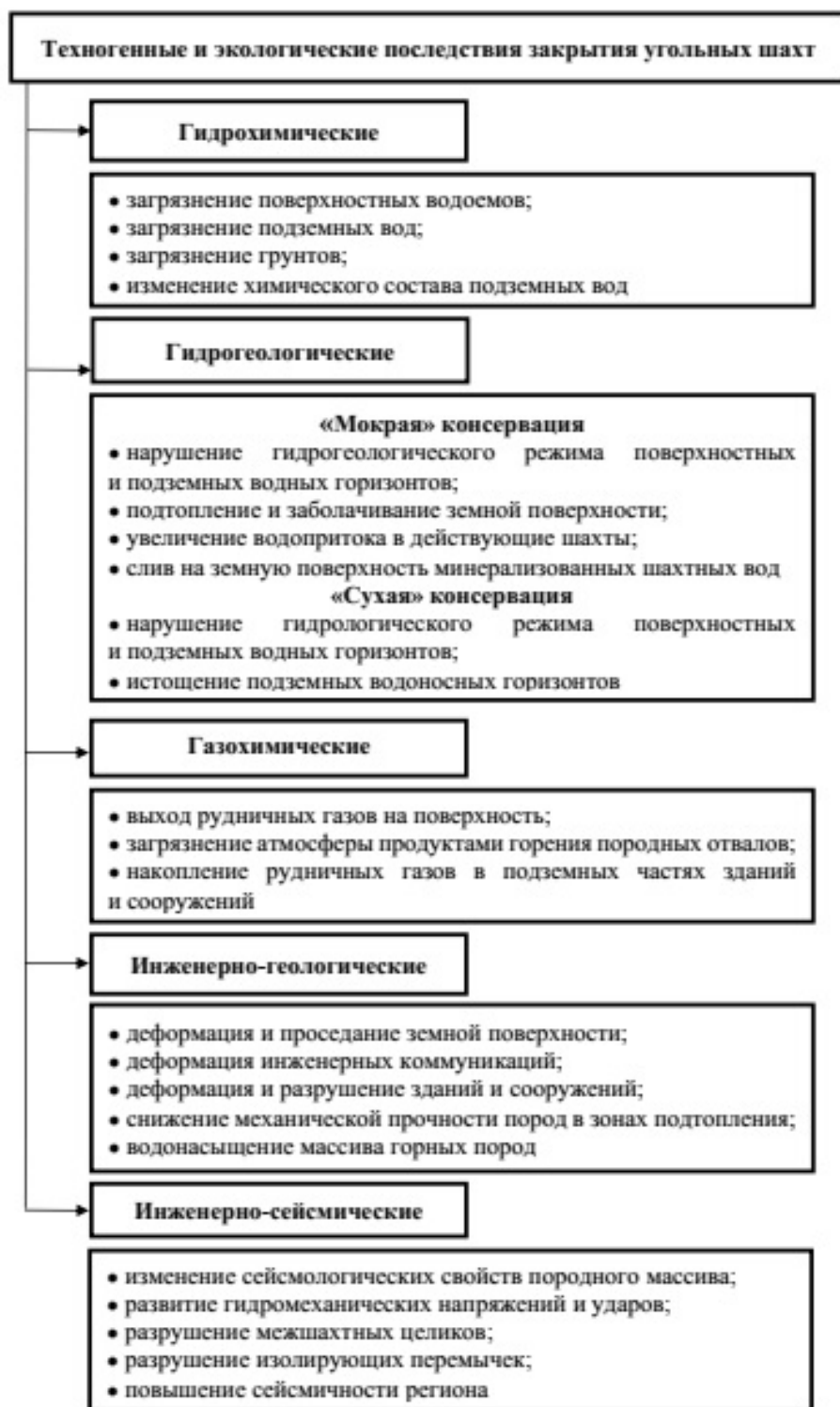


Рис. 1. Последствия закрытия угольных шахт

Негативное воздействие на экологическую обстановку оказывают также гидрохимические процессы, которые становятся источниками загрязнения водных и земельных ресурсов. В процессе затопления шахт наблюдается повышение минерализации шахтных вод и загрязнение их вредными и опасными для окружающей среды отходами. При этом происходит загрязнение значительных объемов горного массива ранее осушенных водоносных горизонтов такими водами. Откачиваемая из шахт вода содержит взвешенные твердые компоненты, растворенные соли, опасные и вредные вещества, которые, как правило, сбрасывают в поверхностные водоемы, ухудшая качественные показатели воды. Другие источники загрязнения водных ресурсов и земной поверхности – также хвостохранилища углеобогажительных фабрик и отстойники шахтных вод.

В Донецкой Народной Республике водоотливные комплексы, функционирующие на ликвидированных и законсервированных угольных шахтах, ежегодно откачивают и сливают в окружающую среду до 80 млн м³ загрязненных шахтных вод. На основании проведенных Государственным комитетом по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики исследований состояния водных объектов (рек, водохранилищ) региона и анализа качества поверхностных вод было установлено, что качество воды в большинстве случаев не соответствует требованиям нормативных документов по таким показателям, как минерализация, содержание сульфатов, а в некоторых случаях и хлоридов.

Согласно данным проведенных химических лабораторных исследований, откачиваемая шахтная вода в регионе имеет следующие показатели:

- водородный показатель pH – в интервале 6,5...8,6 (нейтральные и слабощелочные воды);
- запах – 1...5 баллов (в среднем 3...4, то есть заметный и отчетливый);
- прозрачность – в основном менее 20 см (мутная и сильно мутная);
- железо общее, мг/дм³, – 1...8 предельно-допустимых концентраций (далее – ПДК);
- взвешенные вещества, мг/дм³, – 2...12 ПДК;
- окисляемость (ХПК), мг О₂/дм³, – 8...93 (в основном в пределах ПДК);
- хлориды, мг/дм³, – до 350 (в основном в пределах ПДК);
- сульфаты, мг/дм³, – 1...4 ПДК;
- минерализация, мг/дм³, – 1...6 ПДК;
- фосфаты, мг/дм³, – в пределах ПДК;
- фенолы, мг/дм³, – в пределах ПДК;
- биохимическое потребление кислорода (БПК), мг О₂/дм³, – 2,1...26,1 (в основном в пределах ПДК);
- нефтепродукты, мг/дм³, – в пределах ПДК (в основном не обнаружены).

Значительное влияние на окружающую среду оказывают газохимические процессы вследствие перераспределения потоков взрывоопасных и токсичных газов в закрываемых шахтах. Установлено, что на ликвидируемых и законсервированных шахтах давление повышается в замкнутом объеме. Накапливающиеся в выработанных пространствах и горных выработках ликвидируемых и законсервированных шахт рудничные газы при определенных условиях попадают в действующие шахты, что усложняет условия их эксплуатации, а неконтролируемое метановыделение становится причиной выхода газа на поверхность и создания взрывоопасной ситуации в загазированных подвальных помещениях зданий и сооружений. Источниками загрязнения воздушной, водной среды и земельных ресурсов являются также терриконы и отвалы ликвидируемых шахт.

Негативное воздействие на окружающую среду при ликвидации и консервации шахт оказывают инженерно-геологические процессы, обусловленные нарушением устойчивого равновесия в зонах горных работ закрываемых шахт. При затоплении горных выработок горный массив водонасыщается и изменяются его физико-механические свойства, наблюдается усиленное размокание пород и активизируется конвергенция пород ранее подработанной толщи, в результате чего возможны проседания земной поверхности, образование провалов, деформация зданий, сооружений и инженерных коммуникаций.

Развитию инженерно-сейсмических явлений способствуют последствия гидромеханических процессов в горном массиве, причина которых – сдвигание водонасыщенных пород, которое влияет на вероятность возникновения гидромеханических ударов, способных привести к разрушению межшахтных целиков, изолирующих перемычек, а также деформации подземных сооружений и земной поверхности. Но в настоящее время механизм воздействия этих процессов недостаточно исследован, поэтому достоверно прогнозировать инженерно-сейсмические явления затруднительно.

Существенное влияние на окружающую среду и население, как правило, оказывает совокупность вышеуказанных процессов, что необходимо учитывать при составлении перспективного прогноза экологической обстановки в регионе.

Экологический риск – это вероятность наступления события, которое может привести к негативным последствиям для окружающей среды и населения в результате хозяйственной или иной деятельности, а также в случаях возникновения ЧС природного и техногенного характера. Оценка экологического риска представляет собой оценку вероятности возникновения ЧС природного и техногенного характера, которые могут привести к негативным последствиям для окружающей среды и населения в результате хозяйственной или иной деятельности.

Разработанная авторами и представленная в работе модель оценки экологических рисков позволяет на основе идентификации опасных и вредных факторов, присущих процессам ликвидации и консервации угольных шахт, выполнить оценку их воздействия на окружающую среду и спланировать необходимый комплекс мероприятий, направленный на снижение вероятности возникновения ЧС (рис. 2).



Рис. 2. Структурная модель оценки экологических рисков

Для идентификации экологических рисков необходимо: собрать и проанализировать данные о негативных экологических последствиях закрытия угольных шахт и источниках их возникновения; определить потенциально опасные и вредные факторы, территории их воздействия; выбрать наиболее приоритетные направления для исследования.

При количественной оценке экологический риск может быть определен как произведение вероятности возникновения ЧС на ожидаемый ущерб. Ущерб рекомендуется определять как сумму ущербов от различных видов вредного воздействия на объекты и компоненты окружающей среды. Если в течение рассматриваемого периода может произойти несколько ЧС, то показателем риска служит сумма ущербов от всех возможных ЧС:

$$R = \sum_{i=1}^n p_i U_i,$$

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

n – число возможных вариантов ущербов при наступлении ЧС, включая нулевой ущерб;

p_i – вероятность наступления ЧС;

U_i – величина ущерба:

$$U = \sum_{i=1}^n W_i C_i,$$

W_i – обобщенная составляющая прогнозируемого ущерба по различным компонентам окружающей среды;

C_i – цена i -й составляющей ущерба на единицу измерения с учетом его социально-экономического значения.

Качественную оценку экологического риска предлагается выполнять в соответствии с разработанной авторами матрицей риска [8].

Одна из главных задач комплексной оценки экологического риска возможных ЧС – определение совокупности факторов техногенной и экологической опасности для окружающей среды и населения в границах горных отводов угольных шахт, находящихся в процессе ликвидации и консервации, а также установление причинно-следственных связей между ними.

Информационная основа для оценки экологических рисков – следующие показатели: оценка воздействия на окружающую среду; мониторинг состояния компонентов окружающей среды; экологическая экспертиза и аудит; экологическая и санитарно-гигиеническая паспортизация; информация о различных процессах и явлениях и др.

Для уменьшения негативного влияния ликвидации и консервации угольных шахт на окружающую среду и население прилегающих территорий необходимо прогнозировать экологические риски. Для этого проводят соответствующие экологические экспертизы, идентифицируют и оценивают риски возможных чрезвычайных ситуаций и их последствия, разрабатывают специальные мероприятия по управлению экологическими рисками.

Цель прогнозирования экологических рисков – исследование причин, влияющих на появление нежелательных опасных событий в результате хозяйственной или иной деятельности, которые могут привести к нежелательным последствиям для окружающей среды и населения. Это позволит разработать превентивные мероприятия, уменьшающие вероятность возникновения ЧС природного или техногенного характера.

Рекомендуется последовательно выполнять этапы прогнозирования экологического риска:

- формулировка проблемы и постановка конкретной задачи;
- определение критериев оценки риска;
- сбор информации и выбор метода прогнозирования;
- применение метода получения результатов прогноза;
- аналитическая обработка и оценка полученной информации;
- использование данных прогноза для принятия решения и разработки рекомендаций о возможных путях достижения поставленных целей.

Экологические риски можно прогнозировать тремя методами:

1. Моделирование процессов.
2. Статистический анализ.
3. Экспертные оценки.

Область применения методов представлена в таблице в соответствии с приведенными выше категориями.

Таблица

Область применения методов прогнозирования экологических рисков

Методы	Область применения		
	моделирование процессов	статистический анализ	экспертные оценки
Анализ «дерева событий»	+	+	+
Анализ видов и последствий отказов, анализ видов, последствий и критичности отказов		+	+
Анализ «дерева неисправностей»		+	+
Исследование опасности и связанных с ней проблем	+		+
Анализ влияния человеческого фактора		+	
Предварительный анализ опасности		+	+
Структурная схема надежности	+	+	
Классификация групп риска по категориям			+
Общий анализ отказов		+	+
Метод Делфи	+	+	+
Метод Монте-Карло и другие методы моделирования	+	+	
Обзор данных по эксплуатации		+	+
Анализ скрытых процессов			+
Модели описания последствий	+		+

Для решения экологических и техногенных проблем территорий, расположенных в пределах горных отводов ликвидированных и законсервированных угольных шахт необходимо проведение исследований с целью установления:

- закономерностей деформации горного массива и земной поверхности при «сухой» и «мокрой» консервации;
- механизма активизации процессов проседания земной поверхности и деформации промышленных и гражданских объектов, расположенных над закрытыми шахтами;
- закономерностей загрязнения поверхностных и подземных вод при различных способах закрытия шахт;
- механизма загрязнения объектов окружающей среды на территориях, примыкающих к породным отвалам и терриконам закрытых шахт.

Выводы. Результаты исследований позволят сформировать теоретическую, практическую и информационную базу управления техногенной и экологической безопасностью в регионе при ликвидации и консервации угольных шахт, что станет основой для разработки и внедрения высокоэффективных технологий сохранения окружающей среды.

Список литературы / References

1. Валович, В. Н. К вопросу об экологической безопасности страны / В. Н. Валович // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). – 2012. – № 1. – С. 192.

Valovich V. N. *K voprosu ob ekologicheskoy bezopasnosti strany* [To the issue of environmental safety of the state]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)*, 2012, no. 1, 192 p. (In Russian)

2. Башлакова, О. И. Проблемы экологической безопасности России / О. И. Башлакова // Вестник МГИМО Университета. – 2015. – № 2. – С. 112 – 121.

Bashlakova O. I. *Problemy ekologicheskoy bezopasnosti Rossii* [Ecological safety problems of Russia]. *Vestnik MGIMO Universiteta*, 2015, no. 2, pp. 112-121. (In Russian)

3. Медведев, П. В. Экономическая безопасность и современные мировые тенденции в сфере оценки и возмещения экологического ущерба / П. В. Медведев, О. Е. Медведева // Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 5. – С. 1 – 12.

Medvedev P. V., Medvedeva O. Ye. *Ekonomicheskaya bezopasnost i sovremennye mirovye tendentsii v sfere otsenki i vozmeshcheniya ekologicheskogo ushcherba* [Economic safety and modern world tendencies in the field of assessment and

restitution of environmental damage]. *Naukovedenie*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1-12. (In Russian)

4. Митюгина, М. М. Экологическая безопасность как основа обеспечения качества жизни населения / М. М. Митюгина // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 2. – С. 449 – 453.

Mityugina M. M. *Ekologicheskaya bezopasnost kak osnova obespecheniya kachestva zhizni naseleniya* [Environmental safety as a foundation for ensuring the population quality of life]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 449-453. (In Russian)

5. Гайсин, И. Т. Вопросы экологической безопасности и экономики / И. Т. Гайсин // Филология и культура. – 2008. – № 3(14). – С. 13.

Gaysin I. T. *Voprosy ekologicheskoy bezopasnosti i ekonomiki* [Issues of environmental safety and economics]. *Filologiya i kultura*, 2008, no. 3(14), p. 13. (In Russian)

6. Жаворонкова, Н. Г. Экологическая безопасность в системе стратегического планирования Российской Федерации / Н. Г. Жаворонкова // Lex Russica. – 2016. – № 6(155). – С. 170 – 183.

Zhavoronkova N. G. *Ekologicheskaya bezopasnost v sisteme strategicheskogo planirovaniya* [Environmental safety in the system of strategical planning]. *Lex Russica*, 2016, no. 6(155), pp. 170-183. (In Russian)

7. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины : монография / [Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермаков, Ю. Ф. Кренида, О. А. Улицкий, В. А. Дрибан]; под ред. Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермакова. – Донецк, 2004. – 631 с.

Gavrilenko Yu. N., Yermakov V. N. [eds], Krenida Yu. F., Ulitskiy O. A., Driban V. A. *Tekhnogennye posledstviya zakrytiya ugolnykh shakht Ukrainy : monografiya* [Man-made consequences of Ukraine's coal mines closure : monograph]. Donetsk, 2004, 631 p. (In Russian)

8. Иваненко, А. Ф. Оценка экологического риска при ликвидации и консервации угольных шахт ДНР / А. Ф. Иваненко, П. Е. Мухин // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2023. – № 1(60). – С. 106 – 113.

Ivanenko A. F., Mukhin P. Ye. *Otsenka ekologicheskogo riska pri likvidatsii i konservatsii ugolnykh shakht DNR* [Environmental risk assessment during liquidation and conservation of coal mines of the DPR]. *Nauchnyy vestnik NII "Respirator"*, 2023, no. 1(60), pp. 106-113. (In Russian)

Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: petr63203@gmail.com

Federal State Institution "The scientific research institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-49

MODEL OF ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT IN CASE OF LIQUIDATION AND CONSERVATION OF COAL MINES

Purpose. Investigation of environmental risk of potential emergencies and elaboration of model for its evaluation in order to develop and to implement the high-efficient technologies of environment preservation.

Methods. Probabilistic and statistic method of analysis and assessment of the environmental risk.

Results. There have been developed a system for classification of man-made and environmental consequences following the coal mines closure and a structural model for the environmental risk assessment in case of liquidation and conservation of the coal mines.

Scientific novelty. There has been proposed a novel model for assessing the environmental risk of potential emergencies in case of closure and conservation of the coal mines.

Practical value. The developed classification system and the model for assessment make it possible to calculate the environmental risk of emergencies occurring in case of liquidation and conservation of the coal mines.

Keywords: *emergency; environmental risk; risk assessment; coal mine; liquidation and conservation; environment.*

III. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.867.322

Степан Григорьевич Ехилевский, д-р техн. наук, профессор; e-mail: ekhilevskiy@yandex.ru;

Оксана Валерьевна Голубева, канд. физ.-мат. наук, первый проректор; e-mail: o.golubeva@psu.by;

Ольга Николаевна Забелендик, ст. преп.; e-mail: o.zabelendik@psu.by

Учреждение образования

«Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»

211440, Республика Беларусь, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29

Тел.: (+37 529) 219-68-53

КРИТЕРИЙ ПРИРОСТА ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЗОЛИРУЮЩЕГО РЕСПИРАТОРА С НЕОДНОРОДНО СНАРЯЖЕННЫМ РЕГЕНЕРАТИВНЫМ ПАТРОНОМ

Цель. Повышение эффективности использования защитного ресурса дыхательного аппарата с химически связанным кислородом для оптимизации времени его защитного действия.

Методы. Математическое и компьютерное моделирование динамики сорбции.

Результаты. Для оптимизации респиратора с химически связанным кислородом развит формализм моделирования регенерации воздуха слоем гранул надпероксида калия, диаметр которых меняется в направлении фильтрации выдыхаемого воздуха.

Научная новизна. Показано, что прирост времени защитного действия, определенный периодом критического проскока в замкнутой схеме воздухопроводной части, будет равен приросту связанного углерода в открытой схеме.

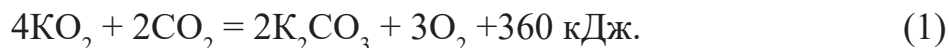
Практическая значимость. Время защитного действия респиратора с 1350 г кислородосодержащего продукта, работающего в режиме тяжелой физической нагрузки по круговой схеме, увеличится на 25,9 % за счет изменения (скачков) диаметра гранул.

Ключевые слова: респиратор; динамика сорбции; работающий слой хемосорбента; размер гранул; время защитного действия.

Постановка проблемы. Изолирующие средства защиты дыхания незаменимы, если в воздухе присутствуют отравляющие вещества или наблюдается недостаток кислорода. С этим приходится сталкиваться при пожаре в замкнутом пространстве (шахте, подводной лодке), когда выгорает или вытесняется кислород и выделяются ядовитые продукты горения.

В описанных ситуациях важны такие характеристики дыхательных аппаратов, как масса, габариты, срок защитного действия, надежность, простота в обслуживании и постоянная готовность к оперативному использованию. По этим показателям предпочтительнее дыхательные аппараты с химически связанным кислородом [1]. В них выдыхаемый углекислый газ поглощается

в процессе фильтрации воздуха через регенеративный патрон, снаряженный пористыми гранулами кислородсодержащего продукта на основе надпероксида калия



В соответствии со стехиометрией реакции (1) необходимого для нового вдоха кислорода выделяется в 1,5 раза больше, чем связывается углекислого газа. Такая пропорция близка к идеальной для физиологии человека (BS EN 13794:2002 «Respiratory protective devices – Self-contained closed-circuit breathing apparatus for escape – Requirements, testing, marking»). При этом расход зарезервированного в регенеративном патроне кислорода регулируется автоматически в зависимости от физической нагрузки человека, определяющей количество выдыхаемого в единицу времени углекислого газа. Это позволяет обойтись без имеющегося в баллонных аппаратах дополнительного оборудования (легочного автомата и ресивера) [3], упростив, таким образом, конструкцию, снизив вес и повысив надежность изолирующего средства защиты дыхания. Уменьшению массогабаритов способствует и то, что надпероксид калия на три порядка плотнее газа при нормальных условиях. Это обеспечивает более плотную упаковку кислорода в жестяном регенеративном патроне, чем в баллонных дыхательных аппаратах, так как стальные баллоны не выдерживают давления более 250 атмосфер и весят в шесть раз больше своего содержимого. Изложенное позволяет связать главные перспективы совершенствования изолирующих средств защиты дыхания с химическим способом резервирования кислорода [4].

Анализ последних исследований и публикаций. Будучи изолирующим средством защиты, дыхательный аппарат обладает замкнутой схемой воздухопроводной части. Это значит, что выдыхаемый воздух (с 4% CO_2), регенерированный в процессе фильтрации через кислородсодержащий продукт, возвращается на вдох. Отравление углекислым газом начинается, когда его содержание во вдыхаемом воздухе превышает 1,5 % [4]. К моменту такого проскока CO_2 через регенеративный патрон замыкающие слои кислородсодержащего продукта выработаны не полностью. Интегральной характеристикой неиспользуемого ресурса регенеративного патрона является ширина «мертвого слоя» сорбента, образованного молекулами надпероксида калия, не вступившими в реакцию до окончания срока защитного действия аппарата. Эта ширина зависит от режима эксплуатации дыхательного аппарата (объемного расхода воздуха) и характеристик кислородсодержащего продукта (пористость и размер его гранул), определяющих кинетику хемосорбции, что обобщенно характеризуется безразмерной длиной регенеративного патрона η

[5]. В частности, если $\eta < 0,98$, проскок CO_2 с самого начала превышает 1,5 % и доля использованного защитного ресурса равна нулю (весь слой хемосорбента оказывается «мертвым» [5]). Таким образом, подтверждается более низкая эффективность использования защитного ресурса в дыхательных аппаратах с небольшим сроком защитного действия.

Вторая причина неэффективного использования защитного ресурса регенеративного патрона – спекание гранул кислородсодержащего продукта под действием выделяющегося в процессе хемосорбции экзотермического тепла согласно реакции (1). Плотность его источников тем выше, чем тоньше «работающий» слой сорбента. Его ширина (при определенных характеристиках гранул хемосорбента) устанавливается с учетом объемного расхода воздуха, величины концентрационного напора углекислого газа и степени отработки поглотительного ресурса. По этим причинам ширина работающего слоя сорбента увеличивается по мере его продвижения в глубь патрона [5]. А значит, максимальная тепловая мощность реализуется в лобовом слое хемосорбента в начале работы дыхательного аппарата.

Для устранения перечисленных причин достаточно увеличить размер гранул в лобовых слоях хемосорбента и уменьшить в замыкающих.

Цель работы – повышение эффективности использования защитного ресурса дыхательного аппарата с химически связанным кислородом для оптимизации времени его защитного действия.

Результаты исследований. Выберем в качестве характерного масштаба объемной концентрации молекул углекислого газа W ее максимальное значение W_0 на входе в рассматриваемый слой хемосорбента, достигаемое после полной отработки предыдущего слоя. Если пренебречь возвратом на вдох проскока CO_2 (моделировать рабочий процесс в регенеративном патроне, подключенном по открытой схеме), W_0 совпадает со значением W в выдыхаемом воздухе. В такой ситуации приведенная концентрация молекул углекислого газа $\omega = W/W_0$ согласно [6] определяется соотношениями

$$\xi(x) = \beta x/v, \quad \tau(t) = \beta \gamma t, \quad (2)$$

$$\omega(\xi, \tau) = e^{-\xi \tau} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f_k(\tau)}{k!} \xi^k, \quad (3)$$

$$f_{k+1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_k(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$f_0(\tau) = e^{\tau} \omega(0, \tau), \quad (5)$$

$$u(\xi, \tau) = e^{-\tau} \int_0^{\tau} e^{\tau} \omega(\xi, \tau) d\tau, \quad (6)$$

где ξ – безразмерная координата ($\xi \in [0, \eta]$), соответствующая расстоянию x от входа в поглощающий слой;

τ – безразмерное время, соответствующее реальному времени работы фильтра t ;

v – скорость фильтрации воздуха, м/с;

β – феноменологическая постоянная, характеризующая скорость хемосорбции [7];

γ – феноменологическая постоянная, характеризующая ресурс хемосорбции в патроне, однородно снаряженном гранулами среднего диаметра [7];

u – использованная доля поглотительного ресурса хемосорбента.

Полагая, что уровень физической нагрузки человека не меняется и в регенеративный патрон поступает CO_2 постоянной концентрации ($\omega(0, \tau) = 1$), получим приведенную концентрацию CO_2

$$\omega_0(\xi, \tau) = e^{-\xi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau^k}{k!} \right) \right], \quad (7)$$

а затем с помощью уравнения (6) – долю отработанного хемосорбента в патроне без скачка диаметра гранул

$$u_0(\xi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \left(1 + e^{-\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \sum_{k=1}^n \frac{\tau^k}{k!} \right), \quad (8)$$

где индекс 0 – количество скачков диаметра гранул хемосорбента.

Для предотвращения спекания разместим в лобовом слое хемосорбента ($\xi \in [0, \zeta_1]$) гранулы увеличенного размера диаметром 5 мм. При этом β в уравнении (2) нужно заменить на $\alpha_1 \beta$, где $\alpha_1 = 16/25$ (равно квадрату отношения прежнего (среднего) диаметра гранул к имеющему место в лобовой части патрона) [5]. В результате с помощью выражений (2) – (7) и функций Хэвисайда θ получим

$$\omega_1(\xi, \tau) = \omega_0(\alpha_1 \xi, \alpha_1 \tau) \theta(\zeta_1 - \xi) + \omega_{12}(\xi - \zeta_1, \tau) \theta(\xi - \zeta_1);$$

$$u_1(\xi, \tau) = u_0(\alpha_1 \xi, \alpha_1 \tau) \theta(\zeta_1 - \xi) + u_{12}(\xi - \zeta_1, \tau) \theta(\xi - \zeta_1),$$

где для вычисления приведенной концентрации углекислого газа ω_{12} и отработки хемосорбента u_{12} во второй (снаряженной 4-миллиметровыми гранулами) части патрона в формулах (3), (6) ξ следует заменить на $\xi - \xi_1$, в уравнении (5) вместо $\omega(0, \tau)$ подставить $\omega_0(\alpha_1 \xi_1, \alpha_1 \tau)$, а в выражении (6) вместо ω выражение для ω_{12} . Первый индекс указывает количество скачков диаметра гранул, второй – номер части патрона.

Координата скачка диаметра гранул $\xi_1 = 0,681$ выбрана из условия равенства производных $\partial u_1(0, \tau)/\partial \tau|_{\tau=0} = \partial u_1(\xi_1 + 0, \tau)/\partial \tau|_{\tau=0} = 0,64$, пропорциональных мощности источников экзотермического тепла на входе в первую и вторую части патрона в начальный момент времени. Важно, что в неразрезанном патроне $\partial u_0(0, \tau)/\partial \tau|_{\tau=0} = 1$, то есть увеличение на 1 мм диаметра гранул в лобовом слое хемосорбента на 36 % снижает плотность максимальной мощности источников экзотермического тепла в регенеративном патроне, предотвращая спекание кислородсодержащего продукта.

Безразмерные координаты $\zeta_2 = 1,249$, $\zeta_3 = 1,693$ и $\zeta_4 = 2,0093$ второго (4...3 мм), третьего (3...2 мм) и четвертого (2...1 мм) скачков диаметра гранул найдены из условия одинаковой мощности источников экзотермического тепла на входе во все (отличающиеся размером гранул) части регенеративного патрона [8]. Для этого формулы (2) – (6) преобразовали к следующему виду:

$$\omega_n(\xi, \tau) = \omega_{n-1}(\xi, \tau)\theta(\zeta_n - \xi) + \omega_{nn+1}(\xi - \zeta_n, \tau)\theta(\xi - \zeta_n); \quad (9)$$

$$u_n(\xi, \tau) = u_{n-1}(\xi, \tau)\theta(\zeta_n - \xi) + u_{nn+1}(\xi - \zeta_n, \tau)\theta(\xi - \zeta_n); \quad (10)$$

$$\omega_{nn+1}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_{n+1}(\xi+\tau)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f_{n;k}(\tau)}{k!} (\alpha_{n+1}\xi)^k; \quad (11)$$

$$f_{n;0}(\tau) = e^{\alpha_{n+1}\tau} \omega_{n-1}(\zeta_n, \tau), \quad f_{n;k+1}(\tau) = \alpha_{n+1} \int_0^{\tau} f_{n;k}(\tau) d\tau;$$

$$u_{nn+1}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_{n+1}\tau} \alpha_{n+1} \int_0^{\tau} e^{\alpha_{n+1}\tau} \omega_{nn+1}(\xi, \tau) d\tau,$$

где $n = 2, 3, 4, \dots$ ($\alpha_3 = 16/9$, $\alpha_4 = 16/4 = 4$ и $\alpha_5 = 16/1 = 16$).

В аппарате с круговой схемой воздухопроводной части к постоянной составляющей W_0 добавляется проскок CO_2 , монотонно возрастающий по мере истощения ресурса регенеративного патрона. В результате возникает самосогласованная задача определения искомой функции $\omega(\xi, \tau)$, где черта сверху обозначает замкнутость воздухопроводной части. Для ее решения использована итерационная процедура с малым параметром $\overline{\omega}(\eta, \tau)$. В нулевом

приближении ($\bar{\omega}_0(\xi, \tau) = \omega_0(\xi, \tau)$) следует вообще пренебречь проскоком. При этом возвращаемся к стационарному граничному условию $\bar{\omega}_0(0, \tau) = 1$ и $\bar{\omega}(\xi, \tau) \approx \bar{\omega}_0(\xi, \tau)$ (см. уравнение (7)). Следующий шаг итерационной процедуры, отвечающий первому приближению ($\bar{\omega}(\xi, \tau) \approx \bar{\omega}_1(\xi, \tau)$), заключается в подстановке определяемого формулой (7) проскока в (12)

$$\bar{\omega}_1(0, \tau) = 1 + \omega_0(\eta, \tau), \quad (12)$$

и численной реализации рекуррентной процедуры (4). Ее результаты в графической форме представлены на рисунке 1 (кривая 2). Видно, что по мере исчерпания ресурса патрона проскок в круговой схеме увеличивается стремительнее, как и должно быть, так как избежавшие хемосорбции молекулы CO_2 возвращаются на вдох, увеличивая содержание углекислого газа в выдохе. Развиваясь в указанном направлении, процесс все больше отличается от имеющего место в открытой схеме. В результате время наступления критического проскока τ_k углекислого газа уменьшается на 9,8 %. Значению $\eta = 4,426$ соответствует патрон с 1350 г хемосорбента в режиме тяжелой физической нагрузки.

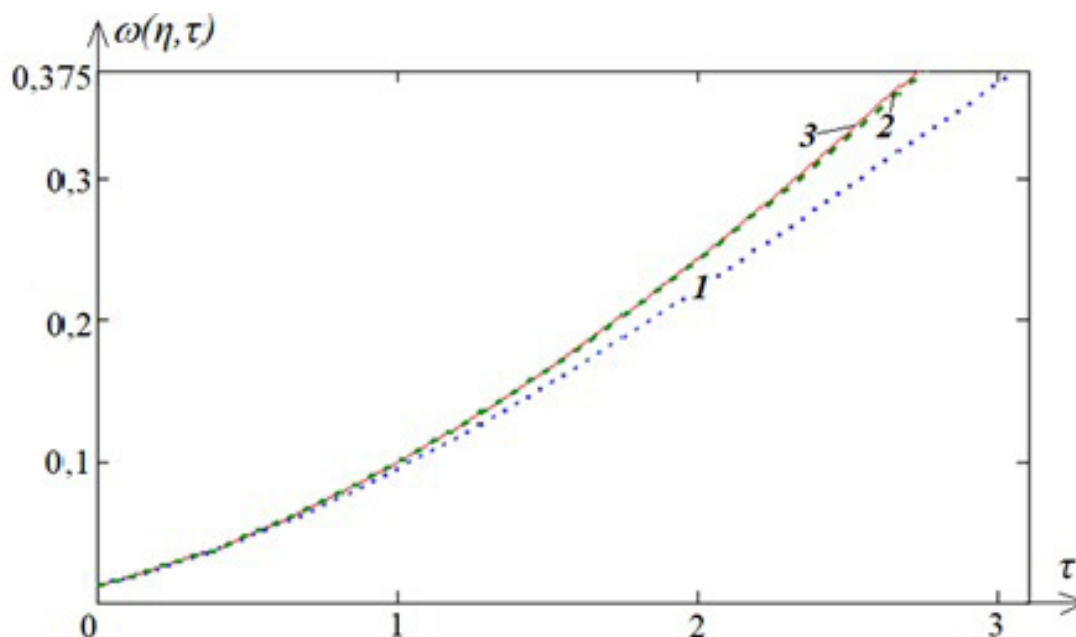


Рис. 1. Эволюция проскока CO_2 через подключенный по круговой схеме регенеративный патрон дыхательного аппарата на химически связанном кислороде ($\eta = 4,426$):
1 – по открытой схеме; 2 – по круговой схеме (первое приближение),
3 – по круговой схеме (второе приближение)

Вторая итерация (отвечающая приближению $\bar{\omega}_2(\xi, \tau)$) заключается в подстановке $\bar{\omega}_1(\eta, \tau)$ в формулу (12) вместо $\omega_0(\eta, \tau)$.

В итоге время критического проскока CO_2 уменьшилось еще на 0,7 %, что едва различимо. Кривая 3, отвечающая второй итерации, почти совпадает с кривой 2.

Аналогично можно учесть влияние замкнутости воздухопроводной части для патрона с четырьмя скачками диаметра гранул. При этом в качестве нулевого приближения итерационной процедуры следует взять выражения (9) – (11) для $n = 4$, описывающие проскок CO_2 через неоднородно снаряженный патрон, подключенный по открытой схеме. Поскольку проскок через неоднородно снаряженный патрон меньше, чем через однородный, второй шаг итерационной процедуры не понадобится. А значит, нет необходимости эти шаги индексировать. Поэтому граничное условие на входе в первую часть неоднородно снаряженного патрона примет вид

$$\tilde{\omega}_{11}(0, \tau) = 1 + \omega_4(\eta, \tau), \quad (13)$$

где первый индекс параметра $\tilde{\omega}$ – количество скачков диаметра гранул, второй – номер части патрона, а волнистая черта сверху в отличие от прямой отражает неоднородность патрона с круговой схемой воздухопроводной части.

С учетом (13) соотношения (3) – (5) примут вид

$$f_{1;0}(\tau) = (1 + \omega_4(\eta, \tau))e^{a_1\tau}, \quad f_{1;k+1}(\tau) = a_1 \int_0^\tau f_{1;k}(\tau) d\tau, \quad (14)$$

$$\tilde{\omega}_{11}(\xi, \tau) = e^{-a_1(\xi+\tau)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f_{1;k}(\tau)}{k!} (a_1\xi)^k, \quad (15)$$

где первый индекс функции f – номер части патрона.

На вход во вторую часть неоднородно снаряженного патрона поступает проскок через его первую часть. Поэтому по аналогии с (14), (15) запишем

$$f_{2;0}(\tau) = \tilde{\omega}_{11}(\xi_1, \tau)e^{a_2\tau}; \quad f_{2;k+1}(\tau) = a_2 \int_0^\tau f_{2;k}(\tau) d\tau;$$

$$\tilde{\omega}_{12}(\xi, \tau) = e^{-a_2(\xi+\tau)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f_{2;k}(\tau)}{k!} (a_2\xi)^k.$$

Тогда для неоднородно снаряженного патрона с одним скачком диаметра гранул с круговой схемой подключения получаем проскок CO_2

$$\tilde{\omega}_1(\xi, \tau) = \tilde{\omega}_{11}(\xi, \tau)\theta(\xi_1 - \xi) + \tilde{\omega}_{12}(\xi - \xi_1, \tau)\theta(\xi - \xi_1).$$

Аналогично можно заметить общую закономерность для неоднородного патрона с несколькими ($n = 2, 3, 4, \dots$) скачками диаметра гранул

$$f_{n+1;0}(\tau) = \tilde{\omega}_{n-1}(\xi_n, \tau) e^{\alpha_{n+1}\tau}, \quad f_{n+1;k+1}(\tau) = \alpha_{n+1} \int_0^\tau f_{n+1;k}(\tau) d\tau, \quad (16)$$

$$\tilde{\omega}_{n+1}(\xi, \tau) = e^{-\alpha_{n+1}(\xi+\tau)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f_{n+1;k}(\tau)}{k!} (\alpha_{n+1}\xi)^k, \quad (17)$$

$$\tilde{\omega}_n(\xi, \tau) = \tilde{\omega}_{n-1}(\xi, \tau) \theta(\xi_n - \xi) + \tilde{\omega}_{n+1}(\xi - \xi_n, \tau) \theta(\xi - \xi_n). \quad (18)$$

Результаты выполненных по формулам (16) – (18) в среде пакета MathCAD вычислений в графической форме представлены на рисунке 2.

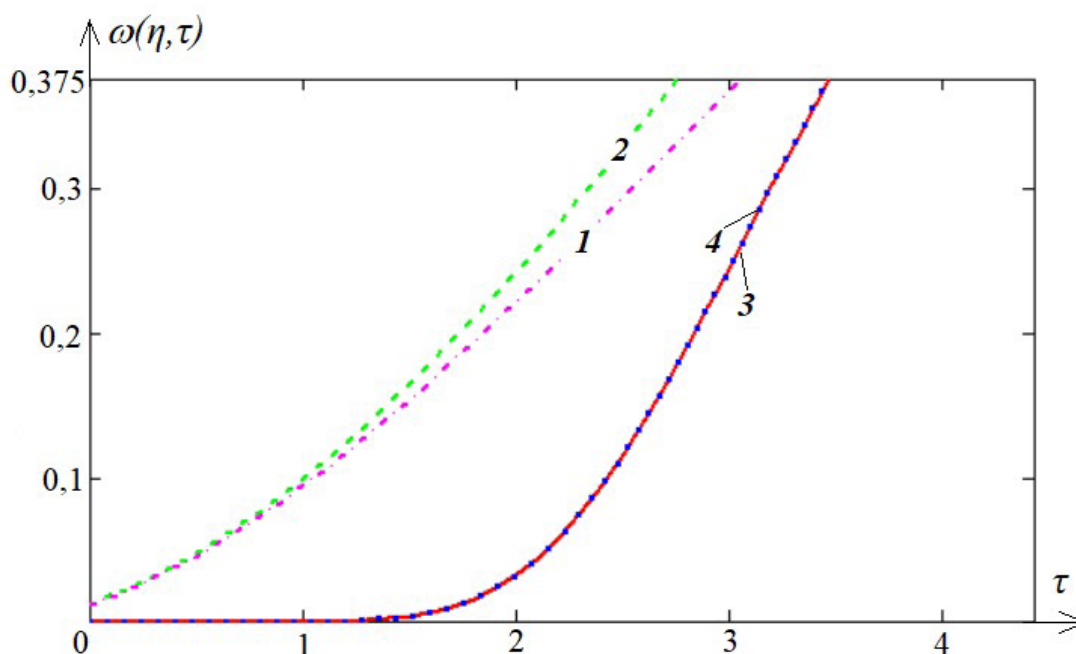


Рис. 2. Проскок CO_2 через регенеративный патрон ($\eta = 4,426$):

- 1 – открытая; 2 – круговая схема подключения (однородный патрон);
- 3 – с четырьмя скачками диаметра гранул в открытой схеме;
- 4 – с четырьмя скачками диаметра гранул в круговой схеме

Кривые 1 и 3 построены по формулам (7) и (9) – (11) ($n = 4$) для открытой схемы. А кривые 2 и 4 – с помощью итерационной процедуры (найдено первое приближение для однородного патрона и неоднородного с четырьмя скачками диаметра гранул с круговой схемой подключения соответственно). Видно, что кривая 3 совпадает с кривой 4 (рис. 2). Причина в том, что благодаря скачкам

диаметра гранул патрон лучше связывает молекулы CO_2 и они практически не возвращаются на вдох, не влияя на концентрацию углекислого газа в выдохе.

В результате в изолирующем аппарате (работающем по круговой схеме) прирост времени наступления критического проскока (расстояние между кривыми 2, 4 (рис. 2)), вызванный четырьмя скачками диаметра гранул, составит 25,9 %, что почти вдвое превышает 13,7 % прироста в открытой схеме (расстояние между кривыми 1, 3 (рис. 2)).

Выводы. Прирост времени защитного действия 25,9 % в изолирующем аппарате с круговой схемой воздухопроводной части почти совпадает с увеличением средней загрязненности патрона с четырьмя скачками диаметра гранул, подключенного по открытой схеме (25,2 %). Такое совпадение не случайно, поскольку время наступления критического проскока CO_2 определяется количеством проследовавших в фильтр молекул. А оно в замкнутой схеме равно количеству произведенных в результате жизнедеятельности человека за вычетом сорбированных патроном. Если проскок увеличивается медленнее, значит, загрязненность – быстрее. То есть прирост защитного действия, найденный по времени критического проскока в замкнутой схеме воздухопроводной части, будет равен приросту связанного углерода в открытой схеме.

Список литературы / References

1. Гудков, С. В. Преимущества использования изолирующих самоспасателей с химически связанным кислородом в угольных шахтах / С. В. Гудков, В. Г. Матвейкин, Г. Г. Шаповалов // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 40 – 44.

Gudkov S. V., Matveykin V. G., Shapovalov G. G. *Preimushchestva ispolzovaniya izoliruyushchikh samospasateley s khimicheski svyazannym kislorodom v ugolnykh shakhtakh* [Benefits of utilization of chemical oxygen self-contained self-rescuers in coal mines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2012, no. 11, pp. 40-44. (In Russian)

2. Jolson, J. Underground Self-Rescuer Technology, Past, Present, and Future / J. Jolson // 3rd SCSR Workshop at the MSHA Training Academy on July 25, 2006.

3. Корреляционные связи и асимптотика динамики сорбции в регенеративном патроне изолирующего респиратора / С. Г. Ехилевский, О. В. Голубева, Е. П. Потапенко, О. Н. Забелендик // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 7. – С. 22 – 28.

Yekhilevskiy S. G., Golubeva O. V., Potapenko Ye. P., Zabelendik O. N. *Korrelyatsionnyye svyazi i asimptotika dinamiki sorbtsii v regenerativnom patrone izoliruyushchego respiratora* [Correlation relations and asymptotics of sorption dynamics in a self-contained respirator regenerative cartridge] *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2022, no. 7, pp. 22-28. (In Russian)

4. Ехилевский, С. Г. Влияние переменных краевых условий на квазистационарный профиль концентрации CO_2 в регенеративном патроне шахтного респиратора / С. Г. Ехилевский, С. А. Олышаников, Е. П. Потапенко // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 3. – С. 46 – 53.

Yekhilevskiy S. G., Olshanikov S. A., Potapenko Ye. P. *Vliyaniye peremennykh krayevykh usloviy na kvazistatsionarnyy profil kontsentratsii CO_2 v regenerativnom patrone shakhtnogo respiratora* [Effect of variable boundary conditions on the CO_2 concentration quasi-stationary profile in regenerative cartridge of mine respirator]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2013, no. 3, pp. 46-53. (In Russian)

5. Балабанов, П. В. Идентификация параметров математических моделей регенерации воздуха средствами защиты изолирующего типа / П. В. Балабанов, А. А. Кримштейн, С. В. Пономарев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 68 – 73.

Balabanov P. V., Krimshteyn A. A., Ponomarev S. V. *Identifikatsiya parametrov matematicheskikh modeley regeneratsii vozdukhа sredstvami zashchity izoliruyushchego tipа* [Identification of mathematical models parameters of air regeneration by self-contained protective means]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 6(7), pp. 68-73. (In Russian)

6. Alhama F., Gonzailer-Fernández C. F. Network simulation method for solving phase-change heat transfer problems with variable thermal properties // Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 38. – Pp. 327–335.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 29.06.2023

Stepan Grigoryevich Yekhilevskiy, Dr. Sci. (Tech.), professor; e-mail: ekhilevskiy@yandex.ru;

Oksana Valeryevna Golubeva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), first vice-rector;

e-mail: o.golubeva@psu.by;

Olga Nikolayevna Zabelendik, senior lecturer; e-mail: o.zabelendik@psu.by

Educational Institution "Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk"

211440, Republic of Belarus, Novopolotsk, 29, ulitsa Blokhina. Phone: (+37 529) 219-68-53

CRITERION OF ENHANCEMENT OF PROTECTIVE POWER TIME OF SELF-CONTAINED BREATHING APPARATUS WITH HETEROGENEOUSLY LOADED REGENERATIVE CARTRIDGE

Purpose. Enhancement of efficacy of the chemical oxygen breathing apparatus protection resource utilization for optimization of its protective power time.

Methods. Mathematical modeling and computer-generated simulation of sorption dynamics.

Results. In order to optimize the chemical oxygen breathing apparatus the modeling formalism has been developed for the process of gas-air mix regeneration by a layer of potassium superoxide pellets with a diameter changing in the direction of the exhaled air filtration.

Scientific novelty. It has been demonstrated that the increase in the protective power time defined by the critical breakthrough period in the air-feed closed-circuit section will be equal to the fixed carbon increase in the open circuit.

Practical value. The protective power time of the breathing apparatus with 1350 g of oxygen-containing product operating in the heavy physical work mode by the circular circuit will increase by 25.9 % due to the changes (jumps) in the pellets diameter.

Keywords: *breathing apparatus; sorption dynamics; operating layer of chemical absorbent; pellet size; protective power time.*

УДК 622.867.324*Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;**Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: lzborschik@yandex.ru;**Руслан Сергеевич Плетенецкий, ст. науч. сотр.; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;**Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru**Федеральное государственное казенное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-45*

ПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЫХАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ КИСЛОРОДОМ

Цель. Исследовать работоспособность пускового устройства самоспасателя при низких положительных температурах для повышения надежности дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом.

Методы. Экспериментальные исследования работоспособности пускового устройства шахтного самоспасателя.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования пусковых устройств шахтных самоспасателей. Определено оптимальное расположение пускового устройства в регенеративном патроне.

Научная новизна. Исследована работоспособность пускового устройства шахтного дыхательного аппарата с химически связанным кислородом в процессе регенерации воздуха кислородсодержащим продуктом.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют обеспечить стабильную работу шахтных самоспасателей при низких положительных температурах.

Ключевые слова: шахтный самоспасатель; дыхательный аппарат; пусковое устройство; химически связанный кислород; надпероксид калия; непригодная для дыхания среда; время защитного действия; сопротивление дыханию.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.

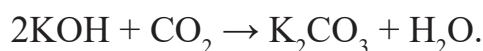
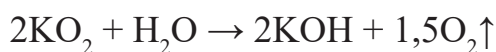
Для экстренной защиты органов дыхания горнорабочих в аварийных ситуациях и последующей их самостоятельной эвакуации из зоны аварии предназначены специальные изолирующие средства – шахтные самоспасатели, которые, как показывает практика, являются наиболее надежной защитой работников от ингаляционных поражений. Шахтные самоспасатели с химически связанным кислородом не только гарантируют защиту от любых концентраций токсических веществ, но и обеспечивают дыхание человека даже при полном отсутствии кислорода в окружающей среде.

В качестве средств индивидуальной защиты органов дыхания (далее – СИЗОД) на угольных шахтах ДНР применяют изолирующие самоспасатели с химически связанным кислородом ШСС-1П. Самоспасатель выпускается готовым к немедленному применению в аварийных условиях в газоносных

шахтах любой категории. Принцип действия самоспасателя ШСС-1П основан на выделении достаточного для дыхания количества кислорода кислородсодержащим продуктом при поглощении выдыхаемых пользователем диоксида углерода и паров воды с одновременной изоляцией органов дыхания человека от окружающей среды.

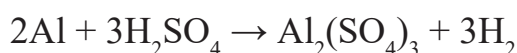
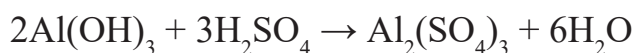
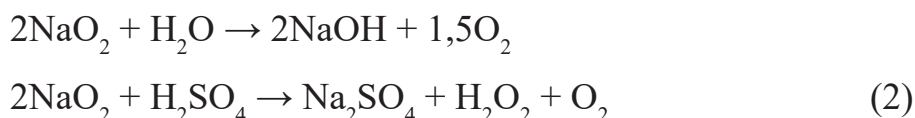
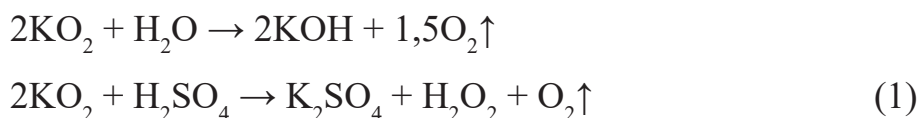
Химические реакции с выделением кислорода для дыхания происходят в регенеративном патроне самоспасателя, снаряженном гранулированным кислородсодержащим продуктом на основе надпероксида калия KO_2 (массой 950 г).

Процесс регенерации выдыхаемого человеком воздуха, попадающего в корпус патрона, – экзотермический, его можно описать уравнениями



В шахтных изолирующих самоспасателях отечественного производства для получения кислорода в начальный период работы аппарата, а также в качестве источника теплоты и влаги, необходимых для запуска процесса регенерации, используется пусковое устройство с пусковым брикетом. В качестве основного (кислородсодержащего) вещества для пусковых брикетов используют надпероксиды калия и натрия, обладающие высокой реакционной способностью. В состав композиции для изготовления брикета входят также вещества, содержащие химически связанную воду (бикарбонат калия, гидроксид алюминия и др.), которые необходимы для достижения требуемых кинетических характеристик брикета, то есть полной и достаточно быстрой его отработки. Кроме того, композиция содержит активный металл (алюминий в виде пудры) или другое вещество, служащее для разогрева реакционной массы с целью обеспечения необходимой скорости отработки брикета. В состав брикетной массы может входить также инертный наполнитель, стабилизирующий процесс выделения кислорода и обеспечивающий механическую прочность брикета. Для инициирования процесса разложения брикета используют раствор серной кислоты определенной концентрации.

Пусковое устройство самоспасателя ШСС-1П работает следующим образом. В результате запуска брикета в самоспасателе (вскрытие аппарата с помощью рычага замка стяжных лент и снятия крышки) инициирующая жидкость (водный раствор серной кислоты) в количестве 1,0...1,2 мл, попадая на поверхность брикета, реагирует с компонентами брикетной массы, при этом протекают следующие реакции:



Пероксид водорода H_2O_2 , образующийся по реакциям (1), (2), в щелочной среде немедленно разлагается



Пусковой период работы самоспасателя длится 1...3 мин в зависимости от температуры окружающей среды и особенностей конструкции аппарата. Объемная доля кислорода во вдыхаемой газовой дыхательной смеси согласно ГОСТ 12.4.292-2015 «ССБТ. СИЗОД. Изолирующие самоспасатели с химически связанным или сжатым кислородом. Технические требования. Методы испытаний. Маркировка. Правила отбора образцов» должна быть не менее 21 % (п. 5.1.1.3). В начальный период и в конце испытаний допускается уменьшение объемной доли кислорода до 19 % на время до трех минут. Указанное требование обеспечивается в самоспасателе автоматически.

Анализ последних исследований и публикаций.

Пусковой брикет массой 40 г для шахтного самоспасателя ШСС-1П удовлетворяет следующим требованиям:

- высокая стехиометрическая емкость по кислороду (не менее 5,0 дм³);
- высокая кинетика протекающих процессов: начальный период разложения брикета не более 15 с;
- высокая скорость диффузии водяных паров в брикет и далее в регенеративный продукт;
- минимальные объемные изменения в процессе разложения;
- высокая прочность пускового брикета;
- постоянство химического состава пускового брикета на протяжении длительного времени хранения в дыхательном аппарате со сроком службы семь лет и при температуре окружающего воздуха от минус 20 до плюс 100 °С.

Температура воздуха в горных выработках шахт колеблется в широких пределах: максимальная – на постоянных рабочих местах, где в течение смены

находятся работники, – не более плюс 26 °С, минимальная – не ниже плюс 16 °С согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 «Правила безопасности в угольных шахтах» (с изм. и доп., утв. совм. приказом ГК Гортехнадзора и Минэнергоугля ДНР от 07.07.2016 № 63/319). Для шахт, расположенных в зоне вечной мерзлоты, характерны отрицательные значения температуры в течение года.

В этих условиях в пусковой период возможно снижение содержания кислорода в воздухопроводной системе аппарата до опасных концентраций [1] и повышение содержания диоксида углерода. Поэтому в нем предусмотрено пусковое устройство [2], назначение которого – обеспечение кислородом для дыхания в начальный период работы самоспасателя, стимулирование активности регенеративного продукта выделенными теплотой и влагой. Для обеспечения надежной работы пускового устройства в различных условиях ведутся разработки новых составов пускового брикета (Патент № 2219982 С2 Российская Федерация, МПК А62D 9/00. Химический состав термостойкого пускового брикета и Патент № 2314128 С1 Российская Федерация, МПК А61L 9/01, А62D 9/00. Состав пускового брикета изолирующего дыхательного аппарата) и конструкций пускового устройства [3], в том числе с использованием регенеративного продукта на матрице [4, 5]. Исследование и разработка надежно работающего пускового устройства самоспасателя – актуальная задача.

Цель работы – исследовать работоспособность пускового устройства самоспасателя при низких положительных температурах для повышения надежности дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом.

Результаты исследований. Пусковое устройство, как и весь самоспасатель, должно оставаться работоспособным после внешних климатических и механических воздействий. Согласно ГОСТ 12.4.292-2015 самоспасатели должны быть рассчитаны на применение при температуре окружающей среды от минус 20 до плюс 40 °С и относительной влажности до 100 %, приведенной к температуре 35 °С. При хранении и транспортировании самоспасатели должны быть устойчивы к воздействию климатических факторов, соответствующих условиям хранения 2(С) по ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

Для определения работоспособности пускового устройства самоспасателя после длительной эксплуатации проведено исследование пусковых брикетов самоспасателей: измерение объема выделяющегося кислорода и времени разложения. Для исследования взяли брикеты самоспасателей, прошедших эксплуатацию на шахтах Донбасса с различными климатическими условиями в течение 2,5 года. На участках этих шахт температура воздуха была в пределах 25...33 °С, относительная влажность – до 98 %. Разложение пусковых брикетов

происходило при температуре 20...25 °С в приспособлении с использованием серийных пусковых механизмов. Объем кислорода измеряли газовым счетчиком ГСБ-400 кл.1 с точностью до 0,05 дм³ и приводили к нормальным физическим условиям. Как видно из рисунка 1, при температурах воздуха 25...30 °С, не оказывающих теплового воздействия на пусковой брикет, пусковое устройство обеспечивает полную сохранность его свойств: запас кислорода составляет 5,7...6,3 дм³, выделение его брикетами происходит за 20...25 с. Защита пускового брикета от влаги в пусковом устройстве эффективна даже в негерметичных самоспасателях.

Исследования пусковых брикетов самоспасателей, подвергавшихся воздействию повышенных температур (более 30 °С), позволили установить, что запас кислорода в них к концу 2,5-годового срока эксплуатации составляет 4...6 дм³. В то же время разложение брикетов замедляется, выделение всего запаса кислорода происходит за 35...45 с. Такая динамика выделения кислорода не затруднит дыхания включенного в самоспасатель человека.

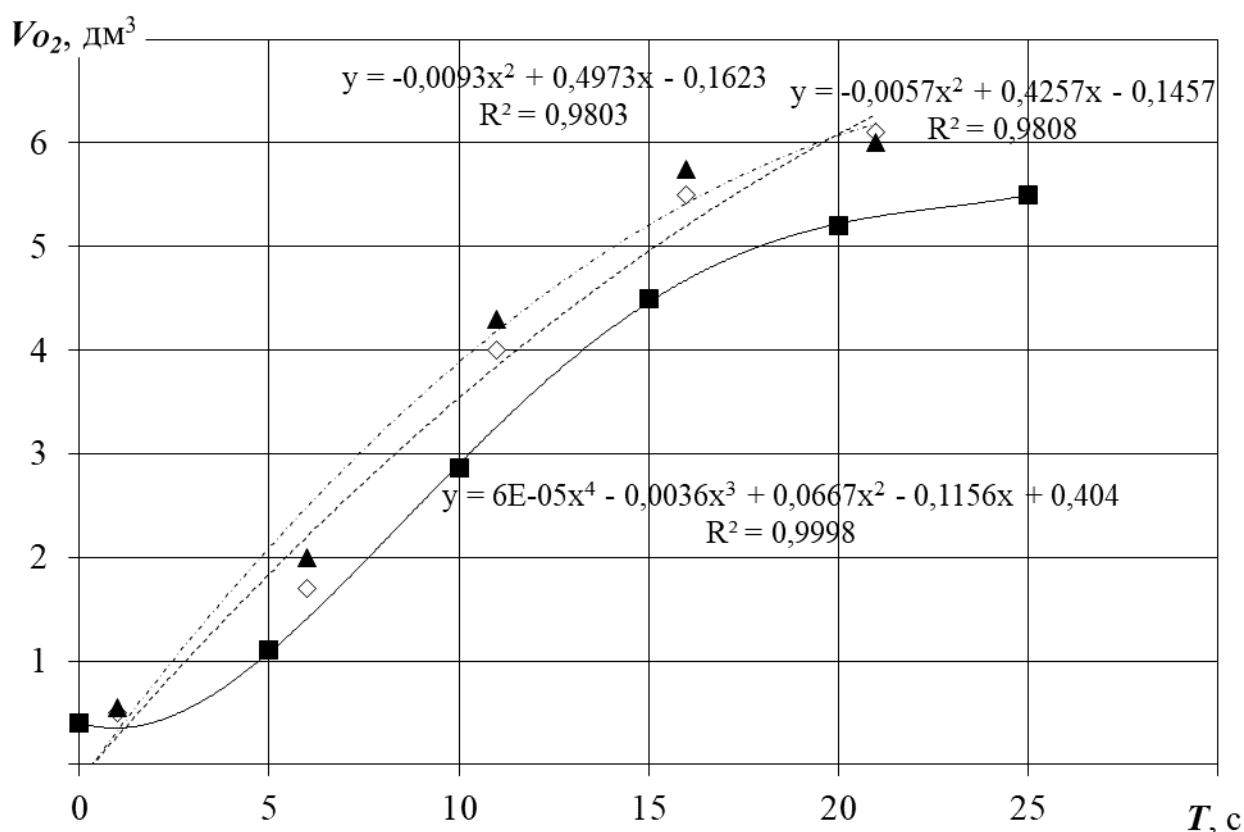


Рис. 1. Динамика выделения кислорода пусковыми брикетами самоспасателей ШСС-1 после эксплуатации в течение 2,5 года при температуре воздуха 25 ...30 °С на шахтах Донбасса:
1 – шахта 1; 2 – шахта 2; 3 – шахта 3

Некоторое ухудшение свойств пускового брикета при повышенных температурах объясняется изменением его состава, происходящего преимущественно под воздействием тепла за счет термического разложения, а не под воздействием влаги.

Проведены сравнительные исследования брикетов самоспасателей, прошедших эксплуатацию на шахтах Донбасса с различными климатическими условиями и находившихся на групповом хранении в шахте и на поверхности. На участках шахт, где эксплуатировались самоспасатели, температура находилась в пределах 25,0...32,5 и 15...23 °С, относительная влажность составляла 95...97 и 85...87 %. Как видно из рисунка 2, температура шахтного воздуха существенно влияет на свойства пускового брикета и динамику выделения кислорода.

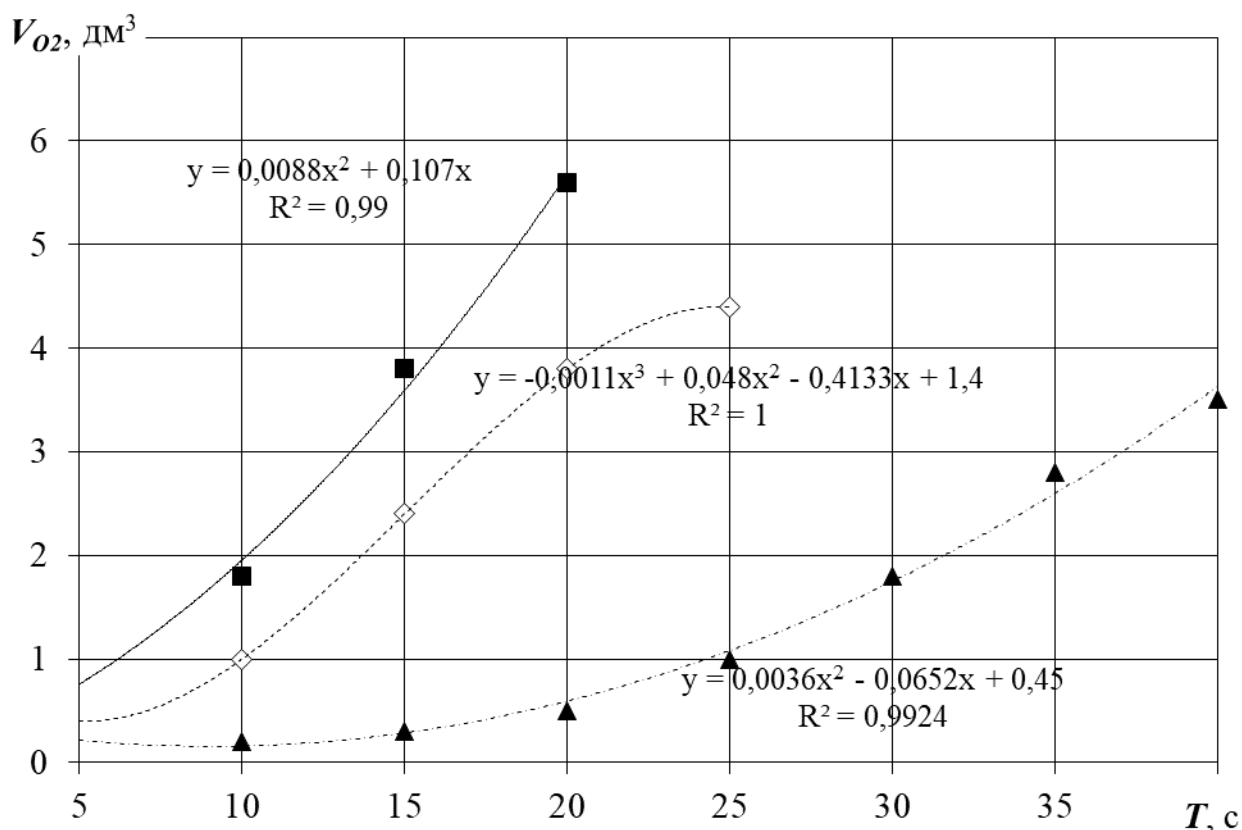


Рис. 2. Динамика выделения кислорода пусковыми брикетами самоспасателей, находившихся в эксплуатации:

1 – исходный пусковой брикет серийного изготовления; 2 – пусковой брикет после 20-месячной эксплуатации при температуре 15...23 °С; 3 – пусковой брикет после 20-месячной эксплуатации при температуре 25,0...32,5 °С

При сохранении брикетами допустимого для дыхания запаса кислорода (не менее 3,5 дм³) динамика их разложения различна. Процесс выделения кислорода брикетами самоспасателей, эксплуатировавшихся при температуре 25,0...32,5 °С, замедляется. Выделение кислорода при температуре 23...25 °С происходит за 40 с. При этом за 15 с выделяется 0,3...0,5 дм³ кислорода, что затрудняет дыхание.

Исследовались также брикеты самоспасателей, находившихся на длительном хранении в шахтах и на поверхности. Установлено, что их работоспособность в значительной степени изменяется под воздействием влаги, внесенной в аппарат при изготовлении, и температуры (рис. 2). Так, например, брикеты самоспасателей ШС, хранившихся в шахте с температурой воздуха более 30 °С, характеризуются замедленным выделением кислорода, их разложение происходит за 45 с, при этом за 15 с они выделяют 0,5 дм³ кислорода. В то же время брикеты самоспасателей, хранившихся в помещении ламповой, сохраняют свои свойства, выделяя кислород за время не более 30 с.

Для использования пускового устройства в качестве стимулятора разработки продукта регенеративного патрона самоспасателя важное значение имеет расположение пускового устройства. При размещении его в центре емкости с кислородсодержащим продуктом экспериментальных образцов самоспасателей исходили из предположения, что оно будет стимулировать работу продукта в пусковой период, особенно при низких положительных температурах окружающей среды, путем подачи непосредственно на продукт выделяемых пусковым устройством тепла и влаги. Однако ожидаемый эффект не был достигнут. Это объясняется тем, что пусковое устройство во время своей работы оплавляет и спекает гранулы соприкасающегося с ним кислородсодержащего продукта, в то время как остальная масса не прогревается. Поэтому даже при низких (+15 °С и ниже) положительных температурах окружающей среды продукт ОКЧ плохо вступает в реакцию и наблюдается повышенный проскок CO₂ в пусковой период (рис. 3). Как видно из рисунка 3, при температуре +15 °С наблюдался проскок 0,8 % CO₂, при +12 °С – 6,2 % CO₂, при +7,5 °С – 8,0 % CO₂, а при 0 °С проскок составил 12,0 % CO₂ и длился 20 мин при максимуме на 12-й мин (согласно ГОСТ 12.4.292-2015 объемная доля диоксида углерода во вдыхаемой газовой дыхательной смеси для всех классов самоспасателей при всех нагрузках не должна превышать 3 %). Эти исследования показали, что такое расположение пускового устройства не пригодно для использования в условиях низких положительных температур (тем более отрицательных).

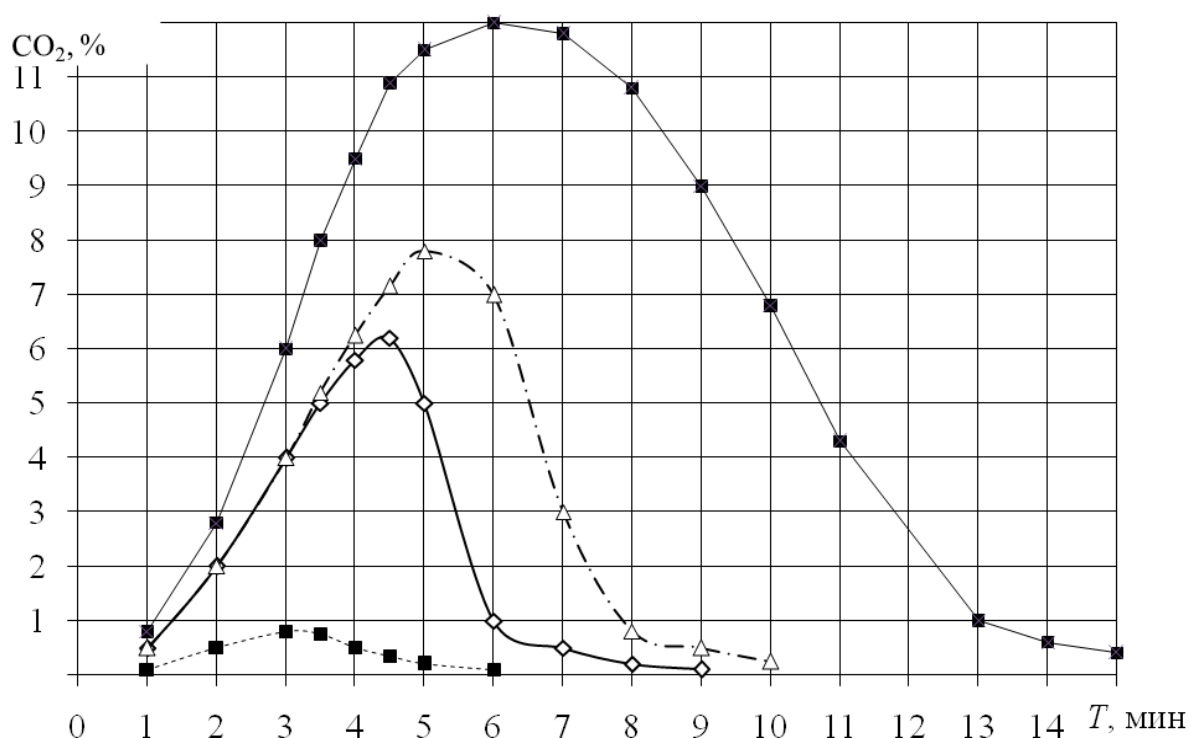


Рис. 3. Зависимость проскока диоксида углерода в пусковой период от температуры окружающей среды:
1 – при +15 °C; 2 – при +12 °C; 3 – при +7,5 °C; 4 – при 0 °C

Экспериментально определено оптимальное расположение пускового устройства в патронах самоспасателей, которое обеспечивает надежную работу самоспасателя ШСС-1П при низких положительных температурах.

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Проведены исследования работоспособности пускового устройства самоспасателя после группового хранения и длительной эксплуатации в различных температурно-влажностных условиях. Определена динамика выделения кислорода пусковыми брикетами, исследована роль пускового устройства для активации работы продукта регенеративного патрона самоспасателя при низких положительных температурах, выявлено важное значение расположения пускового устройства при запуске самоспасателя в этих условиях.

Список литературы / References

1. Петрова, С. В. Прогноз температур рабочих зон в горных выработках глубоких рудников по данным геотермии и температурных съемок / С. В. Петрова // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 322 – 325.

Petrova S. V. *Prognoz temperatur rabochikh zon v gornykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov po dannym geotermii i temperaturnykh syomok* [Prediction of working zones temperatures in deep mine using the data of geothermy and temperature surveys]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*, 2017, no. 1, pp. 322-325. (In Russian)

2. Конструктивная разработка устройства дополнительной подачи кислорода в самоспасатель / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий, Н. Ю. Холодилин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3. – С. 727 – 730.

Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Dvoretskiy S. I., Kholodilin N. Yu. *Konstruktivnaya razrabotka ustroystva dopolnitelnoy podachi kisloroda v samospasatel* [Construction development of a device for additional oxygen supply in a self-rescuer]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 12, no. 3, pp. 727-730. (In Russian)

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

Gudkov S. V., Krylova N. V., Putin S. B., Khromov A. Yu. *Sovremennyye sredstva izoliruyushchey zashchity organov dykhaniya grazhdanskogo naseleniya pri pozharakh i drugikh chrezvychaynykh situatsiyakh* [Modern self-contained means of respiratory organs protection for civilians in fires and other emergency situations]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 58-62. (In Russian)

4. Исследование и разработка кислородного самоспасателя для гражданского населения / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий, С. Б. Путин, Э. И. Симаненков, Н. Ю. Холодилин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4. – С. 1071 – 1078.

Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Dvoretskiy S. I., Putin S. B., Simanenkov E. I., Kholodilin N. Yu. *Issledovaniye i razrabotka kislorodnogo samospasatelya dlya grazhdanskogo naseleniya* [Study and development of oxygen self-rescuer for civilians]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 12, no. 4, pp. 1071-1078. (In Russian)

5. Кислородный самоспасатель для гражданского населения / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий, С. Б. Путин, Э. И. Симаненков, Н. Ю. Холодилин // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 10. – С. 82 – 88.

Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Dvoretskiy S. I., Putin S. B., Simanenkov E. I., Kholodilin N. Yu. *Kislorodnyy samospasatel dlya grazhdanskogo naseleniya* [Oxygen self-rescuer for civilians]. *Khimicheskaya fizika*, 2007, vol. 26, no. 10, pp. 82-88. (In Russian)

Vladimir Mikhaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: lzborschik@yandex.ru;

Ruslan Sergeevich Pletenetskiy, senior scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Viktor Ivanovich Frantsev, principle engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru

*Federal State Institution "The scientific research institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-45*

OXYGEN-REGENERATING BREATHING APPARATUS ACTIVATOR

Purpose. To investigate an operability of the self-rescuer activator in the low positive temperatures in order to improve the reliability of oxygen-regenerating self-contained breathing apparatuses.

Methods. Experimental investigations of the mine self-rescuer activator reliability.

Results. The experimental studies of the mine self-rescuer activators have been fulfilled. The optimal configuration of the activator in the regenerative cartridge has been established.

Scientific novelty. The operability of the oxygen-regenerating mine self-rescuer activator has been studied in the air regeneration process proceeding in the oxygen-containing product.

Practical value. The conducted studies make it possible to ensure the stable operation of the mine self-rescuers in the conditions of low positive temperatures.

Keywords: *mine self-rescuer; breathing apparatus; activator; chemically bounded oxygen; potassium superoxide; irrespirable atmosphere; protective power time; breathing resistance.*

УДК 614.888:62-546.8*Владимир Михайлович Медгаус, нач. отдела.; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru**Николай Николаевич Попов, науч. сотр.; e-mail: dondokmir17@mail.ru**Государственное бюджетное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-50*

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВАКУУМА В СРЕДСТВАХ ИММОБИЛИЗАЦИИ ПОСТРАДАВШИХ

Цель. Разработать требования к конструкции вакуумных насосов для сокращения времени приведения в рабочее состояние средств иммобилизации пострадавших, уменьшения количества отказов вакуумных насосов, улучшения условий труда спасателей при оказании неотложной помощи в экстремальных условиях.

Методы. Информационно-аналитические и экспериментальные исследования.

Результаты. Проведен анализ технических характеристик существующих устройств для создания вакуума (аспираторов), применяемых для реанимационных мероприятий. Разработаны эскизы и изготовлены два макета: насос вакуумный эжекционный НВЭ.00.000 и насос вакуумный механический НВМ-2.00.000. Составлены Предложения по разработке устройства для создания вакуума в средствах иммобилизации пострадавших.

Научная новизна. Для разработки требований впервые проведен сравнительный анализ технических характеристик устройств для создания вакуума, применяемых для реанимационных мероприятий. По результатам исследований и анализа были разработаны эскизы, изготовлены и испытаны два макета насосов: эжекционного и вакуумного механического.

Практическое значение. На основе проведенных исследований и натурных испытаний разработаны требования для создания вакуумных насосов и в соответствии с ними изготовлены макеты насосов, способствующих сокращению времени приведения в рабочее состояние средств иммобилизации пострадавших, уменьшающие количество отказов вакуумных насосов с длительным сроком эксплуатации, повышающие эффективность оказания неотложной помощи в экстремальных условиях.

Ключевые слова: насос вакуумный; вакуумметрическое давление; чрезвычайная ситуация; эжектор; аспиратор; средства иммобилизации пострадавших.

Постановка проблемы. В соответствии с Положением о медицинской службе Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики подразделения медицинской службы МЧС ДНР оказывают экстренную неотложную медицинскую помощь в случаях угрозы жизни и здоровью сотрудников МЧС ДНР и гражданскому населению.

На первом этапе оказания медицинской помощи пострадавшим при травмах конечностей и позвоночника обязательным мероприятием является иммобилизация поврежденных частей тела. В настоящее время средства вакуумной иммобилизации, которыми оснащены горноспасательные

подразделения, укомплектованы вакуумными насосами для фиксации поврежденных частей тела.

Анализ технического состояния средств вакуумной иммобилизации в горноспасательных подразделениях показал, что только Оперативный военизированный горноспасательный отряд оснащен вакуумными средствами иммобилизации пострадавших, а потребность в этих устройствах в целом по ДНР составляет: шины вакуумные – 29 шт., носилки вакуумные – 2 шт.

Используя средства вакуумной иммобилизации, возможно применять один насос для нескольких изделий. Однако предпочтительнее создавать вакуум одним насосом в одном средстве иммобилизации. Обеспечить это в настоящее время невозможно из-за отсутствия заводов-изготовителей, выпускающих насосы отдельно от комплектов изделий.

При этом находящиеся на оснащении МЧС ДНР средства вакуумной иммобилизации с насосами эксплуатируются более 20 лет, что снижает вероятность безотказной работы и эффективность неотложной помощи.

Несмотря на то, что иммобилизация представляет собой специфический комплекс реанимационных мероприятий, в настоящее время на рынке представлен большой ассортимент новых транспортных вакуумных шин и носилок.

Анализ последних исследований и публикаций. Для разработки требований были проанализированы конструктивные решения медицинских аспираторов, представляющие основные тенденции в разработке изделий данного направления.

Медицинский аспиратор MANUVAC (WM 10800) («Weinmann», Германия) представляет собой механический вакуумный насос, который приводится в действие нажатием на педаль рукой, ступней или коленом. Прибор предназначен для удаления значительного количества крови, слизи, рвотных масс и твердых частиц пищи для предотвращения закупорки ими дыхательных путей, предотвращая тем самым опасность остановки дыхания пострадавшего. Аспиратор MANUVAC может быть использован с вакуумными матрасами для откачивания воздуха. Прибор имеет прочный корпус и надежную конструкцию, небольшой вес, ударопрочен и влагоустойчив.

Медицинский аспиратор ACCUVAC Basic (WM 10700) («Weinmann», Германия) – компактный и бесшумный в работе, удобен для использования в транспортных условиях и может эксплуатироваться при температуре воздуха –18...+40 °С. Данная модель имеет эргономичный дизайн, прочный, легко очищаемый корпус, регулятор вакуума, встроенный вольтметр, может крепиться на стене или на корпусе автомобиля.

Аспиратор с механическим приводом АПМ-МП-1 («Медплант», Россия) предназначен для удаления жидкости из верхних дыхательных путей и легких

пострадавшего при проведении реанимационных мероприятий, конструкция аспиратора позволяет нажимать ногой или рукой. Он также может быть использован с вакуумными средствами иммобилизации.

Аспиратор сильфонный АМ-5Е («СПЕКТРО ЛАБ», Украина) предназначен для отбора пробы исследуемой газовой среды через индикаторную трубку для определения содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Принцип действия аспираторов сильфонных АМ-5Е основан на пропускании воздуха за счет разжатия пружинами предварительно сжатого сильфона и выбросе воздуха из сильфона через клапан при сжатии пружины.

Медицинский ручной аспиратор («Ambu», Китай) используют для удаления жидкости при разнообразных манипуляциях, процедурах и операциях.

Для откачки жидких или газообразных сред используют и эжекционные вакуумные насосы.

Сравнительный анализ моделей представлен в таблице.

Таблица

Сравнительный анализ аспираторов

Наименование	Производительность, дм ³ /мин	Вакуум, кПа	Габариты, мм	Масса, кг
MANUVAC	9,6	70	205×105×175	1,4
АПИМ-МП-1	70	70	195×91×120	1,2
Ambu	20	80	184×64×168	0,2

Цель исследования – разработать требования к конструкции вакуумных насосов для сокращения времени приведения в рабочее состояние средств иммобилизации пострадавших, уменьшения количества отказов вакуумных насосов, улучшения условий труда спасателей при оказании неотложной помощи в экстремальных условиях.

Результаты исследований. Принимая во внимание, что все средства вакуумной иммобилизации должны быть обеспечены эффективными вакуумными насосами, проанализированы различные конструктивные решения таких устройств, в том числе и медицинских аспираторов [2–6].

Насосы вакуумные для спасателей должны развивать вакуумметрическое давление до 50 кПа, быть работоспособными в температурном диапазоне –20...+40 °С и независимы от стационарных источников электропитания.

На рисунке 1 представлена схема макета для испытаний эжекционного вакуумного насоса.

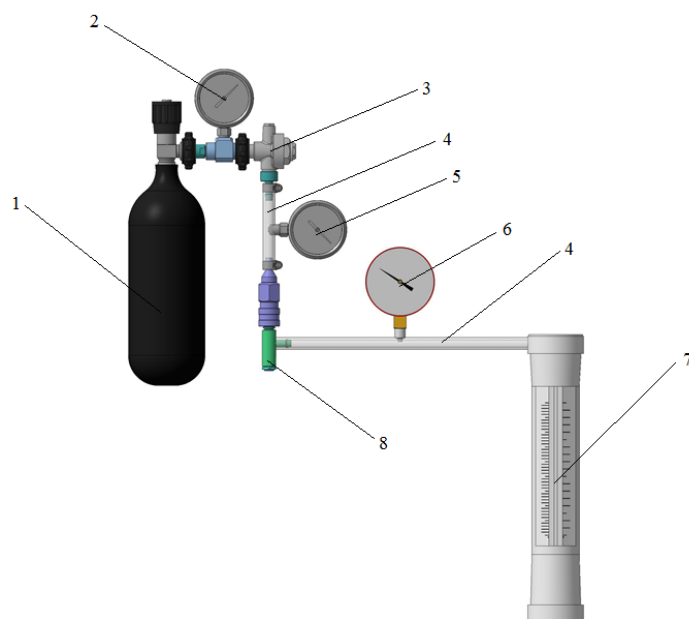


Рис. 1. Схема испытания макета эжекционного вакуумного насоса:
1 – баллон для сжатого воздуха; 2 – манометр; 3 – редуктор; 4 – трубка гибкая;
5 – манометр; 6 – мановакуумметр; 7 – ротаметр; 8 – эжектор

Получены зависимости производительности макета эжекционного вакуумного насоса от рабочего давления эжектора и его расходно-напорная характеристика (рис. 2 и 3).

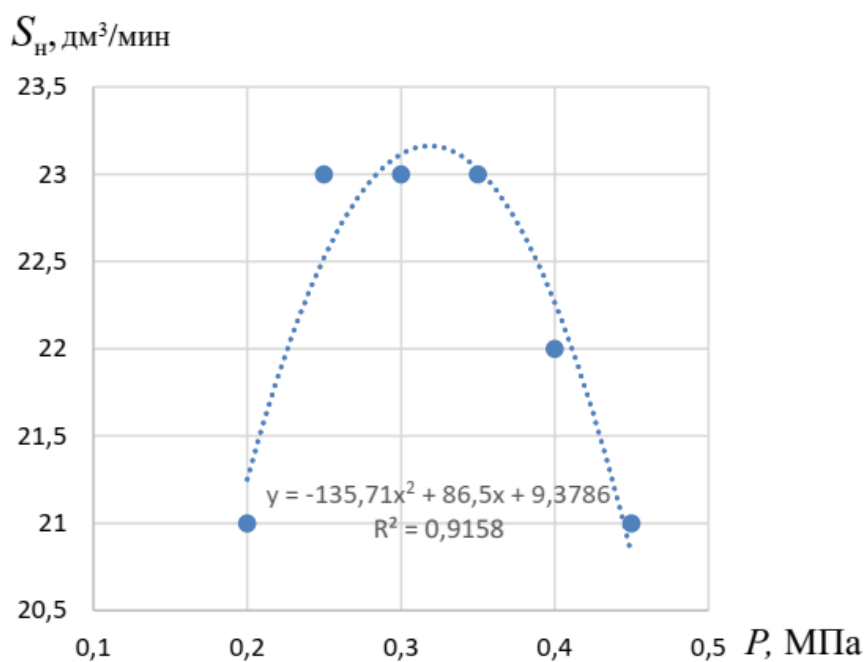


Рис. 2. Зависимость производительности макета эжекционного вакуумного насоса S_n от рабочего давления эжектора P

Производительность макета насоса вакуумного эжекционного была исследована при рабочем давлении эжектора 0,20...0,45 МПа. Рабочее давление регулировали редуктором.

Максимальная производительность макета составила 23 дм³/мин при рабочем давлении в диапазоне 0,25...0,35 МПа.

Далее исследована производительность макета насоса вакуумного эжекционного при вакуумметрическом давлении 0...25 кПа (рис. 3).

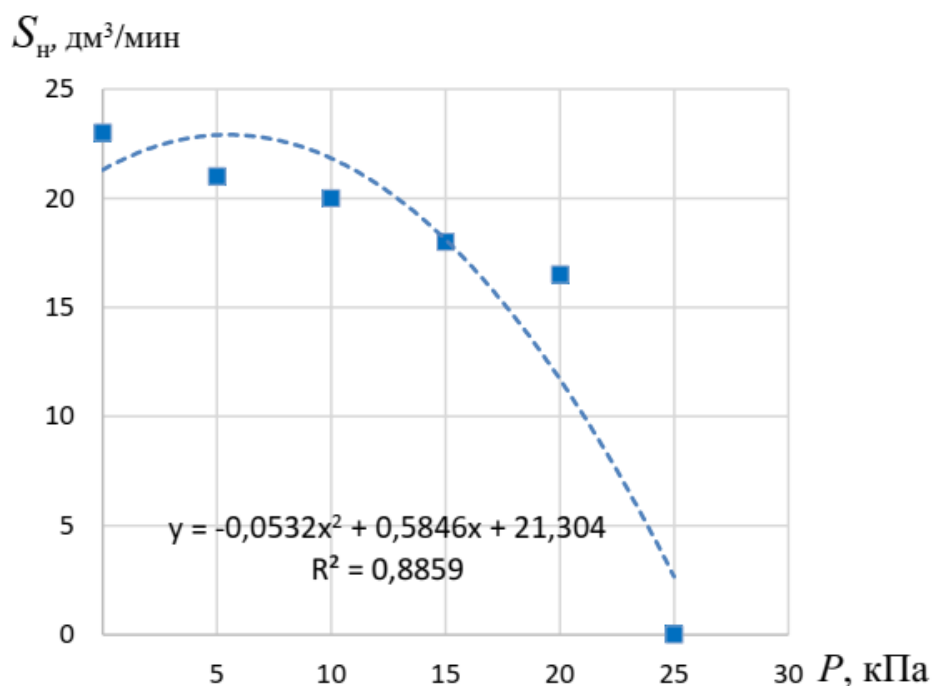


Рис. 3. Расходно-напорная характеристика макета эжекционного вакуумного насоса

Макет механического вакуумного насоса испытан по схеме, представленной на рисунке 4, получена расходно-напорная характеристика (рис. 5).

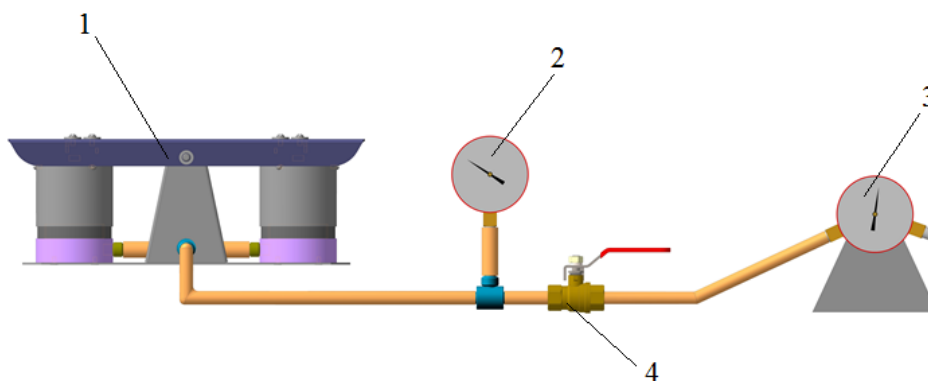


Рис. 4. Схема исследования макета механического вакуумного насоса:

- 1 – макет механического вакуумного насоса; 2 – вакуумметр;
3 – счетчик газовый барабанный; 4 – устройство регулирующее

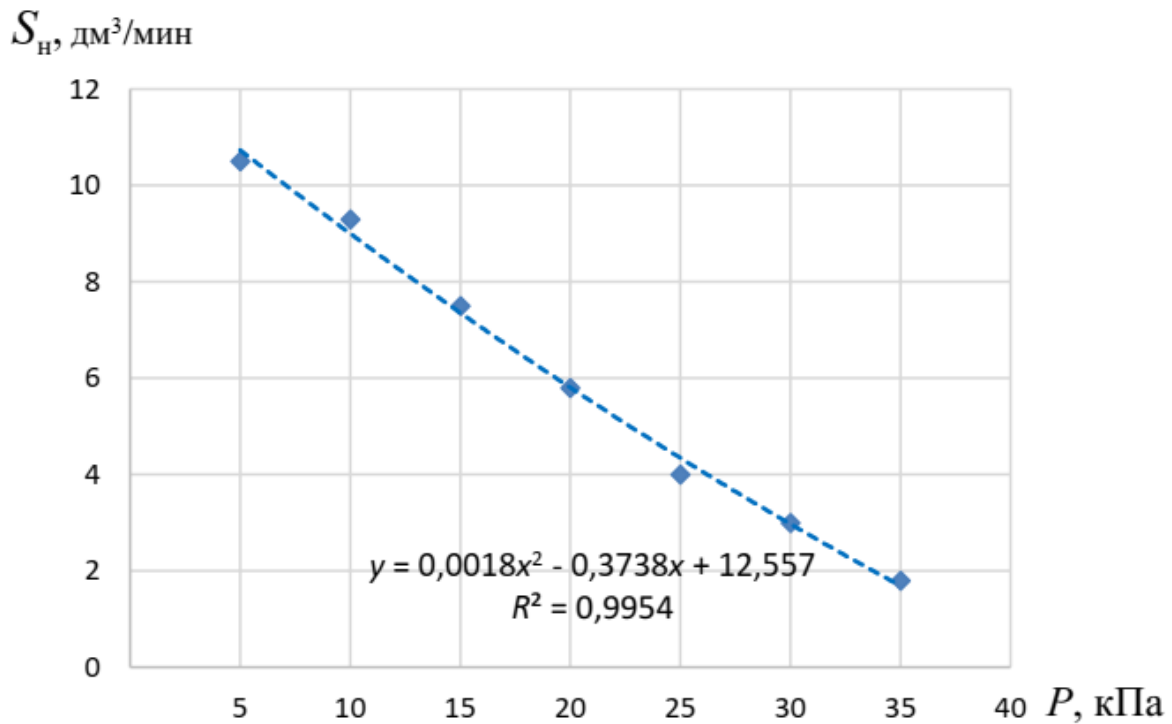


Рис. 5. Расходно-напорная характеристика макета механического вакуумного насоса

Максимальное вакуумметрическое давление P , создаваемое макетом механического вакуумного насоса, составило 35 кПа, минимальная производительность S_n 1,8 дм³/мин, максимальная производительность S_n 10,7 дм³/мин.

После анализа результатов исследований, сравнения расходно-напорных, эксплуатационных характеристик макетов эжекционного и механического насосов были составлены требования для разработки вакуумных насосов. Вакуумные насосы, изготовленные в соответствии с этими требованиями, позволят сократить время приведения в рабочее состояние средств иммобилизации пострадавших, уменьшить количество отказов, улучшить условия труда спасателей при оказании неотложной помощи в условиях чрезвычайных ситуаций.

В целом при разработке конструкций вакуумных насосов актуальным остается повышение эксплуатационной надежности и долговечности, удобство применения и обслуживания, современный дизайн, экологическая чистота и малошумность, снижение затрат на обслуживание, уменьшение производственной трудоемкости, расширение функциональных возможностей и т.д.

Одна из основных задач при разработке вакуумных насосов различного назначения – удешевление продукции, что напрямую связано с применением

доступных материалов, рассчитанных на заданное вакуумметрическое давление и производительность.

Выводы. Впервые проведен сравнительный анализ технических характеристик вакуумных насосов, применяемых для реанимационных мероприятий. По результатам исследований и анализа разработаны эскизы, изготовлены и испытаны два макета насосов: эжекционного и вакуумного механического. Результаты испытаний макетов продемонстрировали преимущества поршневого насоса.

Список литературы / References

1. The effect of discharge areas on the operational performance of a liquid-ring vacuum pump: Numerical simulation and experimental verification / Di Zhang, Yingke Liu, Jianhong Kang, Yifan Zhang, Fanrui Meng // *Vacuum*, 2022, December, vol. 206. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0042207X22005474?via%3Dihub> (дата обращения: 12.12.2022).

2. Исследование процесса откачки конденсируемых паров безмасляными спиральными вакуумными насосами / А. В. Тюрин, А. В. Бурмистров, А. А. Райков, С. И. Саликеев // *Известия высших учебных заведений. Серия «Машиностроение»*. – 2021. – № 2(731). – С. 34 – 40.

Tyurin A. V., Burmistrov A. V., Raykov A. A., Salikayev S. I. *Issledovanie protsessa otkachki kondensiruemykh parov bezmaslyanymi spiralnymi vakuumnymi nasosami* [Investigation of condensed vapors pumping process executed by the dry spiral vacuum pumps]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2021, no. 2(731), pp. 34-40. (In Russian)

3. Механические вакуумные насосы / В. Д. Лубенец, В. И. Васильев, И. В. Автономова, Л. А. Беляев. – Москва : Машиностроение, 1980. – 52 с.

Lubenets V. D., Vasilyev V. I., Avtonomova I. V., Belyaev L. A. *Mekhanicheskie vakuumnye nasosy* [Mechanical vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 52 p. (In Russian)

4. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В. И. Васильев, Н. К. Никулин, П. И. Пластинин. – Москва : Машиностроение, 1989. – 288 с.

Frolov Ye. S., Avtonomova I. V., Vasilyev V. I., Nikulin N. K., Plastinin P. I. *Mekhanicheskie vakuumnye nasosy* [Mechanical vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 288 p. (In Russian)

5. Носков, Е. И. Конструкция свободнопоршневого пневматического вакуумного насоса / Е. И. Носков, А. С. Донской // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2015. – Т. 7, № 2(4). – С. 859 – 862.

Noskov Ye. I., Donskoy A. S. *Konstruktsiya svobodnoporshneвого pnevmaticheskogo vakuumnogo nasosa* [Plunger-free pneumatic vacuum pumps]

construction]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 7, no. 2(4), pp. 859-862. (In Russian)

6. Очков, А. А. Перспектива создания современных высоковакуумных механических насосов / А. А. Очков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2022. – № 1. – С. 103 – 137.

Ochkov A. A. *Perspektiva sozdaniya sovremennykh vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov* [Prospect of creating the modern high-vacuum mechanical pumps]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie"*, 2022, no. 1, pp. 103-137. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 28.02.2023

Vladimir Mikhaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;

Nikolay Nikolayevich Popov, scientific associate; e-mail: dondokmir17@mail.ru

Federal State Establishment "The scientific research institute "Respirator" of EMERCOM of Russia"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-50

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR A VACUUM PUMP CONSTRUCTION EMPLOYED IN DEVICES FOR IMMOBILIZATION OF VICTIMS

Purpose. To develop the requirements for the construction of vacuum pumps applying the comparative study results in order to shorten the readiness time of the immobilization devices, to reduce the failure rate of vacuum pumps, to improve the working conditions of rescuers during administering the acute medical care in the extreme conditions.

Methods. Information-analytical and experimental investigations.

Results. The technical characteristics of the available vacuum devices (aspirators) employed in the intensive care were analyzed. The sketches were done and two breadboard models of the vacuum pumps were manufactured, i.e. the HBЭ.00.000 ejector vacuum pump and the HBM-2.00.000 mechanical vacuum pump. The proposals for the development of the vacuum pump employed in the victim immobilization devices were comprised.

Scientific novelty. First time ever the comparison analysis of the performance specifications was conducted for the vacuum pumps employed in the intensive care. Following the results of investigations and analysis the sketches were plotted and two breadboard models of ejector and mechanical vacuum pumps were manufactured and tested.

Practical value. On the basis of the conducted investigations and full-scale tests the requirements for the vacuum pumps creation have been elaborated and according to these requirements the breadboard models of the pumps have been manufactured facilitating the shortened readiness time of the victim immobilization devices, reduction of failure rate of the vacuum pumps with prolonged service life, the improvement of the acute medical care efficiency in the extreme conditions of emergencies.

Keywords: vacuum pump; vacuum underpressure; emergency situation; ejector; aspirator; victim immobilization devices.

Монографии ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России»

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

Описаны природа и механизм развития процессов самонагревания угля и других органических материалов, методы профилактики эндогенных пожаров. Проведен анализ существующих методов и математических моделей определения самовозгорания материалов органического происхождения. Разработаны математические модели самонагревания веществ с учетом их влажности переменной реакционной поверхности и очагового характера процесса. Даны методы контроля за признаками самовозгорания, оценка склонности веществ к самовозгоранию, требования к средствам изоляции и изолирующим сооружениям.

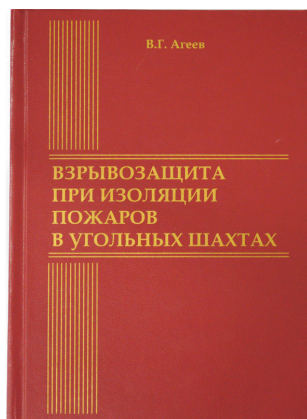
Для инженерно-технического персонала научно-исследовательских, проектных и конструкторских организаций, работников промышленности и сотрудников органов надзора и контроля за безопасностью производства.



Агеев, В. Г. Эндогенная пожароопасность на различных этапах становления шахт Донбасса: монография / В. Г. Агеев, П. С. Пашковский, С. П. Греков. – Донецк, 2018. – 148 с.

Выполнен ретроспективный анализ становления угольной промышленности Донецкого края, в том числе общей аварийности и состояния эндогенной пожароопасности. Отражены периоды зарождения, расцвета, спада, обвала, стагнации добычи угля и связанных с этим количеством аварий и эндогенных пожаров. Показана роль разработок НИИГД «Респиратор» в проблемах изучения природы самовозгорания углей, оценке степени склонности углей Донбасса к самовозгоранию, контроле за развитием процесса самовозгорания, прогнозе самовозгорания углей в конкретных горно-геологических условиях, документов и материалов, регламентирующих горные работы на пластах угля, склонных к самовозгоранию.

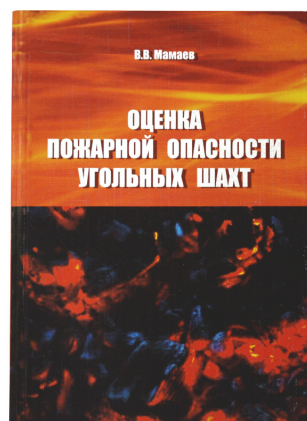
Монография предназначена для горноспасателей, инженерно-технических работников шахт, проектных и научно-исследовательских организаций, студентов технических вузов



Агеев, В. Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В. Г. Агеев. – Донецк : Арпи, 2014. – 338 с.

Обобщен опыт тушения подземных пожаров в угольных шахтах, опасных по газу. Приведены результаты исследований формирования взрывоопасной среды в горных выработках, распространения воздушных ударных волн при взрывах метанопылевоздушных смесей. Результаты моделирования взрывов позволяют определять безопасные расстояния от места взрыва до места ведения горноспасательных работ. Предложены способы и средства взрывозащиты.

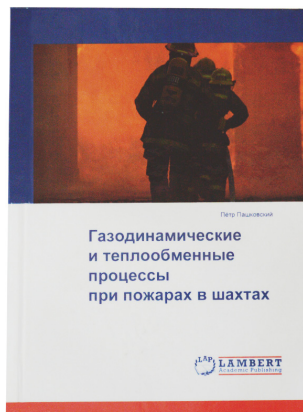
Монография предназначена для горноспасателей, инженерно-технических работников шахт, проектных и научно-исследовательских организаций, студентов технических вузов.



Мамаев, В. В. Оценка пожарной опасности угольных шахт / В. В. Мамаев. – Донецк : ФЛП Панов А. Н., 2017. – 282 с.

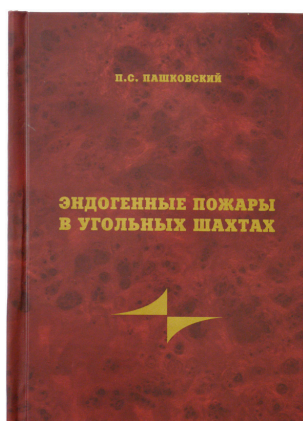
Приведены результаты исследований пожарной опасности материалов и изделий, технологического оборудования и подземных объектов угольных шахт. Предложены методы количественной оценки с учетом специфики их эксплуатации и возможности возникновения подземного пожара. Полученные результаты позволяют в целом повысить уровень пожарной безопасности угольных шахт.

Монография предназначена для специалистов в области пожарной безопасности, инженерно-технических работников шахт, научно-исследовательских организаций, студентов технических вузов.



Пашковский, П. С. Газодинамические и теплообменные процессы при пожарах в шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк, 2018. – 298 с.

В настоящей книге систематизированы вопросы управления вентиляцией шахт при ликвидации подземных пожаров. Рассмотрены проблемы термодинамики газов, теплообмена между потоком нагретого воздуха и окружающей средой, термодинамические процессы в шахте. Приведена характеристика аварийных вентиляционных режимов, определена область их применения, изложены способы управления проветриванием, методы определения аэродинамических, тепловых и газовых параметров аварийного участка. Особое внимание уделено тем вопросам, которые недостаточно полно освещены в ранее выпущенных литературных источниках. Книга написана на основании результатов исследований, проведенных в НИИГД «Респиратор» и других организациях, а также опыта ликвидации подземных пожаров на угольных шахтах. Излагаемый материал проиллюстрирован примерами.



Пашковский, П. С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк : Ноулидж (донецкое отделение), 2013. – 792 с.

Описаны природа и механизм развития процессов самовозгорания угля, методы профилактики эндогенных пожаров и способы их тушения. Приведенные данные способствуют уменьшению количества эндогенных пожаров, сокращению сроков их локализации и тушения.

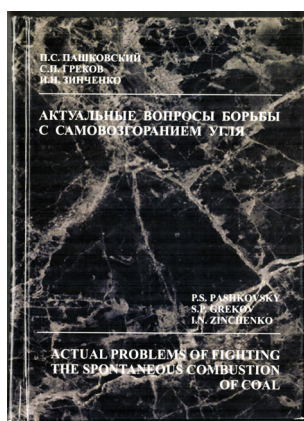
Монография предназначена для специалистов, занимающихся вопросами предупреждения и тушения эндогенных пожаров, преподавателей, аспирантов и студентов горных вузов.



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

Систематизированы методы управления вентиляцией шахт при ликвидации подземных пожаров. Рассмотрены особенности термодинамики газов, теплообмена между потоком нагретого воздуха и окружающей средой, термодинамические процессы в шахтном воздухе. Приведена характеристика аварийных вентиляционных режимов, установлена область их применения, изложены методы определения аэродинамических, тепловых и газовых параметров аварийного участка.

Для инженерно-технических работников угольных предприятий, проектных и научно-исследовательских организаций, студентов вузов.



Пашковский П. С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П. С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк : Арпи, 2012. – 656 с.

Изложены основы теории самовозгорания углей. Рассмотрены математические модели адсорбции газов зёрнами адсорбента, которая приводит к выделению теплоты. Исследованы факторы, влияющие на самонагревание углей, способы предотвращения самонагревания. Приведены математические модели инертизации атмосферы и предотвращения самонагревания. Даны расчеты группирования шахтопластов по эндогенным пожарам. Изучено влияние геологических нарушений на пожароопасность. Приведены методики расчета склонности углей к самовозгоранию и инкубационного периода.

Настоящее издание – первый источник, объединяющий исследования ученых Украины за 20-летний период по проблемам эндогенных пожаров в шахтах. Предназначено для специалистов, занимающихся вопросами самовозгорания углей, работников шахт, аспирантов и студентов вузов.

Правила оформления авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

К рассмотрению принимаются авторские рукописи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступом 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта;
- название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 150 до 250 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован и содержать следующие элементы: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов) на русском и английском языках;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи (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 текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 10 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фотоснимки и др.) предоставляются в виде отдельных файлов общепринятых графических форматов (jpeg, bmp). Диаграммы, схемы, графики должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Paint, CorelDRAW, Компас-3D и др.).

Рисунки (диаграммы, фотоснимки и др.) располагают вместе с текстом в местах ссылок на них. Изображения должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подрисуночные подписи обязательны. Недопустимо включать их в сам рисунок.

Формулы выполняются 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 указывается справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы располагаются в книжной ориентации, они должны иметь заголовки и быть пронумерованными, если их две или более. Размер таблицы не должен превышать страницу.

Список литературы (не менее 5 и не более 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. В списке литературы должно быть не более 20 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи. Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты; ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами.

После рецензирования редакция регистрирует авторскую рукопись и совместно с автором ведет подготовку к публикации. Перед публикацией автору представляется отредактированный сверстаный вариант рукописи для ознакомления.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

Авторские рукописи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.

Порядок рецензирования авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию авторских рукописей, соответствующих специализации и тематике издания, с целью их экспертной оценки.

Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала. Если рукопись соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

Рецензент оценивает рукопись и дает заключение о целесообразности ее публикации.

При наличии в рецензии (рецензиях) замечаний по содержанию статьи, но при условии в целом положительных рецензий, статья отправляется автору на доработку, после чего эта статья по решению редакции может быть либо опубликована, либо направлена на повторное рецензирование.

В том случае, 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.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2023, № 3(60)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л. В. Барзий

Технический редактор Н. Н. Грибенюк

Переводчик Л. А. Ахундова

Учредитель и издатель

*Федеральное государственное казенное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС России»*

Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к выходу в свет 25.09.2023.

Адрес редакции и издателя: ФГКУ «НИИ «Респиратор» МЧС России»,
ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+7 856) 332-78-01; 332-78-60

Объем 4,2 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 27 сентября 2023 г.