



Государственное бюджетное учреждение  
«Научно-исследовательский институт «Респиратор»  
Министерства по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации  
последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики»

# НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 4(59)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

---

---

Донецк  
2022

---

---

Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2022. – № 4(59). – 124 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 – Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики».

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	С.П. Греков
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 (Российская Федерация)
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 ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» (протокол № 6 от 24.11.2022).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000264 от 09.08.2022.



State Budgetary Establishment  
“The Scientific Research Institute “Respirator”  
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic  
for Civil Defence, Emergencies and Elimination  
of Consequences of Natural Disasters”

**SCIENTIFIC  
BULLETIN  
OF THE NII “RESPIRATOR”**

No. 4(59)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NII "Respirator". – Donetsk, 2022. – No. 4(59). – 124 p.

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

The materials being published are intended for scientists and specialists concerning with the problems of prevention of emergencies, fighting their consequences, lecturers, postgraduate students and students of institutes of higher education, workers of various industries.

Founder and publisher – State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator" of the Ministry of the Donetsk People's Republic 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.)	S.P. Grekov
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 (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V.V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the Academic council of GBU NII "Respirator" EMERCOM DPR (proceeding no. 6 from 24.11.2022).

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 и промышленная  
безопасность***

**Агеев В. Г., Греков С. П.,  
Мавроди А. В.**  
Инженерный метод расчета  
переходных газодинамических  
процессов на выемочных участках  
шахт при их обесточивании 7

**Старикова И. Г.**  
Определение коэффициентов  
теплоотдачи от угля  
в окружающие среды 17

**Ковалев А. П., Колесник Л. И.**  
Построение схем замещения сложных  
по структуре восстанавливаемых  
систем для оценки их надежности  
и пожаробезопасности 26

**Козлитин А. А., Лебедева В. В.,  
ЩербакOVA О. Н., Сиверский А. В.**  
Сорбенты для обнаружения  
компонентов нефтепродуктов в пробах  
после пожара 37

***II. Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях***

**Чубучный Н. Ю., Добрякова Е. И.**  
Инновационные формы обучения  
населения вопросам пожарной  
безопасности 47

**Лебедева В. В., Непочатых И. Н.**  
Оптимизация состава  
огнезащитного покрытия методом  
симплекс-решетчатого планирования 60

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

**Ageyev V. G., Grekov S. P.,  
Mavrodi A. V.**  
Engineering method for calculating  
transient gas-dynamic processes in  
working areas of mines during blackout

**Starikova I. G.**  
Determination of coefficients of heat  
transfer from coal to ambient media

**Kovalyov A. P., Kolesnik L. I.**  
Plotting the equivalent circuits  
of structurally complex restorable systems  
for assessment of their dependability  
and fire safety

**Kozlitin A. A., Lebedeva V. V.,  
Shcherbakova O. N., Siverskiy A. V.**  
Sorbents for detecting oil product  
components in samples after the fire

***II. Safety in emergencies***

**Chubuchnyi N. Yu., Dobryakova Ye. I.**  
Innovative forms of teaching fire safety  
to population

**Lebedeva V. V., Nepochatykh I. N.**  
Optimization of fire-protective coating  
composition applying simplex-lattice  
planning method

**Греков С. П., Головченко Е. А.**  
Исследование кинетики  
теплового эффекта окисления  
газонасыщенных углей Донбасса

66

**Grekov S. P., Golovchenko Ye. A.**  
Investigation of oxidation heat effect  
kinetics of gas-saturated coal  
of Donets basin

**Коляда А. Ю., Дикенштейн И. Ф.,  
Коврижкин О. И.**  
Флегматизация пламенного горения  
в горной выработке

75

**Kolyada A. Yu., Dikenshteyn I. F.,  
Kovrizhkin O. I.**  
Phlegmatizing the flaming combustion  
in a mine working

***III. Охрана труда  
и экологическая безопасность***

***III. Labor protection  
and environmental safety***

**Мамаев В. В., Зборщик Л. А.,  
Плетенецкий Р. С., Францев В. И.**  
Система кислородопитания  
изолирующего регенеративного  
респиратора с оптимальным  
содержанием кислорода

82

**Mamayev V. V., Zborshchik L. A.,  
Pletenetskiy R. S., Frantsev V. I.**  
Oxygen feeding system of self-contained  
regenerative breathing apparatus  
with optimum oxygen content

**Кирьян А. П., Серёгин А. Б.**  
Уточненная математическая  
модель теплообменных процессов  
в противотепловой одежде спасателей

94

**Kiryay A. P., Seryogin A. B.**  
Specified mathematical model  
of heat exchange processes in rescuers'  
heat protective clothing

**Буряк Д. С., Земляк Г. Н.**  
Исследование гидравлических  
параметров центробежных насосов  
при параллельной схеме подключения

103

**Buryak D. S., Zemlyak G. N.**  
Investigation of hydraulic parameters of  
centrifugal pumps with parallel connection  
diagram

**Иваненко А. Ф., Мухин П. Е.**  
Особенности расчета технического  
риска на углеперерабатывающих  
предприятиях

109

**Ivanenko A. F., Mukhin P. Ye.**  
Specifics of technical risk estimation  
at coal preparation plants

## **I. Пожарная и промышленная безопасность**

УДК 622.411.33:[622.012.2:621.311.0642]

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

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;*

*Александр Викторович Мавроди, науч. сотр.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-34*

### **ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ ШАХТ ПРИ ИХ ОБЕСТОЧИВАНИИ**

**Цель.** Разработать инженерный метод расчета переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт при изменении режимов работы вентиляции и дегазации для оперативного прогноза газовой обстановки.

**Методы.** Анализ теоретических решений переходных газодинамических процессов в выемочных участках шахт и разработка номограмм для оперативных расчетов.

**Результаты.** Получены математические зависимости определения объемной доли метана на выемочном участке шахты при техногенной аварии.

**Научная новизна.** Впервые предложен метод расчета газовой обстановки в выемочном участке при общем обесточивании шахты.

**Практическая значимость.** Разработанный метод расчета позволит работникам горноспасательной службы оперативно рассчитать и спрогнозировать газовую обстановку на аварийном выемочном участке при общем обесточивании горного предприятия без использования ПЭВМ.

**Ключевые слова:** *выемочный участок; лава; выработанное пространство; метан; вентиляция; дегазация; сближенный пласт; переходной газодинамический процесс; номограмма, метод расчета.*

**Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.** Одна из повседневных задач работников угольных шахт – обеспечение безопасности газодинамических процессов наиболее опасных районов поступления метана в выработки выемочных участков [1]. Именно в этих местах особенно тщательно ведется постоянный контроль содержания метана.

Практика разработки угольных пластов Донбасса показывает, что по мере подвигания линии очистного забоя из-за изменяющихся горно-геологических и технических условий параметры газовыделения из разрабатываемого пласта и сближенных пластов (спутников) изменяются, что влечет увеличение содержания метана в восходящей вентиляционной струе выемочного участка. Такие изменения, как правило, связаны с перераспределением воздуха по всей шахте [1 – 3].

Новый расход воздуха в аварийном участке зависит от расстояния до сближенных пластов (спутников) и происходит не мгновенно, а после завершения переходного газодинамического процесса, длящегося от нескольких часов до суток. В связи со сказанным для нормализации газовой обстановки и применения практических мер по изменению режима работы вентиляции и (или) дегазации необходимо заранее рассчитать на ПЭВМ газодинамические параметры, которые приведут к желаемым результатам [3, 4]. Для таких расчетов необходимо использовать теоретические данные о переходных газодинамических процессах и возможные максимальные значения содержания метана в выемочном участке после изменения параметров проветривания или работы системы дегазации.

Особый случай представляет собой исследование переходных газодинамических процессов в выемочных участках шахт при техногенных авариях в них с отключением электроэнергии, которые систематически происходят во время военных действий. При таких авариях необходимо оперативно без применения ПЭВМ иметь возможность определить газовую обстановку на выемочных участках на ближайшие несколько часов для эффективного ведения горноспасательных работ.

Прогнозирование газовой обстановки (при невозможности контролировать ее на месте) позволит оперативно разработать и осуществить меры по нормализации газовой обстановки после возобновления электроснабжения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Ранее [5] нами была построена математическая модель переходных газодинамических процессов в выемочных участках шахт при изменении режимов вентиляции и дегазации. Получены дифференциальные уравнения и аналитические решения задачи.

**Цель исследования.** Разработать инженерный метод расчета переходных газодинамических процессов в выемочных участках шахт при изменении режимов вентиляции и дегазации для оперативного прогноза газовой обстановки.

**Результаты исследований.** При определении содержания метана в выемочных участках шахт в переходных газодинамических процессах необходимо было для каждого конкретного случая специально использовать программу для ПЭВМ, так как решение представлено в интегральном виде.

Для практического и более удобного использования разработанной ранее математической модели проанализируем параметры теоретических зависимостей и определим возможность представить решения в виде таблиц и графиков. С этой целью разделим математическую модель на три части и запишем еще раз полученный ранее результат в безразмерном виде. Первую часть математической модели представим следующим образом:

$$\bar{\zeta}_{\text{в1}} = 1 - \frac{1}{2} \left[ \exp(\delta_{\text{в}})(\tau_{\text{в}} + 1) \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau_{\text{в}} + 1}{2\sqrt{\tau_{\text{в}}/\delta_{\text{в}}}} \right) - (\tau_{\text{в}} - 1) \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau_{\text{в}} - 1}{2\sqrt{\tau_{\text{в}}/\delta_{\text{в}}}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\tau_b$  – критерий гомохронности (относительное время переходного газодинамического процесса);

$\delta_b$  – произведение числа Пекле на геометрический критерий  $l_{\pi} / m$ ;

$l_{\pi}$  – длина лавы, м;

$m$  – мощность разрабатываемого пласта, м.

Вторую часть математической модели представим в виде

$$\bar{\zeta}_{b2} = \frac{\tau_b}{2} \cdot \int_0^1 \operatorname{erf} \left( \frac{\lambda}{2\sqrt{\tau_b \bar{x} / \delta_b}} \right) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau_b(1-\bar{x})-1}{2\sqrt{\tau_b(1-\bar{x}) / \delta_b}} \right) - \exp(\delta_b) \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau_b(1-\bar{x})+1}{2\sqrt{\tau_b(1-\bar{x}) / \delta_b}} \right) \right] d\bar{x}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – параметр, характеризующий расстояние по нормали от разрабатываемого до сближенного пласта, метановыделение из которого будет максимальным.

Третью часть математической модели представим в виде

$$\bar{\zeta}_3 = -\frac{K_q - 1}{K_q - K_{Qb}}, \quad (3)$$

где  $K_q$  – глубина регулирования дебита метана из сближенных пластов (спутников) при дегазации;

$K_{Qb}$  – глубина регулирования расхода воздуха в активно проветриваемой зоне выработанного пространства.

Объединив уравнения (1) – (3), имеем комплексный параметр  $\zeta_b$ , характеризующий переходные процессы в выемочном участке при изменении режимов вентиляции и дегазации

$$\zeta_b = \bar{\zeta}_{b1} - \bar{\zeta}_{b3} \cdot \bar{\zeta}_{b2} \quad (4)$$

или

$$\zeta_b = \frac{C_b(l_{\pi}, t) - C_b(l_{\pi}, 0)}{C_b(l_{\pi}, \infty) - C_b(l_{\pi}, 0)}, \quad (5)$$

где  $C_b(l_{\pi}, t)$  – объемная доля метана на вентиляционном штреке после изменения режима вентиляции и дегазации, %;

$C_b(l_{\pi}, 0)$  – объемная доля метана на сопряжении лавы с вентиляционным штреком до изменения режима вентиляции и дегазации, %;

$C_b(l_{\pi}, \infty)$  – объемная доля метана на выходе из лавы при изменении режима проветривания и дегазации, %.

Анализ зависимости (4) показывает, что параметр  $\bar{\zeta}_{b1}$  содержит только две безразмерные величины  $\tau_b$  и  $\delta_b$ , имеющие вид

$$\tau_b = \frac{Q_{b1} t}{S_b l_{\pi}}; \quad \delta_b = \frac{Q_{b1} l_{\pi}}{S_b D_b}, \quad (6)$$

где  $Q_{в1}$  – расход воздуха в лаве после обесточивания шахты,  $m^3/c$ ;

$t$  – время, прошедшее с момента обесточивания шахты,  $c$ ;

$S_{в}$  – площадь поперечного сечения активно проветриваемой зоны выработанного пространства,  $m^2$ ;

$D_{в}$  – коэффициент диффузии метана в выработанном пространстве,  $m^2/c$ .

Для периода обесточивания шахты до суток  $\tau_{в} = 0 \div 10$ . Применительно к шахтам Донбасса параметр  $\delta_{в}$  может быть принят равным 2. Поэтому первую часть уравнения (1) представим в виде графика (рис. 1).

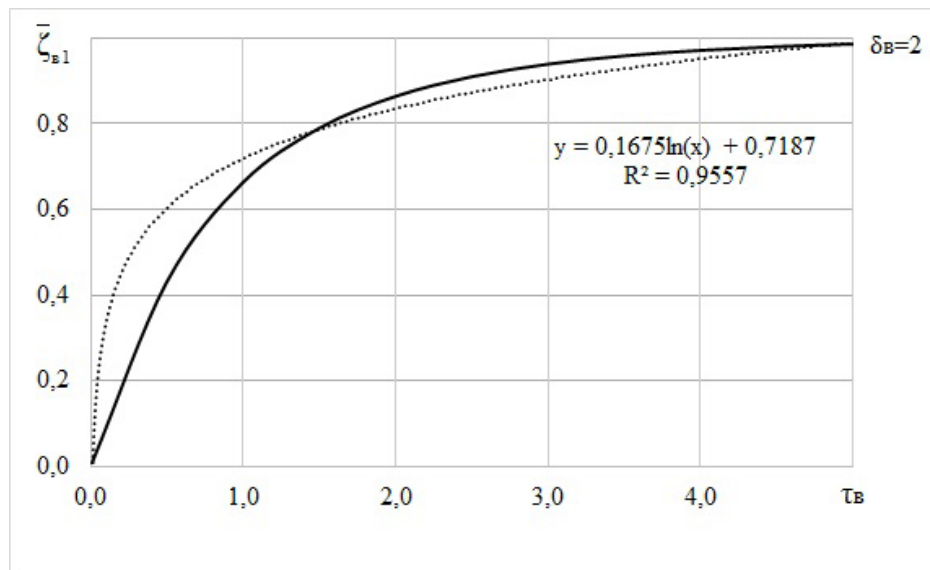


Рис. 1. Зависимость параметра  $\bar{\zeta}_{в1}$  от критерия  $\tau_{в}$

Второй член уравнения (2) тоже зависит от параметров  $\tau_{в}$  и  $\delta_{в}$ , но еще и от параметра  $\lambda$ , имеющего вид

$$\lambda = \frac{l_{сп}}{l_{г}} \sqrt{\frac{D_{в}}{f}}, \quad (7)$$

где  $l_{сп}$  – расстояние по нормали от разрабатываемого пласта до сближенного,  $m$ ;

$f$  – коэффициент пьезопроводности, принимаемый за константу.

Анализ выражения (7) показал, что параметр  $\lambda$  для условий разработки пластов Донбасса изменяется в пределах  $0 \dots 1$ , причем величина  $\lambda = 0$  соответствует минимальному расстоянию до дегазируемого спутника, а  $\lambda = 1$  – расстоянию примерно 50 м [6]. Таким образом, параметр  $\lambda$  можно выразить следующей формулой:

$$\lambda = 0,02l_{сп}. \quad (8)$$

Поэтому параметр  $\bar{\zeta}_{в2}$  из выражения (2) может быть представлен семейством кривых в виде номограммы (рис. 2).

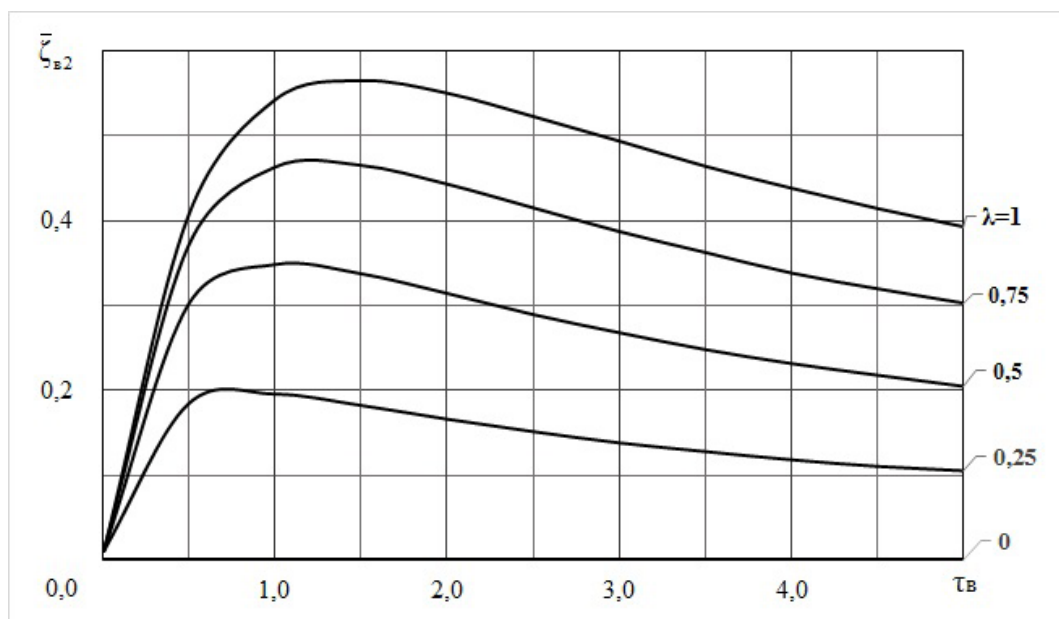


Рис. 2. Зависимость  $\bar{\zeta}_{в2}$  от критерия  $\tau_{в}$

Сомножитель параметра  $\bar{\zeta}_{в3}$  зависит от отношений расходов воздуха по выемочному участку и каптажа метана из сближенных пластов до и после обесточивания шахты

$$K_q = \frac{q_{сн1}}{q_{сн0}}; K_{Q_{в}} = \frac{Q_{в1}}{Q_{в0}}, \quad (9)$$

где  $q_{сн0}$  – количество метана, капируемого дегазацией при нормальной работе выемочного участка, м<sup>3</sup>/с;

$q_{сн1}$  – количество капируемого метана при изменении режима дегазации, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{в0}$  – расход воздуха в лаве при нормальном режиме проветривания, м<sup>3</sup>/с.

Параметры  $K_q$  и  $K_{Q_{в}}$  для каждой шахты имеют свои значения, поэтому параметр  $\bar{\zeta}_{в3}$  всегда может быть определен.

Используя графические зависимости (рис. 2 и 3) и вычисляя параметр  $\bar{\zeta}_{в3}$ , можно получить зависимость  $\zeta_{в} = f(\bar{\zeta}_1 + \bar{\zeta}_3 \cdot \bar{\zeta}_2)$ , то есть в безразмерном виде определить газовую динамику объемной доли метана в выемочном участке после обесточивания шахты.

В размерном виде объемную долю метана следует определять по зависимости (5)

$$C_{в}(l_{л}, t) = \zeta_{в} [C_{в.л}(l_{л}, \infty) - C_{в0}(l_{л}, 0)] + C_{в0}(l_{л}, 0). \quad (10)$$

Таким образом, проанализированы теоретические зависимости переходных газодинамических процессов в активно проветриваемой зоне выработанного пространства и в лаве выемочных участков шахт при техногенных авариях.

Учитывая проведенный выше анализ переходных газодинамических процессов в выемочных участках шахт, где происходит основное метановыделение, предложен следующий порядок их расчета для конкретных условий:

- вычисляют параметр относительного времени  $\tau_B = f(t)$  для измененного режима проветривания  $Q_{B1}$  по формуле (6);
- для найденных величин  $\tau_B = f(t)$  по графику (рис. 1) определяют параметр  $\bar{\zeta}_1$ ;
- определяют параметр  $\lambda$  по формуле (8);
- находят параметр  $\bar{\zeta}_2$  по номограмме (рис. 2) для заданного значения расстояния до сближенного пласта и значений  $\tau_B = f(t)$ ;
- вычисляют значения  $K_q$  и  $K_{Q_B}$  по формуле (9);
- вычисляют параметр  $\bar{\zeta}_3$  по формуле (3);
- находят параметр  $\zeta_B$  по формуле (4);
- по формуле (10) определяют объемную долю метана в вентиляционном штреке при измененном режиме проветривания на выходе из зоны активного проветривания выработанного пространства.

Некоторые исследования переходного газодинамического процесса проветривания лавы показали, что его длительность составляет всего 20...40 мин. Это намного меньше переходного процесса в выработанном пространстве, в связи с чем величину  $C_B(l_{л}, \infty)$  рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$C_B(l_{л}, \infty) = C_B(l_{л}, 0) \frac{Q_{B0}}{Q_{B1}}. \quad (11)$$

**Пример.** Рассчитать объемную долю метана в переходном режиме вентиляции и дегазации на вентиляционном штреке выемочного участка, если:  $l_{л} = 200$  м;  $Q_{B0} = 3$  м<sup>3</sup>/с;  $Q_{B1} = 0,5$  м<sup>3</sup>/с;  $q_{сн0} = 2,0$  м<sup>3</sup>/с;  $q_{сн1} = 0,5$  м<sup>3</sup>/с;  $l_{сн} = 30$  м;  $S_B = 50$  м<sup>2</sup>;  $C_B(l_{л}, 0) = 1,0$  %.

**Решение.**

1. Определим относительное время  $\tau_B = f(t)$  по формуле (6)

$$\tau_B = \frac{Q_{B1} t}{S_B l_{л}} = \frac{0,5 t}{50 \cdot 200} = 0,5 \cdot 10^{-4} t.$$

Таблица 1

Зависимость времени от критерия гомохронности  $\tau_B$

$t, c$	7200	14400	21600	28800	36000	43200	50400
$\tau_B$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16	2,50

2. Находим параметр  $\bar{\zeta}_1$  по графику (рис. 1) для значений  $\tau_B$ .

Таблица 2

Зависимость параметра  $\bar{\zeta}_1$  от критерия гомохронности  $\tau_b$ 

$\tau_b$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16	2,50
$\bar{\zeta}_1$	0,33	0,55	0,69	0,78	0,84	0,88	0,91

3. По графику (рис. 2) находим параметр  $\bar{\zeta}_2$  для величины  $l_{\text{сн}} = 30$  м и различных величин  $\tau_b$ .

Таблица 3

Зависимость параметра  $\bar{\zeta}_2$  от критерия гомохронности  $\tau_b$ 

$\tau_b$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16	2,50
$\bar{\zeta}_2$	0,28	0,38	0,4	0,39	0,38	0,36	0,34

4. Определяем значения  $K_q$  и  $K_{Q_b}$  по формуле (9)

$$K_q = \frac{q_{\text{сн1}}}{q_{\text{сн0}}} = \frac{0,8}{2} = 0,4; \quad K_{Q_b} = \frac{Q_{b1}}{Q_{b0}} = \frac{0,5}{3} = 0,17.$$

5. Вычисляем параметр  $\bar{\zeta}_3$  по формуле (3)

$$\bar{\zeta}_3 = -\frac{K_q - 1}{K_q - K_{Q_b}} = \frac{0,25 - 1}{0,4 - 0,17} = -2,57.$$

6. Находим параметр  $\zeta_b$  по формуле (4).

Таблица 4

Зависимость параметра  $\zeta_b$  от критерия гомохронности  $\tau_b$ 

$\tau_b$	0,36	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16	2,50
$\zeta_b$	1,06	1,53	1,72	1,79	1,81	1,81	1,79

7. Определяем объемную долю метана в вентиляционном штреке на выходе из зоны активного проветривания по формуле (10)

Таблица 5

Зависимость объемной доли метана от времени обесточивания шахты

$t, \text{с}$	7200	14400	21600	28800	36000	43200	50400
$C_b(l_{\text{п}}, t), \%$	5,58	7,62	8,45	8,77	8,86	8,83	8,75

Изобразим распределение объемной доли метана на выемочном участке при нарушении режима проветривания и дегазации в виде графика (рис. 3)

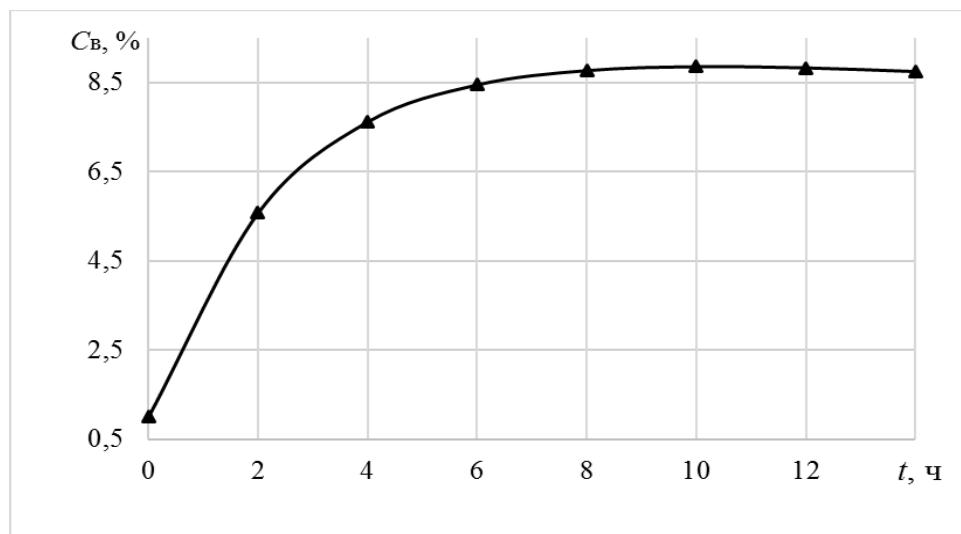


Рис. 3. Прогнозирование газовой обстановки в выемочном участке при изменении режимов проветривания и дегазации

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Выполнен анализ теоретического расчета переходных газодинамических процессов, происходящих в выработанном пространстве участка при обесточивании шахт. Построены графические зависимости относительных объемных долей метана от характерных критериев подобия. Разработан инженерный метод расчета оценки газовой обстановки на выемочных участках шахт при изменении режимов проветривания и дегазации, который в дальнейшем планируется апробировать в условиях аварийных ситуаций с общим обесточиванием шахт.

#### Список литературы / References

1. Пашковский, П. С. Управление дегазацией на выемочных участках угольной шахты в нормальных и аварийных условиях / П. С. Пашковский, А. Л. Иванников // Горноспасательное дело : сборник научных трудов. – Донецк : НИИГД «Респиратор», 2013. – Вып. 50. – С. 16 – 25.

Pashkovskiy P. S., Ivannikov A. L. *Upravleniye degazatsiye na vyemochnykh uchastkakh ugolnoy shakhty v normalnykh i avariynykh usloviyakh* [Control over degassing in coal mine working areas under normal and emergency conditions]. *Gornospasatelnoye delo : sbornik nauchnykh trudov*. Donetsk, NIIGD “Respirator” Publ., issue 50, pp. 16-25. (In Russian)

2. Румянцева, В. А. Прогнозирование переходных газовых режимов посредством применения переходной характеристики выработанного пространства / В. А. Румянцева, П. Н. Танцов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 1. – С. 340 – 346.

Rumyantseva V. A., Tantsov P. N. *Prognozirovaniye perekhodnykh gazovykh rezhimov posredstvom primeneniya perekhodnoy kharakteristiki vyrabotannogo prostranstva* [Prediction of transient gas modes applying transient characteristic of mined-out space]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 1, pp. 340-346. (In Russian)

3. Воронов, П. С. Интенсивность изменения метановыделения на выемочных участках при отключении систем дегазации / П. С. Воронов, Н. В. Карнаух, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2017. – № 4(54). – С. 60 – 69.

Voronov P. S., Karnaukh N. V., Mavrodi A. V. *Intensivnost izmeneniya metanovydeleniya na vyemochnykh uchastkakh pri otklyuchenii sistem degazatsii* [Methane emission rate in working areas in case of degassing systems shutdown]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Donetsk, 2017, no. 4(54), pp. 60-69. (In Russian)

4. Греков, С. П. Моделирование переходных газодинамических процессов на добычных участках при изменениях режимов дегазации и вентиляции / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, А. Л. Иванников // Вісник Харківського національного університету. – 2011. – № 960. – С. 95 – 103.

Grekov S. P., Zinchenko I. N., Ivannikov A. L. *Modelirovaniye perekhodnykh gazodinamicheskikh protsessov na dobychnykh uchastkakh pri izmenenii rezhimov degazatsii i ventilyatsii* [Simulation of transient gas-dynamic processes at winning areas during degassing and ventilation modes change]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu*, 2011, no. 960, pp. 95-103. (In Russian)

5. Агеев, В. Г. Математическая модель газодинамических процессов при техногенных авариях в шахтах вследствие их обесточивания / В. Г. Агеев, С. П. Греков, А. В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2022. – № 2(59). – С. 47 – 57.

Ageyev V. G., Grekov S. P., Mavrodi A. V. *Matematicheskaya model gazodinamicheskikh protsessov pri tekhnogennykh avariyakh v shakhtakh vsledstviye ikh obestochivaniya* [Mathematical model of gas-dynamic processes proceeding during technogenic accidents in mines caused by power failure]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2022, no. 2(59), pp. 47-57. (In Russian)

6. Лискова, М. Ю. Движение газоздушных смесей по выработанным пространствам / М. Ю. Лискова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 7. – С. 131 – 136.

Liskova M. Yu. *Dvizheniye gazovozdushnykh smesey po vyrabotannym prostranstvam* [Motion of gas-and-air mixes along mined-out spaces]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 7, pp. 131-136. (In Russian)

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;*  
*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;*  
*Aleksandr Viktorovich Mavrodi, scientific associate; e-mail: mavrodi-av@mail.ru*  
*State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”*  
*of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,*  
*Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”*  
*238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-34*

## **ENGINEERING METHOD FOR CALCULATING TRANSIENT GAS-DYNAMIC PROCESSES IN WORKING AREAS OF MINES DURING BLACKOUT**

**Purpose.** To develop an engineering method for calculating the transient gas-dynamic processes in the working areas of mines proceeding during variation of ventilation and degassing modes for real-time prediction of gas conditions.

**Methods.** Analysis of theoretical solutions of transient gas-dynamic processes in the working areas of mines and development of nomograms for on-line computations.

**Results.** The mathematical dependences for determination of methane volume ratio in the working area of the mine in case of man-made emergency have been derived.

**Scientific novelty.** The novel method for calculating the gas conditions in the working area during total blackout in the mine has been proposed.

**Practical value.** The developed method of calculation will allow for the mine-rescue service workers to calculate and to predict promptly without a personal computer aid the gas conditions in the accident working area in case of mining enterprise blackout.

**Keywords:** *working area; longwall face; mined-out space; methane; ventilation; degassing; adjacent coal seam; transient gas-dynamic process; nomogram; method of calculation.*

**УДК 622.822.225**

*Ирина Геннадиевна Старикова, канд. техн. наук; e-mail: ir-starik@yandex.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-18*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ УГЛЯ В ОКРУЖАЮЩИЕ СРЕДЫ**

**Цель.** Установить зависимость коэффициента теплоотдачи от теплообмена с окружающей средой для повышения достоверности оценки самовозгорания угля.

**Методы.** Используются методы физического и математического моделирования, современные методы асимптотического и численного анализа уравнений в частных производных, описывающих тепло- и массоперенос в горных выработках, проводились адекватные физические эксперименты на стандартном теплофизическом оборудовании для установления условий зарождения и развития очагов самовозгорания.

**Результаты.** Определены коэффициенты теплоотдачи от угля и породы в окружающие среды.

**Научная новизна.** Впервые разработан метод получения коэффициента теплоотдачи от угля в воздух и вмещающие породы с учетом теплоемкости и фракции угля и породы, позволяющий повысить достоверность оценки вероятности самовозгорания угля.

**Практическая значимость.** Полученные коэффициенты теплоотдачи можно применять при разработке мероприятий по предупреждению самовозгорания угля.

**Ключевые слова:** *уголь; коэффициент теплоотдачи; тепловой поток; температура; теплоемкость.*

**Постановка проблемы.** В практике тепловых исследований [1 – 6] твердых тел тепловой поток и коэффициент теплоотдачи с поверхности, как правило, вычисляют по результатам тепловизионной съемки. Для этого используют приближенные величины или значения этих параметров, измеряемые при помощи других приборов – термопар, преобразователей теплового потока. Последние дают более точный результат, но их применение связано с большим количеством неудобств, таких как длительность обследования, ограниченный диапазон измерений, погрешность приборов, зависящая от внешних условий. Использование преобразователей теплового потока особенно емко по времени, так как длительность измерений зависит от тепловой энергии исследуемой поверхности (до 15 сут).

**Анализ последних публикаций.** Наиболее корректен способ определения коэффициента теплоотдачи твердых тел, основанный на методе регулярного теплового режима, по которому образец (пластина, цилиндр, шар) равномерно нагревают до определенной температуры, затем погружают в среду с другой постоянной температурой и измеряют, насколько изменилась температура поверхности образца с течением времени. Проанализировав эти измерения, определяют температуру его охлаждения, а затем по известным формулам вычисляют коэффициент теплоотдачи. У этого способа есть недостатки.

Поскольку образец перед исследованием необходимо нагреть и изучить его поведение в среде с другой температурой (необходимо, чтобы разность температур составляла 10...20 °С), требуется иметь две нагревательные камеры с термостатирующими устройствами. Во время переноса образца в исследуемую среду нарушается равномерное распределение температуры – изменяется режим движения окружающей его среды, что может искажать результаты опыта. Отмеченные недостатки усложняют проведение испытания и снижают его точность.

Для исключения ряда недостатков, присущих существующим методам определения коэффициентов теплоотдачи, в ГБУ «Институт физики горных процессов» обоснован и апробирован ускоренный метод оценки коэффициентов теплоотдачи углей и горных пород, который учитывает кинетику температуры охлаждения предварительно нагретых образцов угля и породы. В нем использованы скорректированные применительно к условиям измерений и нагревательным устройствам формулы теории теплопроводности, определены коэффициенты теплоотдачи: уголь – воздух ( $\alpha_y$ ), порода – воздух ( $\alpha_n$ ), уголь – порода ( $\alpha_{yn}$ ). В качестве нагревательного устройства использовали электронные весы-влажномеры серии АОЗ (термовесы).

**Цель исследования** – установить зависимость коэффициента теплоотдачи от теплообмена с окружающей средой для повышения достоверности оценки самовозгорания угля.

**Изложение основного материала.** Для определения коэффициента теплоотдачи рассмотрим отдельные процессы охлаждения угля, породы и угля с породой. Первый процесс – охлаждение угля. Уголь состоит из отдельных гранул. В рассматриваемом случае фракция угля составляет 0,4...0,5 мм. Охлаждение отдельных гранул происходит независимо друг от друга, поэтому рассмотрим охлаждение отдельной гранулы. Для определенности считаем, что гранула угля имеет сферическую форму, изменением температуры внутри гранулы пренебрегаем.

Процесс охлаждения согласно гипотезе Ньютона определяется коэффициентом теплоотдачи от угля в окружающую среду (воздух). Поток тепла  $\gamma$  из угля в воздух составит

$$\gamma = \alpha_y(T - T_e)S_0,$$

где  $\alpha_y$  – коэффициент теплоотдачи из угля в воздух, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T$  – текущая температура угля, К;

$T_e$  – температура окружающей среды, К;

$S_0$  – площадь поверхности угля, м<sup>2</sup>.

Количество тепла  $Q$ , выходящее из угля за интервал  $dt$ , равно

$$dQ = \alpha_y(T - T_e)S_0 dt.$$

Следовательно, изменение температуры за тот же временной интервал составит

$$dT = \frac{\alpha_y (T - T_0) S_0 dt}{C_V V},$$

где  $C_V$  – удельная теплоемкость угля в расчете на единицу объема, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $V$  – объем угольной гранулы, м<sup>3</sup>.

Получили дифференциальное уравнение для температуры

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha_y (T - T_e) S_0}{C_V V}.$$

Для гранулы кубической формы это уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d(T - T_e)}{dt} = \frac{6\alpha_y (T - T_e) S_0 dt}{C_V h},$$

где  $h$  – размер фракции (ребро куба), м.

Решение этого уравнения описывается экспоненциальной функцией

$$T(t) - T_e = (T_0 - T_e) e^{-t/t_1},$$

где  $t_1 = \frac{hC_V}{6\alpha_y}$ .

График изменения температуры угля с течением времени приведен на рис. 1.

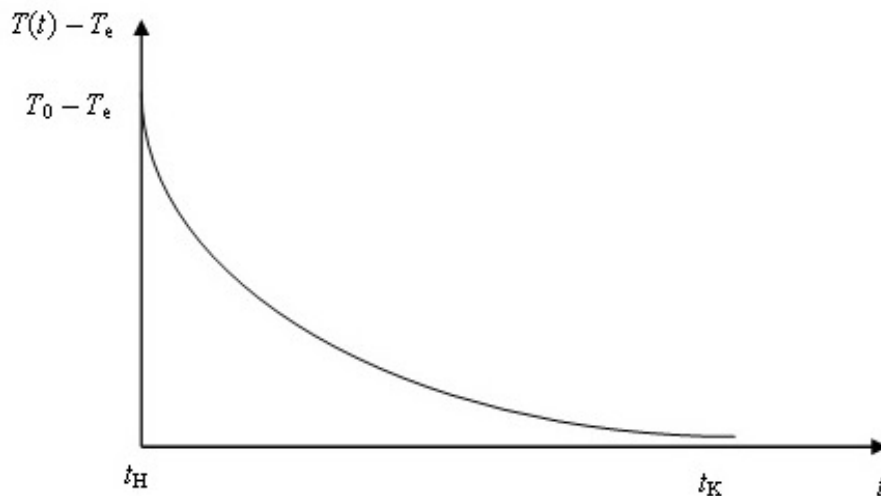


Рис. 1. Динамика кинетики охлаждения угольных фракций

Из анализа результатов получаем выражение для величины  $t_1$

$$t_1 = \frac{t_K - t_H}{\ln \frac{T(t_H) - T_e}{T(t_K) - T_e}}.$$

Зная  $t_1$  находим  $\alpha_y$  по формуле

$$\alpha_y = \frac{hC_V}{6t_1}.$$

Формулу для  $\alpha_n$  получаем аналогичным способом с заменой  $h$  на  $l$ .

Второй процесс – охлаждение угольной и породной пластин.

Рассмотрим процесс охлаждения пластин для определения коэффициента теплоотдачи из угля в породу, представив его на схеме экспериментального определения  $\alpha_{yn}$  (рис. 2).

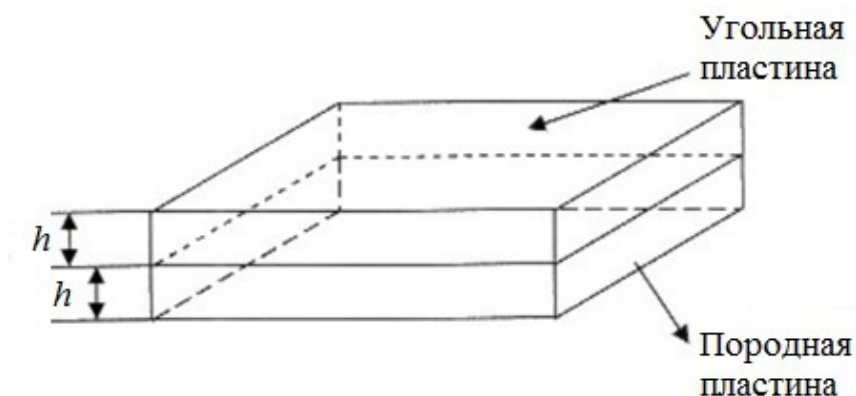


Рис. 2. Схема расположения образцов угля и породы

Имеются две пластины одинаковой толщины  $h$ , одна из угля, вторая из породы. Температуру угольной пластины обозначим  $T_y$ , температуру породной пластинки  $T_n$ . Температуры угля и породы считаем одинаковыми. Образцы угля и породы охлаждают на воздухе. Сначала образец нагревают до заданной температуры, а затем отключают нагреватель, образец охлаждается на воздухе до температуры окружающей среды  $T_e$ . Выражения для тепловых потоков от пластин угля и породы имеют вид

$$dQ_y = -\alpha_y(T_y - T_e)Sdt - \alpha_y(T_y - T_n)Sdt, \quad (1)$$

$$dQ_n = -\alpha_n(T_n - T_e)Sdt - \alpha_{yn}(T_n - T_y)Sdt, \quad (2)$$

где  $\alpha_y, \alpha_n$  – коэффициенты теплоотдачи из угля и породы в воздух, Вт/(м<sup>2</sup>·К), соответственно;

$\alpha_{yn}$  – коэффициент теплоотдачи из угля в породу, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S$  – площадь поверхности теплового контакта, м<sup>2</sup>.

Теплоотдачей из торцевых поверхностей пренебрегаем.

Соответствующие изменения температуры описывают системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{dT_y}{dt} = -\frac{1}{C_y h} [\alpha_y (T_y - T_e) + \alpha_{yn} (T_y - T_n)]; \\ \frac{dT_n}{dt} = -\frac{1}{C_n h} [\alpha_n (T_n - T_e) + \alpha_{yn} (T_n - T_y)], \end{cases} \quad (3)$$

где  $C_y, C_n$  – удельная теплоемкость угля и породы (в расчете на единицу объема), Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Введем обозначения  $T_y - T_e = \tilde{T}_y, T_n - T_e = \tilde{T}_n$  в систему уравнений (3), получим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{T}_y}{dt} = -\frac{1}{C_y h} [\alpha_y \tilde{T}_y + \alpha_{yn} (\tilde{T}_y - \tilde{T}_n)]; \\ \frac{d\tilde{T}_n}{dt} = -\frac{1}{C_n h} [\alpha_n \tilde{T}_n + \alpha_{yn} (\tilde{T}_n - \tilde{T}_y)]. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку  $C_y \approx C_n$ , то при решении системы уравнений (4) можно считать их равными. Считаем, что коэффициенты теплоотдачи в воздух из угля и породы одинаковы:  $\alpha_y = \alpha_n = \alpha$ .

Введем также обозначения

$$\beta = \frac{\alpha_y}{C_y h}; \quad \beta_{yn} = \frac{\alpha_{yn}}{C_y h}.$$

При сделанных предположениях система уравнений (4) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{T}_y}{dt} = -(\beta + \beta_{yn}) \tilde{T}_y + \beta_{yn} \tilde{T}_n; \\ \frac{d\tilde{T}_n}{dt} = \beta_{yn} \tilde{T}_y - (\beta + \beta_{yn}) \tilde{T}_n. \end{cases} \quad (5)$$

Решение этой системы найдем следующим образом:

$$\tilde{T}_y = A_y e^{\lambda t};$$

$$\tilde{T}_n = A_n e^{\lambda t}.$$

Тогда для  $A_y$  и  $A_n$  получаем систему линейных уравнений

$$\begin{cases} A_y \lambda = -(\beta + \beta_{yn}) A_y + \beta_{yn} A_n; \\ A_n \lambda = \beta_{yn} A_y - (\beta + \beta_{yn}) A_n. \end{cases} \quad (7)$$

Система однородных уравнений имеет нетривиальное решение, если ее детерминант равен нулю

$$\begin{vmatrix} -(\beta + \beta_{yn} + \lambda) & \beta_{yn} \\ \beta_{yn} & -(\beta + \beta_{yn} + \lambda) \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Тогда из системы (7) получаем следующие уравнения:

$$\lambda_1 = -\beta;$$

$$\lambda_2 = -\beta - 2\beta_{yn}.$$

Коэффициент  $\lambda$  имеет два значения. Это показывает, что процесс охлаждения характеризуется двумя видами времени: «длинное»  $t_1$  и «короткое»  $t_2$ .

$$t_1 = \frac{1}{\lambda_1}; \quad t_2 = \frac{1}{\lambda_2}.$$

$$\alpha_{yn} = \frac{RC_V - \alpha_y t_{yn}}{2t_{yn}}.$$

«Длинное» время характеризует процесс охлаждения составного образца в воздух, а «короткое» характеризует теплопередачу из угля в породу.

Определяя экспериментально оба вида времени, рассчитаем коэффициент теплоотдачи из угля в воздух и в породу по приведенным выше формулам.

Результаты расчетов при  $C_y \approx C_n$  приведены в таблице 1, при  $C_y \neq C_n$  – в таблице 2.

Таблица 1

Коэффициент теплоотдачи при  $C_y \approx C_{\Pi}$ 

Шахта	$t_1, \text{с}$	$\alpha_{y^2}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Уголь – глинистый сланец		Уголь – песчаник	
			$\alpha_{y_{\text{уп}}}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_2, \text{с}$	$\alpha_{y_{\text{уп}}}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_2, \text{с}$
Шахта им. А.Ф. Засядько	1228	0,085	0,46	624	0,45	582
Шахта «Щегловская- Глубокая»	1448	0,072	0,47	646	0,43	300
Шахта «Коммунарская»	1073	0,097	0,47	972	0,43	450

Таблица 2

Коэффициент теплоотдачи при  $C_y \neq C_{\Pi}$ 

Шахта	Уголь – глинистый сланец		Уголь – песчаник	
	$\alpha_{y_{\text{уп}}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_2, \text{с}$	$\alpha_{y_{\text{уп}}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$t_2, \text{с}$
Шахта им. А.Ф. Засядько	0,58	624	0,55	582
Шахта «Щегловская- Глубокая»	0,56	646	1,12	300
Шахта «Коммунарская»	0,35	972	0,72	450

**Выводы.** На основе методов физического и математического моделирования установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от размеров образцов угля и породы и от теплоемкости для повышения достоверности оценки самовозгорания угля.

Предложен метод определения коэффициентов теплоотдачи от угля и породы в воздух, а также от угля в породу с использованием стандартного физического оборудования.

#### Список литературы / References

1. Склонность углей к низкотемпературному окислению и мониторинг эндогенной пожароопасности шахт / М. В. Грязев, Н. М. Качурин, Е. И. Захаров и др. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 4. – С. 109 – 120.

Gryazev M. V., Kachurin N. M., Zakharov Ye. I., Volberg A. V. *Sklonnost ugley k nizkoterperaturnomu okisleniyu i monitoring endogennoy pozharoopasnosti shakht* [Low-temperature oxidation ability of coal and monitoring of spontaneous fire hazard of mines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2017, no. 4, pp. 109-120. (In Russian)

2. Захаров, Е.И. Оценка опасности самовозгорания угля на ранней стадии процесса низкотемпературного окисления / Е. И. Захаров, Д. Д. Малахова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – С. 22 – 30.

Zakharov Ye. I., Malakhova D. D. *Otsenka opasnosti samovozgoraniya uglya na ranney stadii protsessa nizkoterperaturnogo okisleniya* [Assessment of coal spontaneous combustion hazard at the early stage of low-temperature oxidation process]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 1, pp. 22-30. (In Russian)

3. Риск самовозгорания угля и опасность эндогенных пожаров на шахтах Кузбасса / Г. В. Стась, А. В. Волберг, Е. В. Смирнова и др. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 3. – С. 93 – 103.

Stas G. V., Volberg A. V., Smirnova Ye. V., Ganin M. P. *Risk samovozgoraniya uglya i opasnost endogennykh pozharov na shakhtakh Kuzbassa* [Coal spontaneous combustion risk and hazard of spontaneous fires in mines of Kuznetsk basin]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2017, no. 3, pp. 93-30. (In Russian)

4. Захаров, Е. И. Механизм процесса самонагревания угля и перехода его в самовозгорание / Е. И. Захаров, Н. М. Качурин, Д. Д. Малахова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 42 – 51.

Zakharov Ye. I., Kachurin N. M., Malakhova D. D. *Mekhanizm protsesssa samonagrevaniya uglya i perekhoda yego v samovozgoraniye* [Mechanism of coal spontaneous heating process and its transition into spontaneous combustion]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2013, no. 2, pp. 42-51. (In Russian)

5. Панов, Б. С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б. С. Панов, Ю. А. Проскурня // Геология угольных месторождений (Межвузовский тематический научный сборник). – Екатеринбург, 2002. – С. 274 – 281.

Panov B. S., Proskurnya Yu. A. *Model samovozgoraniya porodnykh otvalov ugolnykh shakht Donbassa* [Model of spontaneous combustion of rock-disposal dump of Donets basin coal mines]. *Geologiya ugolnykh mestorozhdeniy (Mezhvuzovskiy tematicheskii nauchnyy sbornik)*. Yekaterinburg, 2002, pp. 274-281. (In Russian)

6. Эпштейн, С. А. Методы оценки склонности углей к окислению и самовозгоранию / С. А. Эпштейн, М. А. Монгуш, В. Г. Нестерова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 12. – С. 211 – 216.

Epshteyn S. A., Mongush M. A., Nesterova V. G. *Metody otsenki sklonnosti ugley k okisleniyu i samovozgoraniyu* [Methods of assessment of coal ability to oxidation and spontaneous combustion]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, no. 12, pp. 211-216. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С. П. Грековым  
Дата поступления рукописи 23.11.2022

*Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.); e-mail: ir-starik@yandex.ru*  
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”  
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”  
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-18

## DETERMINATION OF COEFFICIENTS OF HEAT TRANSFER FROM COAL TO AMBIENT MEDIA

**Purpose.** To establish a dependence of the heat transfer coefficient on the heat exchange with the ambient medium for improving the accuracy of assessment of coal spontaneous combustion risk.

**Methods.** The methods of physical and mathematical modeling, contemporary methods of asymptotic and numerical analysis of equations in partial derivatives describing heat and mass transfer in the mine workings have been applied, the valid physical experiments have been conducted on the standard thermophysical equipment for determining the conditions for origin and development of the places of spontaneous combustion.

**Results.** The heat transfer coefficients from coal and rock fractions into the ambient media have been determined.

**Scientific novelty.** The novel method has been developed for deriving the coefficient of heat transfer from coal into mine air and adjacent strata facilitating improvement of the accuracy of assessment of the coal spontaneous combustion risk.

**Practical value.** The derived heat transfer coefficients may be applied in development of the preventive measures against the coal spontaneous combustion.

**Keywords:** coal; heat transfer coefficient; heat flux; temperature; heat capacity.

**УДК 621.311.1.019.3**

*Александр Петрович Ковалев, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: abrecap@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

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

*Любовь Ивановна Колесник, канд. техн. наук, доц.; e-mail: lyu2630@yandex.ru*

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования*

*«Донецкий национальный университет»*

*283001, Донецк, ул. Университетская, 24. Тел.: (+7 856) 379-19-20*

## **ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПО СТРУКТУРЕ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ НАДЕЖНОСТИ И ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ**

**Цель.** Разработать метод составления расчетных схем минимальных сечений для оценки надежности и пожаробезопасности узлов нагрузки, используя сложную по структуре принципиальную схему электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях.

**Методы.** Метод подобия: сложная по структуре схема замещается простой схемой электроснабжения, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях. Для оценки ее надежности и пожаробезопасности узлов нагрузки она представлена в виде двух простых расчетных схем минимальных сечений, элементы которых могут находиться в двух несовместных состояниях.

**Результаты.** Разработан инженерный метод составления простых расчетных схем замещения сложных по структуре схем электроснабжения, что позволит оценивать их надежность и пожаробезопасность, используя расчетные формулы для приведения структур к одному эквивалентному элементу.

**Научная новизна.** Впервые разработан метод получения расчетных схем замещения для оценки надежности и пожаробезопасности сложных по структуре схем электроснабжения. Установлены новые аналитические зависимости, которые характеризуют надежность и пожаробезопасность ее узлов нагрузки.

**Практическая значимость.** Получен простой в использовании инженерный метод оценки надежности сложных по структуре схем электроснабжения и пожаробезопасности ее узлов нагрузки, в которых каждый элемент сложных по структуре схем электроснабжения может находиться в трех несовместных состояниях. При отказе элемент обнаруживают и восстанавливают его работоспособность за конечный промежуток времени.

**Ключевые слова:** *сложная по структуре схема замещения; надежность; пожаробезопасность; обрыв цепи; короткое замыкание; отказ в срабатывании.*

**Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.** Задана принципиальная сложная по структуре схема замещения действующей схемы электроснабжения (далее – СЭС), элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ типа «обрыв цепи», неработоспособном – отказ типа «короткое замыкание». Поток отказов и восстановлений элементов системы – простейшие. Пропускная способность

элементов не ограничена, так же как и способность сдерживать поток энергии независимо от количества короткозамкнутых элементов. Если выходит из строя элемент СЭС, его обнаруживают и восстанавливают его работоспособность (ремонтируют или заменяют новым) за конечный промежуток времени. Предполагается, что после обнаружения и восстановления вышедшего из строя элемента СЭС его характеристики надежности остаются такими же, какими они были до повреждения. Каждый элемент схемы замещения СЭС характеризуется следующими параметрами:  $\lambda_{0i}$  – интенсивность аварийного отключения  $i$ -го элемента системы (отказ типа «обрыв цепи»);  $\mu_{0i}$  – интенсивность обнаружения и введения в работу  $i$ -го аварийно отключившегося элемента системы;  $\lambda_{si}$  – интенсивность появления отказов («короткое замыкание» в  $i$ -м элементе системы);  $\mu_{si}$  – интенсивность выявления отказов  $i$ -го элемента («короткое замыкание»), его устранение и введение в работу. Индексы «0» и «s» указывают на то, что учитываются повреждения  $i$ -го элемента принципиальной схемы замещения СЭС, которые приводят к отказам типа «обрыв цепи» либо «короткое замыкание» соответственно.

В принципиальной схеме замещения выделены «вход»  $A_0$  и «выход»  $A_k$  ( $k$  – номер узла в схеме замещения).

Необходимо определить:

- $P(\tau)$  – вероятность того, что в течение времени  $\tau$  не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или проходит не отключаемый защитой сквозной аварийный ток между узлами «входа» и «выхода» принципиальной схемы замещения СЭС, если в начальный момент времени все элементы СЭС находились в работоспособном состоянии;
- $q_0(\tau)$  – вероятность того, что в течение времени  $\tau$  произойдет такое случайное событие, в результате которого будет прервана связь между узлами «вход» и «выход» схемы замещения СЭС;
- $q_s(\tau)$  – вероятность того, что в течение времени  $\tau$  произойдет такое случайное событие, в результате которого через узлы «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной, неотключаемый защитой аварийный ток.

Поставленная задача актуальна, так как ее решение позволит ответить на следующие вопросы:

- соответствует ли спроектированная СЭС всем требованиям надежности, предъявляемым заказчиком проекта?
- соответствует ли пожаробезопасность узлов нагрузки современным требованиям?
- в течение какого срока СЭС будет эксплуатироваться безотказно и пожаробезопасно?

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для оценки надежности и пожаробезопасности простых систем, у которых элементы могут находиться в трех несовместных состояниях, известны формулы, которые позволяют эти системы приводить к одному эквивалентному по надежности элементу [1 – 4].

Для структурно сложных схем замещения СЭС получить эквивалентный ей по надежности элемент, используя эти формулы, не представляется возможным. Следует предварительно преобразовать принципиальную сложную по структуре схему таким образом, чтобы она состояла из двух простых.

**Цель исследования** – разработать метод составления расчетных схем минимальных сечений для оценки надежности и пожаробезопасности узлов нагрузки, используя сложную по структуре принципиальную схему электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях.

**Результаты исследований.** Сложную по структуре схему замещения СЭС с учетом двух несовместных типов отказов элементов «обрыв цепи» и «короткое замыкание» возможно заменить двумя эквивалентными по надежности простыми схемами [5], используя понятия «сечение» и «минимальное сечение».

Под повреждением сложной по структуре схемы замещения СЭС при учете отказов ее элементов типа «обрыв цепи» будем понимать появление такого случайного события, в результате которого прерывается связь между ее узлами «вход» и «выход» (между источником энергоснабжения и его потребителями).

Сечением  $S$  схемы замещения СЭС считаем совокупность элементов, выход из строя которых (отказ типа «обрыв цепи») приводит к разрыву связи между узлами «вход» и «выход».

Под минимальным сечением  $S_{\min}$  схемы замещения сложной по структуре системы понимаем сечение, у которого хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа «обрыв цепи» оставшихся элементов не будут более составлять сечение, так как при этом не происходит разрыва связи между узлами «вход» и «выход».

Повреждением сложной по структуре схемы замещения СЭС при учете отказов ее элементов типа «короткое замыкание» будем считать появление такого случайного события, в результате которого между узлами «вход» и «выход» схемы замещения СЭС протекает неотключаемый средствами защиты сквозной аварийный ток.

Сечением  $\tilde{S}$  сложной по структуре схемы замещения СЭС считаем совокупность элементов, выход из строя которых (учитываются отказы элементов типа «короткое замыкание») приводит к тому, что между ее узлами «вход» и «выход» протекает неотключаемый средствами защиты сквозной аварийный ток.

Под минимальным сечением  $\tilde{S}_{\min}$  сложной по структуре схемы замещения СЭС подразумеваем сечение, у которого хотя бы один элемент оказался абсолютно надежным, в результате чего отказы типа «короткое замыкание» оставшихся элементов уже не будут более составлять сечение, так как при этом не протекает сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход».

Исходными данными для построения схем минимальных сечений служит сложная по структуре принципиальная схема замещения СЭС с указанием

всех ее узлов: узел «вход» –  $A$  и узлы «выход» –  $A_i$ , ( $i = \overline{1, k}$ ). Задают номера всех элементов, которые соединяют узлы между собой; каждый элемент схемы замещения СЭС характеризуется параметрами:  $\lambda_{0i}$ ,  $\mu_{0i}$ ,  $\lambda_{si}$ ,  $\mu_{si}$ , ( $i = \overline{1, n}$ ).

Для построения первой схемы замещения, в которой учтены отказы элементов типа «обрыв цепи», заполняют таблицу 1.

Таблица 1

Алгоритм получения минимальных сечений  
при учете отказов элементов схемы замещения типа «обрыв цепи»

№ строки	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
	1	2	3	4
1				
2				
...				
$n$				

- В столбец 1 строки 1 ставят символ «А» – узел, который обозначает «вход» в схеме замещения.

- В столбец 2 строки 1 записывают номера элементов схемы замещения СЭС, непосредственно связанных с узлом А.

- В столбец 3 записывают эти же номера элементов схемы замещения, которые и являются «сечениями»; полученное сечение минимально по определению, и поэтому его заносят в столбец 4.

- В столбец 1 строки 2 ставят узлы  $A$  и  $A_j$ , которые соединяют между собой элементом с номером  $j$ , ( $j = \overline{1, n}$ ), где  $n$  – число элементов в схеме замещения, непосредственно связанных с узлом А.

- В столбец 2 ставят столбец, который состоит из двух строк, в верхнюю строку записывают номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом А, а в строку 2 записывают номера элементов, которые непосредственно соединяют узел  $A_j$  с другими узлами.

- Одинаковые номера элементов схемы замещения, которые входят в строки 1 и 2, вычеркивают и получают сечение, которое заносят в столбец 3, затем его анализируют: если полученное сечение минимально по структуре – то его заносят в столбец 4, если нет – то столбец 4 не заполняют, это означает, что такого минимального сечения не существует.

- После установления всех связей между узлами А и  $A_i$  и построения минимальных сечений к этой группе прибавляют узел  $A_i$ , ( $i = \overline{1, n}$ ), который через элемент  $j$  схемы замещения связан с узлом  $A_j$  или связан элементом с узлом А (имеет место при числе элементов, непосредственно связанных с А,  $n \geq 3$ ), и процедура получения минимального сечения повторяется, то есть в столбец 1 заносят узлы А,  $A_i$ ,  $A_j$ .

- Столбец 2 состоит из трех строк. В строку 1 записывают номера элементов схемы замещения, которые соединяются с узлом  $A$ , а во вторую – элементы, которые соединяются с узлом  $A_j$ , и в третью – элементы, которые соединяются с узлом  $A_i$ .

- Четное число одинаковых номеров, которые входят в разные строки, вычеркивают. Полученное сечение записывают в столбец 3, анализируют, и если оно минимально по структуре, его записывают в столбец 4.

- Описанную выше процедуру получения минимальных сечений повторяют до тех пор, пока в столбец 1 не будут внесены все узлы схемы замещения, кроме последнего, который обозначает «выход». Затем составляют столбцы из строк, каждая из которых состоит из номеров элементов, которые соединяются с данным узлом.

- Вычеркивают четное число номеров элементов схемы замещения, которые записаны в разные строки, и получают последнее минимальное сечение.

- Номера элементов каждой строки столбца 4 соответствуют определенному минимальному сечению, которое будет представлено в виде их параллельного соединения (отказ элементов данного минимального сечения приводит к тому, что связь между узлами «вход» и «выход» будет нарушена).

- Последовательное соединение минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки.

Далее находим  $\lambda_0$  – эквивалентную интенсивность того, что в сети произойдет событие, в результате которого будет прервана связь между узлами «вход» и «выход» схемы замещения СЭС, и  $\mu_0$  – эквивалентную интенсивность обнаружения поврежденных элементов СЭС (отказ типа «обрыв цепи»), их восстановление (замену) и возобновление электроснабжения потребителей.

Для получения схемы замещения минимальных сечений, учитывая отказы типа «короткое замыкание» ее элементов, следует заполнить таблицу 2 согласно следующим правилам.

Таблица 2

Алгоритм получения минимальных сечений  
при учете отказов элементов типа «короткое замыкание»

N строки	Минимальное число узлов между «входом» $A$ и «выходом» $A_n$	Элементы связи между узлами, $i$	Сечение	Минимальное сечение
	1	2	3	4
1				
2				
...				
$n$				

- В столбец 1 строки 1 заносят минимальное число узлов схемы замещения, начиная с  $A$  – узла «входа» и заканчивая узлом «выхода» –  $A_k$ , через которые может пройти сквозной аварийный ток.

- В столбец 2 строки 1 записывают номера элементов схемы замещения, которые соединяют между собой отдельные узлы, занесенные в столбец 1 строки 1.

- В столбец 3 строки 1 записывают номера элементов столбца 2 строки 1, повреждения которых приводят к тому, что через узлы А и А<sub>n</sub> пройдет сквозной аварийный ток, то есть получится сечение.

- Анализируем полученное сечение: если оно оказалось минимальным – то номера его элементов записывают в столбец 4 строки 1, а если нет – столбец 4 не заполняют, то есть такого минимального сечения не существует.

- После того как получили первое минимальное сечение, процедуру повторяют до тех пор, пока не будут перечислены все существующие в приведенной схеме замещения минимальные сечения.

- Каждое полученное минимальное сечение (табл. 2, столбец 4) представлено в виде последовательно соединенных элементов (номера элементов занесены в соответствующие строки столбца 4).

- Параллельное соединение всех полученных минимальных сечений позволяет получить расчетную схему для оценки пожаробезопасности узла нагрузки.

Используя параметры надежности элементов схемы замещения минимальных сечений  $\lambda_{si}$  и  $\mu_{si}$ , находим  $\lambda_s$  – эквивалентную интенсивность того, что в СЭС произойдет событие, в результате которого между входным и выходным узлами схемы ее замещения пройдет сквозной неотключаемый защитой аварийный ток;  $\mu_s$  – эквивалентную интенсивность обнаружения и восстановления поврежденных элементов.

Зная параметры надежности эквивалентных элементов схем замещения СЭС, минимальные сечения, то есть  $\lambda_0$ ,  $\mu_0$ ,  $\lambda_s$ ,  $\mu_s$ , и используя формулы, приведенные в работе [2], находим основные характеристики надежности и пожаробезопасности узла нагрузки:  $P(\tau)$ ,  $q_0(\tau)$ ,  $q_s(\tau)$ .

Применяя приведенную методику построения расчетных схем минимальных сечений для сложных по структуре восстанавливаемых СЭС и формулы, приведенные в работе [2], представляется возможным оценить надежность и ыпожаробезопасность ее узлов нагрузки.

*Пример.* На рис. 1а приведена принципиальная схема замещения сложной по структуре СЭС. Заданы параметры надежности элементов схемы замещения:  $\lambda_{0i}$ ,  $\mu_{0i}$ ,  $\lambda_{si}$ ,  $\mu_{si}$  ( $i = \overline{1,7}$ ) (табл. 3). Интервал времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата  $\theta = 730$  ч. Определить  $P(\tau)$  – вероятность того, что в течение времени  $\tau = 8760$  ч не произойдет такого случайного события, в результате которого разорвется связь или пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток между узлами «вход» (А) и «выход» (А<sub>4</sub>) схемы замещения (рис. 3а), а также  $q_0(8760)$ ,  $q_s(8760)$ .

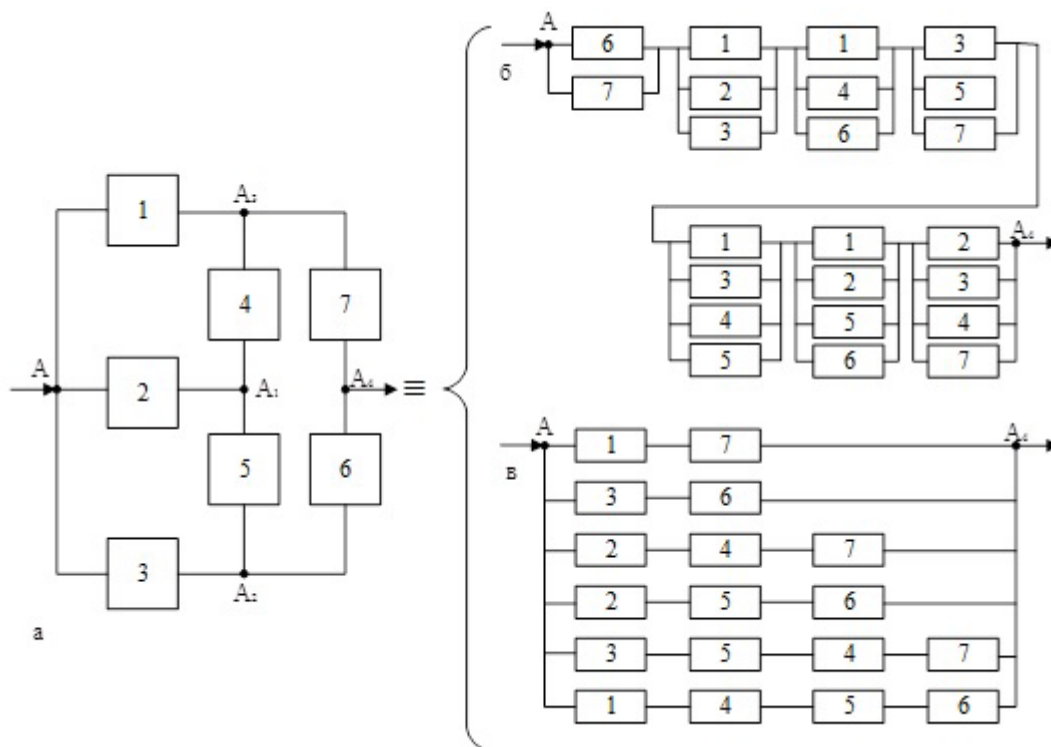


Рис. 1. Логическая схема замещения СЭС для оценки надежности электроснабжения и пожаробезопасности узла нагрузки  $A_4$ : а – принципиальная логическая схема замещения СЭС при учете двух типов несовместных отказов элементов; б – расчетная схема замещения СЭС минимальные сечения учитывает отказы элементов типа «обрыв цепи»; в – расчетная схема замещения минимальных сечений СЭС при учете отказов элементов типа «короткое замыкание»

Таблица 3

Параметры надежности элементов схемы замещения СЭС

$i$	$\lambda_{0i}$ , 1/ч	$\mu_{0i}$ , 1/ч	$\lambda_{si}$ , 1/ч	$\mu_{si}$ , 1/ч
	1	2	3	4
1	0,000185	0,52	0,000129	0,0291
2	0,000234	0,47	0,000281	0,0133
3	0,000152	0,57	0,000141	0,0156
4	0,000181	0,48	0,000182	0,0206
5	0,000176	0,53	0,000234	0,0160
6	0,000211	0,43	0,000285	0,0132
7	0,000191	0,46	0,000173	0,0220

*Решение.* Используя формулу  $\mu_{si} = \frac{2}{\lambda_{si}\theta^2}$ , исходные данные (табл. 3, столбец 3) и значение  $\theta = 730$  ч, находим  $\mu_{si}$ . Результаты расчета заносим в столбец 4 табл. 3. Используя принципиальную схему замещения СЭС (рис. 1а), описанный выше алгоритм построения расчетной схемы минимальных сечений, учитывая отказы элементов типа «обрыв цепи», заполняем табл. 4.

Таблица 4

Алгоритм получения минимальных сечений  
при учете отказов элементов типа «обрыв цепи» СЭС

$i$	Узел схемы замещения	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
	1	2	3	4
1	A	1, 2, 3	1.2.3	1.2.3
2	A+A <sub>1</sub>	1, 2, 3 2, 4, 5	1.3.4.5	1.3.4.5
3	A+A <sub>2</sub>	1, 2, 3 3, 5, 6	1.2.5.6	1.2.5.6
4	A+A <sub>3</sub>	1, 2, 3 1, 4, 7	2.3.4.7	2.3.4.7
5	AA <sub>1</sub> +A <sub>3</sub>	1, 3, 4, 5 1, 4, 7	3.5.7	3.5.7
6	AA <sub>1</sub> +A <sub>2</sub>	1, 3, 4, 5 3, 5, 6	1.4.6	1.4.6
7	AA <sub>2</sub> +A <sub>3</sub>	1, 2, 5, 6 1, 4, 7	2.4.5.6.7	-
8	AA <sub>1</sub> A <sub>3</sub> +A <sub>2</sub>	3, 5, 7 3, 5, 6	6.7	6.7

Сечение (2.4.5.6.7) не является минимальным, так как включает в себя уже минимальное сечение (6.7), поэтому столбец 4 в этом случае не заполнен.

Используя полученный столбец 4 табл. 4, строим расчетную схему минимальных сечений, располагая их, как показано на рисунке 1б.

Для получения схемы минимальных сечений (учитывая отказы элементов схемы типа «короткое замыкание»), используя схемы замещения (рис. 1а) и описанные выше правила, заполняем таблицу 5.

Таблица 5

Алгоритм получения «минимальных сечений»  
при учете отказов элементов схемы «короткое замыкание»

$i$	Узлы схемы, через которые проходит сквозной аварийный ток	Элементы связи между узлами	Сечение	Минимальное сечение
	1	2	3	4
1	A; A <sub>3</sub> ; A <sub>4</sub>	1.7	1.7	1.7
2	A; A <sub>2</sub> ; A <sub>4</sub>	3.6	3.6	3.6
3	A; A <sub>1</sub> ; A <sub>3</sub> ; A <sub>4</sub>	2.4.7	2.4.7	2.4.7
4	A; A <sub>1</sub> ; A <sub>2</sub> ; A <sub>4</sub>	2,5,6	2.5.6	2.5.6
5	A; A <sub>2</sub> ; A <sub>1</sub> ; A <sub>3</sub> ; A <sub>4</sub>	3.5.4.7	3.5.4.7	3.5.4.7
6	A; A <sub>3</sub> ; A <sub>1</sub> ; A <sub>2</sub> ; A <sub>4</sub>	1.4.5.6	1.4.5.6	1.4.5.6

Используя данные таблицы 5 (столбец 4), строим схему минимальных сечений с учетом отказов типа «короткое замыкание» в элементах сети (рис. 1в). Используя расчетные схемы замещения (рис. 1б,в) и формулы, приведенные в работах [1, 2], находим:

$$\lambda_0 = 1,81 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{ч}}; \mu_0 = 0,86 \frac{1}{\text{ч}}; \lambda_s = 5,62 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}; \mu_s = 0,0322 \frac{1}{\text{ч}},$$

а также  $P(8760) = 0,9998254$ ;  $q_0(8760) = 2 \cdot 10^{-7}$ ;  $q_s(8760) = 1,744 \cdot 10^{-4}$ .

Полученные результаты показывают, что узел нагрузки  $A_4$  СЭС соответствует требованиям надежности и пожарной безопасности.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Для сложных по структуре схем замещения восстанавливаемых систем электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, предложен инженерный метод построения двух простых по структуре схем замещения минимальных сечений. Первая учитывает отказы элементов сети типа «обрыв цепи», а вторая – отказы типа «короткое замыкание», что позволило оценить надежность и пожаробезопасность СЭС, используя известные формулы.

В дальнейших исследованиях необходимо разработать методику наблюдения за состоянием электрооборудования СЭС и определить статистические показатели  $\lambda_{0i}$ ,  $\mu_{0i}$ ,  $\lambda_{si}$ ,  $\mu_{si}$ , ( $i = \overline{1, n}$ ), где  $n$  – число единиц электрооборудования, за которым установлено наблюдение.

#### Список литературы / References

1. Ковалев, А. П. Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложной по структуре восстанавливаемой системы с учетом двух видов несовместных отказов электрооборудования / А. П. Ковалев // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2021. – № 2(58). – С. 78 – 89.

Kovalyov A. P. *Otsenka nadyozhnosti elektrosnabzheniya uzlov nagruzki slozhnoy po strukture vosstanavlivayemoy sistemy s uchyotom dvukh vidov nesovmestnykh отказов электрооборудованиya* [Assessment of power supply dependability of load nodes of structurally complex restorable system factoring in two types of incompatible discontinuities of electrical equipment]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskyy zhurnal*, 2021, no. 2(58), pp. 78-89. (In Russian)

2. Ковалев, А. П. Надежность защитных коммутационных аппаратов / А. П. Ковалев, В. В. Якимшина, О. А. Сапоненко // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2020. – № 2(57). – С. 96 – 106.

Kovalyov A. P., Yakimishina V. V., Saponenko O. A. *Nadyozhnost zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov* [Dependability of protection switching devices].

*Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal*, 2020, no. 2(57), pp. 96-106. (In Russian)

3. Смирнов, А. С. Анализ надежности структурно-сложных электрических систем с учетом двух типов отказов / А. С. Смирнов, Д. О. Гайдамович // *Электричество*. – 2011. – № 2. – С. 50 – 56.

Smirnov A. S., Gaydamovich D. O. *Analiz nadyozhnosti strukturno-slozhnykh elektricheskikh sistem s uchytom dvukh tipov otkazov* [Analysis of dependability of structurally complex electrical systems factoring in two types of discontinuities]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 2, pp. 50-56. (In Russian)

4. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2017. – 276 с.

Ryabinin I. A. *Nadyozhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh sistem* [Dependability and safety of structurally complex systems]. St. Petersburg, Saint Petersburg University Press, 2017, 276 p. (In Russian)

5. Ванеев, Б. Н. Эффективность мостиковых систем электроснабжения / Б. Н. Ванеев // *Взрывозащищенное электрооборудование : сборник научных трудов ГУ «НИИВЭ»*. – Донецк : ООО «Типография Восток Пресс», 2017. – № 1(52). – С. 119 – 126.

Vaneev B. N. *Effektivnost mostikovykh sistem elektrosnabzheniya* [Effectiveness of power supply bridge systems]. *Vzryvozashchishchyonnoye elektrooborudovaniye : sbornik nauchnykh trudov GU "NIIVE"*. Donetsk, ООО "Tipografiya Vostok Press", 2017, no. 1(52), pp. 119-126. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 23.11.2022

*Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: abrecap@mail.ru*

*State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"*

*of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,*

*Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"*

*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36*

*Lyubov Ivanovna Kolesnik, Cand. Sci. (Tech.), assistant professor; e-mail: lyu2630@yandex.ru*

*State Educational Institution of Higher Professional Education*

*"Donetsk National University"*

*283001, Donetsk, 24, ulitsa Universitetskaya. Phone: (+7 856) 379-19-20*

## PLOTTING THE EQUIVALENT CIRCUITS OF STRUCTURALLY COMPLEX RESTORABLE SYSTEMS FOR ASSESSMENT OF THEIR DEPENDABILITY AND FIRE SAFETY

**Purpose.** To develop a method for plotting the design circuits of minimal cuts for assessment of dependability and fire safety of load nodes using the structurally complex elementary diagram of power supply for the electrical power consumers which elements may be in three incompatible states.

**Methods.** Similarity method: structurally complex circuit is substituted by a simple power supply one which elements may be in three incompatible states. It is presented as two simple design circuits of minimal cuts which elements may be in two incompatible states.

**Results.** The engineering method of plotting the simple design circuits for substitution of the structurally complex circuits of power supply has been developed that will permit to assess their dependability and fire safety applying the design formulae of reducing the structures to a single equivalent element.

**Scientific novelty.** For the first time the method has been developed for plotting the substitution design circuits for assessing the dependability and fire safety of structurally complex circuits of power supply. The new analytical dependences have been established that characterize the dependability and fire safety of its load nodes.

**Practical value.** The easy to use engineering method has been derived for assessing the dependability of the structurally complex circuits of power supply and fire safety of its load nodes where each element of the structurally complex circuits of power supply may be in three incompatible states. In case of failure the element is located and its performance is restored in a finite time.

**Keywords:** *structurally complex circuit of substitution; dependability; fire safety; open-circuit fault; short circuit; miss operation.*

УДК 543.544.3:[547.532/.3]

*Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;*  
*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru;*  
*Оксана Николаевна Щербакова, вед. инж.; e-mail: astra-jasmin@mail.ru;*  
*Алексей Владимирович Сиверский, инж.; e-mail: alekseysiverskiy@mail.ru*  
Государственное бюджетное учреждение  
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-55

## СОРБЕНТЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ПРОБАХ ПОСЛЕ ПОЖАРА

**Цель.** Разработка рецептуры сорбентов для обнаружения летучих компонентов светлых нефтепродуктов – средств поджога – с последующей их идентификацией.

**Методы.** Экспериментальные исследования методами аккумулятивной, адсорбционной и газожидкостной хроматографии, анализ результатов исследований.

**Результаты.** Разработан сорбент на основе хроматона N-AW, модифицированного 15 % полиэтиленгликольадипината, свойства которого позволили получить групповые пики для бензина, керосина и дизельного топлива с отличающимися между собой значениями времени удерживания и отделить их от индивидуальных пиков ароматических углеводородов. Получены хроматограммы разделения бензина марки АИ-92, керосина осветительного и дизельного топлива марки Л (летнее), определено время удерживания групповых пиков исследуемых нефтепродуктов, а также индивидуальных пиков ароматических углеводородов. Выбран сорбент на основе хроматона N-AW, модифицированного 15 % полифенилового эфира 5ф-4э для контрольной колонки с целью подтверждения наличия ароматических углеводородов в анализируемой пробе.

**Научная новизна.** Впервые для идентификации следовых количеств легковоспламеняющихся жидкостей применяется высокочувствительный метод аккумулятивной газовой хроматографии сложных по составу смесей. Впервые исследованы в качестве адсорбента зольные алюмосиликатные микросферы – промышленные отходы тепловой электростанции.

**Практическая значимость.** Разработанные сорбенты обеспечат решение задачи идентификации средства поджога и получение более достоверных результатов пожарно-технических исследований фрагментов, изъятых с места пожара.

**Ключевые слова:** аккумулятивная хроматография; время удерживания; идентификация; сорбент; суммарный пик; хроматограмма.

**Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.** Пожары, в том числе по причине умышленных поджогов, приводят к человеческим жертвам, уничтожению материальных ценностей и, как следствие, причинению значительного материального ущерба. В 80 % случаев в качестве средств поджога злоумышленники используют наиболее распространенные и доступные светлые нефтепродукты: бензин, дизельное топливо, осветительный керосин, их смеси и др. [1]. Сложный углеводородный состав нефтепродуктов (см. табл. 1), а также их присутствие на различных объектах-носителях (ткань, грунт, древесина, стекло, пластик, пожарный мусор и др.) в следовых количествах

обуславливают трудности решения аналитических задач пожарно-технических исследований фрагментов, изъятых с места пожара.

Таблица 1

## Углеводородный состав светлых нефтепродуктов

Нефтепродукт	Углеводородный состав нефтепродукта, %			
	алифатические предельные углеводороды ( $C_nH_{2n+2}$ )	циклические предельные углеводороды (нафтены): моноциклические ( $C_nH_{2n}$ )	ароматические углеводороды ( $C_nH_{2n-6}$ )	непредельные ациклические углеводороды ( $C_nH_{2n}$ )
Бензины прямой перегонки нефти	40...50	20...50	6...22	–
Бензины термического и каталитического крекинга	45 (смесь алканов и нафтенов)	–	5,5	49
Керосин	20...60	20...50	5...25 (бициклические)	до 2
Дизельное топливо	10...40	20...60	14...30	20...60

Порог обнаружения применяемых в настоящее время экспертных методик не всегда обеспечивает возможность получения достоверных результатов обнаружения и идентификации инициаторов горения. Кроме того, анализ публикаций [2–4] показал, что исследования нефтепродуктов во фрагментах горевших материалов проводили на сложной аппаратуре, что обуславливает их высокую стоимость. В то же время недостаточное внимание уделяется исследованию и оценке разделительной способности сорбентов, применяемых в хроматографических колонках. Создание эффективных сорбентов, способных селективно отделить ароматические углеводороды от группы предельных углеводородов для идентификации легковоспламеняющихся жидкостей при пожарно-технических исследованиях позволяет использовать более дешевые насадочные колонки без ущерба для эффективности анализа.

Анализ состояния исследуемой проблемы обусловил **цель исследования** – разработку рецептуры сорбентов для обнаружения летучих компонентов нефтепродуктов (средств поджога) с последующей их идентификацией методом газовой хроматографии.

**Метод исследования.** Определение компонентов смесей неизвестного состава и дальнейшую их идентификацию выполняют методом газовой хроматографии, к преимуществам которой можно отнести:

- чувствительность, позволяющую определять компонентный состав сложной смеси с концентрацией каждого компонента до  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  мг/мл;

- точность анализа с относительной погрешностью измерения не более 5 %;
- информативность определения типа анализируемой смеси по хроматограмме с использованием способа «отпечатков пальцев»;
- селективность, нет необходимости проводить предварительное разделение образца;
- возможность исследования проб для анализа в малых объемах (1 мкл).

Идентификацию с использованием хроматографии проводят путем сравнения значения времени удерживания известных соединений с соответствующими величинами удерживания для анализируемой смеси неизвестных веществ, а также сравнения полученных хроматограмм. При одинаковых условиях разделения фиксированное время удерживания компонента смеси и сходство удерживания (порядок выхода, расположение и форма пика на хроматограмме) служат критериями идентификации компонента смеси.

Разделяющая способность метода газовой хроматографии в первую очередь отличается селективностью и эффективностью используемого сорбента, свойства которого, в свою очередь, зависят от характеристик инертного твердого носителя и неподвижной жидкой фазы. У твердого носителя должны отсутствовать необратимая адсорбция и каталитическая активность по отношению к разделяемым соединениям, но он должен иметь механическую прочность и т.д. К неподвижной жидкой фазе предъявляют следующие основные требования:

- термическая стабильность;
- химическая устойчивость;
- невысокая вязкость для возможности смачивания и нанесения на поверхность носителя равномерной пленки.

На практике используют жидкие фазы с высоким коэффициентом разделения оп отношению к различным классам химических веществ.

#### **Изложение основного материала и полученных научных результатов.**

На основании результатов предыдущих исследований [5, 6] установлены некоторые из параметров (см. табл. 2), влияющие на процесс хроматографического разделения сложных углеводородных смесей.

Таблица 2

Некоторые параметры хроматографического разделения смесей

Наименование параметра	Показатель
Зернение сорбента, мм	0,25...0,315
Газ-носитель	Гелий
Длина разделительной колонки, м	2 и 3
Внутренний диаметр колонки, мм	2
Расход газа-носителя (гелия), мл/мин	30
Расход воздуха, мл/мин	300
Расход водорода, мл/мин	30

Наименование параметра	Показатель
Температура термостата колонки, °С	130
Температура термостата испарителя, °С	200
Температура термостата детектора, °С	190

Экспериментальным путем определены остальные параметры разделения:

- инертный твердый носитель;
- неподвижная жидкая фаза;
- количество неподвижной жидкой фазы.

Исследования сорбентов на основе различных твердых носителей и жидких фаз проводили на газовом хроматографе. В качестве твердого носителя взят хроматон N-AW промышленного производства, геометрически однородный, обладающий низкой удельной поверхностью и легко подвергается химическому модифицированию. В настоящей работе также исследованы в качестве адсорбента (без модифицирования жидкими фазами) зольные алюмосиликатные микросферы. Поверхность твердых носителей модифицировали жидкими фазами различной химической природы:

- полиэтиленгликольадипинатом (ПЭГА), являющимся сложным эфиром;
- полифениловым эфиром 5ф-4э (ПФЭ), представляющим собой ароматический углеводород.

Для получения равномерной толщины пленки жидкую фазу наносили на поверхность носителя методом испарения растворителя.

На каждой колонке в одинаковых условиях эксперимента определяли время удерживания индивидуальных пиков ароматических углеводородов, групповых пиков бензина марки АИ-92, керосина осветительного и дизельного топлива марки Л (летнее), а также получали хроматограммы их разделения. Эффективность разделения на исследуемых сорбентах качественно оценивали по полученным хроматограммам.

Для решения поставленной задачи выбраны, приготовлены и испытаны три колонки с сорбентами (табл. 3).

Таблица 3

## Испытуемые колонки

Колонка	Сорбент
колонка 1	хроматон N-AW, модифицированный 15 % ПЭГА (от массовой доли хроматона N-AW) зернением 0,25...0,315 мм
колонка 2	хроматон N-AW, модифицированный 15 % ПФЭ (от массовой доли хроматона N-AW) зернением 0,25...0,315 мм
колонка 3	зольные алюмосиликатные микросферы с размером частиц 0,25...0,315 мм

Исследования сорбентов проводили при следующих условиях эксперимента:

- температура термостата колонки 120 °С (для колонки 1);
- температура термостата колонки 130 °С (для колонок 2 и 3);
- температура детектора 190 °С;
- температура испарителя 200 °С;
- расход газа-носителя 40 мл/мин (для колонки 1);
- расход газа-носителя 30 мл/мин (для колонок 2 и 3);
- расход воздуха 300 мл/мин;
- расход водорода 30 мл/мин.

На хроматограммах разделения бензина, керосина и дизельного топлива, полученных на колонке 1 (см. рис. 1), присутствуют групповой пик и индивидуальные пики ароматических углеводородов (толуол, параксилол, ортоксилол).

Колонка 2 (см. рис. 2) обеспечила разделение предельных и ароматических углеводородов, входящих в состав исследуемых нефтепродуктов, и может быть использована в качестве контрольной для подтверждения наличия ароматических углеводородов в анализируемой пробе.

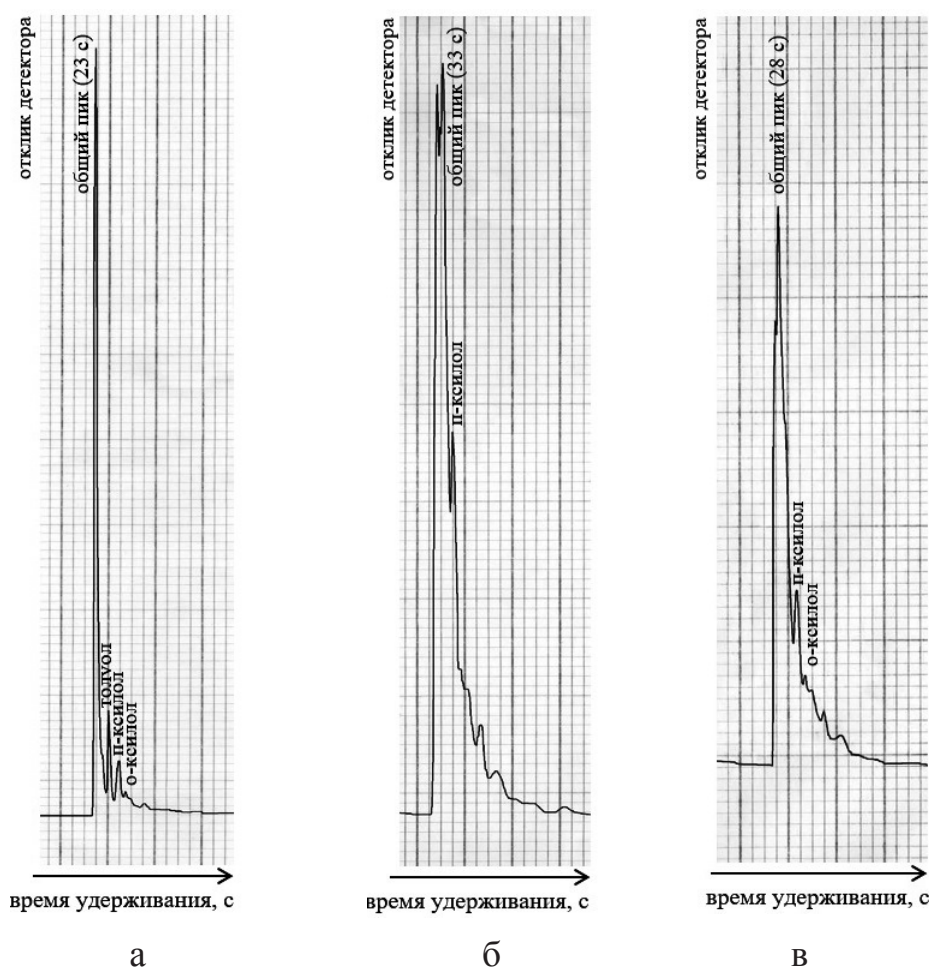


Рис. 1. Хроматограммы разделения на ПЭГА (колонка 1):

а – бензина; б – керосина; в – дизельного топлива

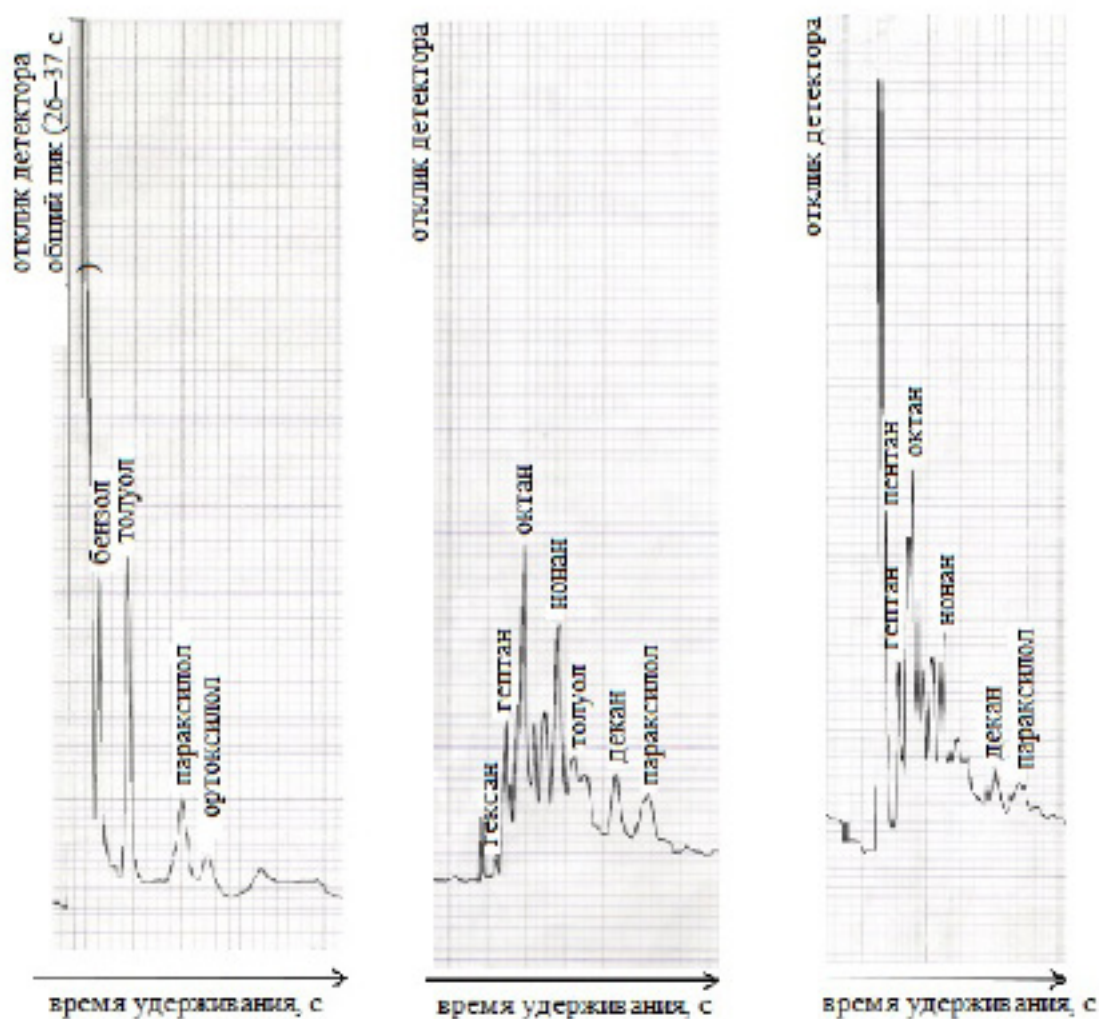


Рис. 2. Хроматограммы разделения на ПФЭ (колонка 2):

а – бензина; б – керосина; в – дизельного топлива

На зольных алюмосиликатных микросферах разделение нефтепродуктов происходит только одним общим пиком, индивидуальные пики предельных и ароматических углеводородов отсутствуют, что не решает поставленной задачи идентификации (рис. 3).

Полученные на колонке с полигликольдипинатом и зольными алюмосиликатными микросферами значения времени удерживания группового пика бензина, керосина, дизельного топлива и индивидуальных пиков толуола, пара- и ортоксилотола представлены в таблице 4.

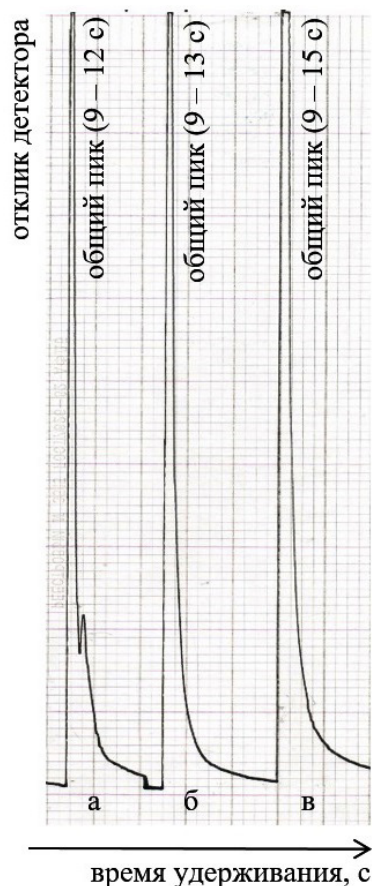


Рис. 3. Хроматограммы разделения на зольных алюмосиликатных микроферах (колонка 3):

а – бензина; б – керосина; в – дизельного топлива

Таблица 4

Время удерживания компонентов исследуемых нефтепродуктов

Название нефтепродукта	Время удерживания, с			
	групповой пик	толуол	парахиллол	ортохиллол
Хроматон N-AW с 15 % ПЭГА (от массовой доли хроматона N-AW) $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Бензин	23	35	43	49
Керосин	33	–	43	–
Дизельное топливо	28	–	43	49
Зольные алюмосиликатные микроферы $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Бензин	12	–	–	–
Керосин	13	–	–	–
Дизельное топливо	15	–	–	–

Таким образом, наиболее эффективное групповое разделение нефтепродуктов обеспечивает колонка 1 (см. рис. 1). Считаем, что на хроматоне N-AW, модифицированном 15 % полиэтиленгликольадипината (от массовой доли хроматона N-AW), возможно идентифицировать бензин, керосин и дизельное топливо по времени удерживания группового пика и индивидуальным пикам ароматических углеводородов. В качестве контрольной колонки для идентификации исследуемых нефтепродуктов можно использовать колонку на хроматоне N-AW, модифицированном 15 % полифенилового эфира 5ф-4э (от массовой доли хроматона N-AW).

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Разработан сорбент, свойства которого позволили методом аккумулятивной газовой хроматографии получить групповые пики для бензина, керосина, дизельного топлива и отделить их от индивидуальных пиков ароматических углеводородов. Определено время удерживания групповых пиков нефтепродуктов, а также индивидуальных пиков ароматических углеводородов. Установлена особенность разделительной способности колонки на зольных алюмосиликатных микросферах, свойства которой можно использовать в дальнейших исследованиях путем модификации сорбента жидкими фазами.

#### Список литературы / References

1. Галишев, М. А. Пожарно-техническая экспертиза / М. А. Галишев, Ю. Д. Моторыгин, Ю. Н. Бельшина [и др.] – СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2014. – 325 с.

Galishev M. A., Motorygin Yu. D., Belshina Yu. N. [et al.]. *Pozharnotekhnicheskaya ekspertiza* [Fire-technical expertise]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy universitet GPS MChS Rossii Press, 2014, 325 p. (In Russian)

2. Изменение состава летучих компонентов автомобильных бензинов при испарении и выгорании в ходе пожара / Л. А. Яценко, Е. В. Копкин, Е. Н. Бардулин, М. Ю. Принцева // Безопасность жизнедеятельности. – СПб., 2017. – № 9. – С. 39 – 44.

Yatsenko L. A., Kopkin Ye. V., Bardulin Ye. N., Printseva M. Yu. *Izmeneniye sostava letuchikh komponentov avtomobilnykh benzinov pri isparenii i vygoranii v khode pozhara* [Variation in composition of volatile components of motor benzenes during evaporation and burnout in case of fire]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, St. Petersburg, 2017, no. 9, pp. 39-44. (In Russian)

3. Галишев, М. А. Система подготовки аналитической информации для экспертно-криминалистического исследования нефтепродуктов в пожарно-технической экспертизе / М. А. Галишев, А. С. Павлова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. – № 4(21). – С. 95 – 97.

Galishev M. A., Pavlova A. S. *Sistema podgotovki analiticheskoy informatsii*

*dlya ekspertno-kriminalisticheskogo issledovaniya nefteproduktov v pozharno-tekhnicheskoy ekspertize* [System of analytical information preparation for forensic investigation of oil products in fire-and-technical expertise]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii Press*, 2016, no. 4(21), pp. 95-97. (In Russian)

4. Воронин, С. В. Существенные аспекты газожидкостной и тонкослойной хроматографии / С. В. Воронин // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2018. – № 2. – С. 14 – 19.

Voronin S. V. *Sushchestvennye aspekty gazozhidkostnoy i tonkosloynoy khromatografii* [Key aspects of gas-and-liquid and thin-layer chromatography]. *Nadzornaya deyatelnost i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti*, 2018, no. 2, pp. 14-19. (In Russian)

5. Козлитин, А. А. Обнаружение и идентификация остатков нефтепродуктов после пожаров / А. А. Козлитин, В. В. Лебедева // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2018. – № 3(55). – С. 68 – 73.

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V. *Obnaruzheniye i identifikatsiya ostatkov nefteproduktov posle pozharov* [Detection and identification of oil products residues after fires]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Donetsk, 2018, no. 3(55), pp. 68-73. (In Russian)

6. Козлитин, А. А. Методика обнаружения компонентов нефтепродуктов во фрагментах горевших материалов / А. А. Козлитин, В. В. Лебедева // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2020. – № 1(57). – С. 62 – 69.

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V. *Metodika obnaruzheniya komponentov nefteproduktov vo fragmentakh gorevshikh materialov* [Methodology for detecting oil products components in fragments of burned materials]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Donetsk, 2020, no. 1(57), pp. 62-69. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 20.10.2022

*Aleksey Andreyevich Kozlitin*, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;  
*Viktoria Valentinovna Lebedeva*, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;  
*Oksana Nikolayevna Shcherbakova*, advanced engineer; e-mail: astra-jasmin@mail.ru;  
*Aleksey Vladimirovich Siverskiy*, engineer; alekseysiverskiy@mail.ru  
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”  
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-55

## **SORBENTS FOR DETECTING OIL PRODUCT COMPONENTS IN SAMPLES AFTER THE FIRE**

**Purpose.** Development of formulations of the sorbents for detection of volatile components of light oils, i.e. arson attack means, for further identification of them.

**Methods.** Experimental investigations by methods of accumulative, adsorption and gas-and-liquid chromatography, analysis of investigations results.

**Results.** Based on N-AW chromatone modified by 15 %-polyethylene glycol adipic ether a sorbent has been developed which characteristics have made it possible to obtain the group peak responses for benzene, kerosene and diesel oil that differed in the retention time; it also facilitate their separation from individual peak responses of aromatic hydrocarbons. The АИ-92 benzene, lighting kerosene and summer diesel oil L separation chromatograms have been obtained, the retention time of the group peak responses for the oil products under investigation as well as the aromatic hydrocarbons individual peak responses have been determined. The sorbent based on N-AW chromatone modified by 15 %-5F4E polyphenyl ether has been chosen for the test column as a proof of the aromatic hydrocarbons presence in the analyte.

**Scientific novelty.** First time ever the high-sensitivity method of accumulative gas chromatography for complex mixtures is applied for identification of trace amounts of highly flammable liquids which permitted to investigate ash aluminum silicate microspheres, i.e. industrial wastes of heat power plants, as an adsorbent.

**Practical value.** The developed sorbents will facilitate the identification of the arson attack means and provide more accurate results of the fire-technical investigations of fragments collected at the fire location.

**Keywords:** *accumulative chromatography; retention time; identification; sorbent; sum peak; chromatogram.*

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.84:355.586

*Николай Юрьевич Чубучный, главный государственный инспектор по пожарному надзору;  
e-mail: mchs-dnr@mail.ru*

*Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР  
283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел.: (+7 856) 342-69-26*

*Елена Ивановна Добрякова, науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-44*

### ИННОВАЦИОННЫЕ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ВОПРОСАМ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**Цель.** Исследовать возможность использования образовательных инновационных технологий в процессе обучения населения вопросам пожарной безопасности.

**Методика.** Информационно-аналитические методы оценки образовательных инновационных технологий.

**Результаты.** Рассмотрены существующие подходы и инновационные формы обучения, используемые в системе образования для повышения уровня знаний обучающихся. Намечено решение выявленных проблем формализма знаний путем совершенствования системы обучения населения вопросам пожарной безопасности.

**Научная новизна.** Впервые предложен новый подход к повышению эффективности обучения населения вопросам пожарной безопасности, заключающийся в применении инновационных образовательных технологий.

**Практическая значимость.** Намеченные пути решения проблемы формализма знаний позволят повысить вероятность достижения максимального уровня усвоения материала обучающимися для применения полученных знаний по правилам пожарной безопасности на практике.

**Ключевые слова:** обучение; вопросы пожарной безопасности; инновационные формы; компьютерные технологии; эффективность образовательного процесса.

**Постановка проблемы.** Формирование у населения знаний правил пожарной безопасности, порядка действий в случае возникновения пожаров и ответственного отношения к их соблюдению – главная цель обучения вопросам пожарной безопасности. В ходе изучения проблематики существующей системы обучения вопросам пожарной безопасности авторами статьи [1] выявлено противоречие – документально сформированная система противопожарной пропаганды и обучения населения вопросам пожарной безопасности не обеспечивает необходимый уровень знаний у населения. Это подтверждается статистическими данными о причинах возникновения большинства пожаров на производстве и в быту, согласно которым в их основе лежит человеческий фактор (рис. 1). Из-за отсутствия необходимой базы знаний население не выполняет или выполняет бессистемно мероприятия по пожарной безопасности, что порождает недооценку риска возникновения пожара и его последствий.

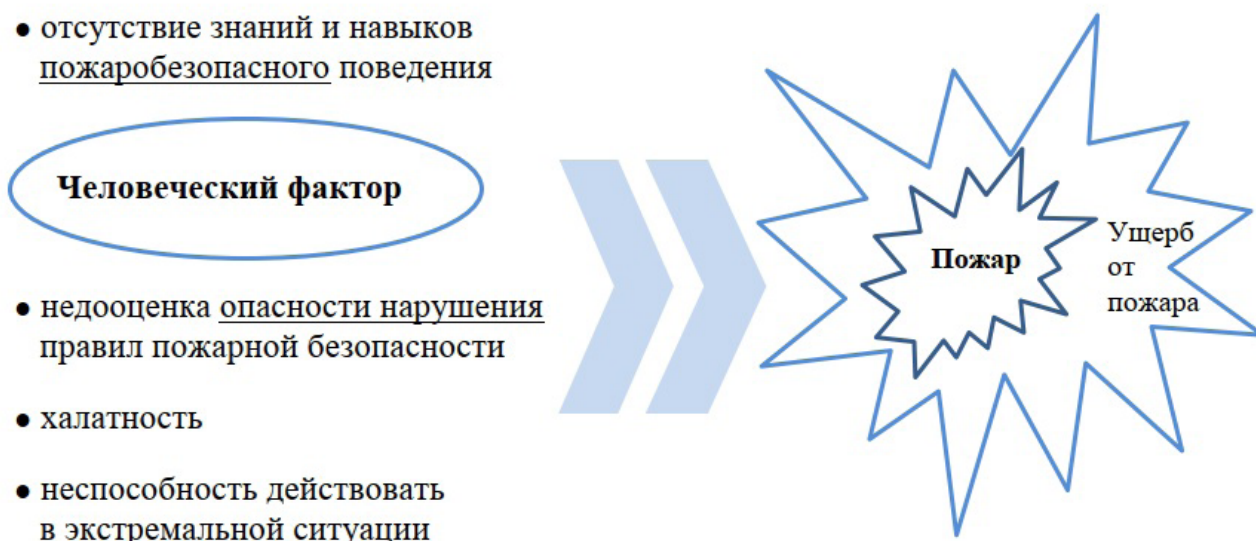


Рис. 1. Человеческий фактор при возникновении пожаров

На основании изложенного можно предположить, что существующий порядок обучения населения вопросам пожарной безопасности не способен обеспечить требуемый уровень знаний правил пожарной безопасности. Очевидны необходимость проведения исследований по выявлению недостатков в организации обучения вопросам пожарной безопасности, поиск путей их устранения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, С. Вагнер [2], исследуя научно-техническое обеспечение пожарной безопасности в современном мире, отметили, что по вине людей происходит 90 % пожаров. Авторы подчеркивают, что легкомысленное и преступное отношение к огню (неосторожность при курении, шалость детей с огнем, костры, поджоги) – основной фактор, вызывающий возникновение пожаров. Без изменения отношения населения к оценке вероятности возникновения пожаров невозможно радикально влиять на снижение их количества. В работах [1, 2] показано, что эффективность всех предпринимаемых в настоящее время мер по исследованию проблематики обучения населения вопросам пожарной безопасности невысокая. Очевидна потребность многостороннего исследования пренебрежительного отношения населения к реальной угрозе потери жизни, здоровья, материальных ценностей и поверхностного изучения правил пожарной безопасности и их последующего выполнения. Поиск решения обозначенных проблем следует начинать с исследования организации обучения и путей ее совершенствования.

**Цель работы** – исследовать возможность использования образовательных инновационных технологий в процессе обучения населения вопросам пожарной безопасности.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Из изложенного выше следует, что без изменения форм подачи материала

невозможно достичь уровня знаний у обучающихся вопросам пожарной безопасности, обеспечивающего возможность применения полученных знаний в экстремальных ситуациях.

**Описание методов (структуры, последовательности) проведения исследования.** В качестве поиска новых форм обучения целесообразно исследовать:

- существующие подходы и инновационные методы обучения, используемые в системе образования;
- вероятность достижения максимального уровня усвоения материала обучающимися, обеспечивающего возможность применения полученных знаний на практике, путем внедрения инновационных форм обучения.

**Изложение основного материала и полученных научных результатов.** Очевидно, что поиск новых форм и методов невозможен без оценки существующей системы проведения обучения вопросам пожарной безопасности. В. В. Кафидов [3] отмечает, что для выявления недостатков в работе системы пожарной безопасности необходимо проведение следующих теоретических и эмпирических исследований:

- степени информированности населения о пожарах;
- подготовленности населения к безопасной деятельности и к действиям в случае пожара;
- отношения различных социальных групп к проблеме обеспечения пожарной безопасности и безопасному поведению в случае возникновения пожара.

Действующая система обучения населения вопросам пожарной безопасности имеет четко регламентированный порядок и предусматривает непрерывную форму обучения (рис. 2).



Рис. 2. Непрерывная форма организации обучения вопросам пожарной безопасности

Подобную форму организации обучения можно обеспечить путем:

- информирования населения о проблемах и путях обеспечения пожарной безопасности (проведения противопожарной пропаганды);
- обучения через проведение инструктажей и получение минимума пожарно-технических знаний.

Изучение организации работы существующей системы обучения вопросам пожарной безопасности [1] свидетельствует о наличии следующих проблем:

- формализм обучения населения при проведении инструктажей, получение минимума пожарно-технических знаний;
- недостатки в содержании программ обучения.

Зададимся вопросом, в чем состоит формализм знаний вопросов пожарной безопасности. Для понимания проблемы используем определение из словаря С. И. Ожегова [4], согласно которому формализм — это «соблюдение внешней формы в чем-нибудь в ущерб существу дела». Н. Ф. Романцова [5], ссылаясь на педагогический словарь, считает причиной формализации знаний механическое заучивание без достаточного понимания сущности текста. Знание текста без понимания его сути не позволит обучающемуся применить его на практике. М. Н. Скаткин [6] подчеркивает, что формализм знаний является следствием:

- недостатков в подаче материала (абстрактности преподавания, недостаточности использования принципов наглядности и связи с практикой при изложении материала);
- отсутствия сознательной активности обучающегося и механического запоминания им текста.

В работе [6] автор утверждает, что формализм обнаруживается на стадии применения знаний на практике. О. Д. Ратникова [7] отмечает необходимость совершенствования организации обучения вопросам пожарной безопасности путем изменения методов и форм учебного процесса и программ обучения в учебных заведениях. М. Н. Скаткин [6], Г. К. Селевко [8] подчеркивают, что традиционная классно-урочная система обучения предполагает непосредственную передачу знаний от преподавателя обучающемуся, главный компонент которой – урок. Такая система не способна обеспечить активное взаимодействие всех обучающихся, присутствующих на уроке. Авторы отмечают необходимость поиска альтернативных форм обучения, под которыми понимается целенаправленная интерактивная форма организации образовательного процесса. Основным признаком интерактивных форм обучения – активность обучающихся в процессе обучения.

Очевидно, что активизация познавательной деятельности обучающихся, развитие и формирование у них способности эффективно действовать в нестандартных ситуациях возможны лишь при условии реализации инновационных подходов к построению образовательного процесса и обеспечения соответствующей подготовки преподавательских кадров.

В основу перечня инновационных форм обучения (табл. 1), используемых в образовательном процессе, положим глоссарий инновационных форм организации обучения, приведенный А. Г. Ряписовой [9].

Таблица 1

## Перечень инновационных форм обучения

Наименование	Содержание формы организации обучения
Аналитическая сессия	Форма организации групповой мыследеятельности с целью ретроспективного анализа (выделение плюсов и минусов) явления или процесса. Основное содержание – исследование образовательного процесса путем логической переработки информации
Вебинар	Разновидность веб-конференции. Организация общения в режиме реального времени и организация онлайн-встреч через компьютерную сеть
Воркшоп	Получение знаний обучающимися в процессе динамической групповой работы. Нет слушателей и наблюдателей. Цель – получение индивидуальных решений поставленных задач от каждого участника
Геймификация	Использование в обучении игровых элементов
Диалоговая лекция	Лекция с участием двух преподавателей по одной теме, общающихся между собой и аудиторией
Дигитализация образования	Использование в обучении ресурсов медиасреды
Квест	Разновидность игрового обучения. Представляет собой интерактивную историю с управляемым игроком, который для достижения целей преодолевает создаваемые в рамках игры трудности
Кейс-стади	Метод интерактивного обучения, предполагающий в ходе организованной дискуссии осмысление изучаемой ситуации
Коворкинг	Определенное пространство, оборудованное необходимым для освоения темы инвентарем
Коллаборация	Сетевое взаимодействие для получения знаний
Краудсорсинг	Новый подход в решении комплексных задач (процесс разбивается на мелкие части) с мобилизацией ресурса добровольцев и координацией действий посредством инновационных технологий
Круглый стол	Форма организации публичного обсуждения актуальных проблем в рамках более крупного мероприятия (конференции, съезда и т.д.)
Непрерывное образование	Организация образовательного процесса на протяжении жизни человека
Образовательный проект	Метод интерактивного обучения, предусматривающий деятельность исследовательского и комплексного характера всех участников группового взаимодействия
Эдьютейнмент	Формат организации обучения, позволяющий совмещать обучение и развлечения (образование посредством развлечения)

Все перечисленные выше формы организации образовательного процесса предполагают активную групповую мыследеятельность, использование компьютерной сети, дистанционную форму обучения.

Кейс-технологии, анализ проблемных ситуаций, анализ конкретных производственных ситуаций относятся к контекстному обучению и представляют собой аналог современного метода обучения – анализа профессиональных

ситуаций с использованием имитационных моделей обучения. Суть метода следующая: обучающимся предлагают для решения задачи в виде реальных проблемных ситуаций из их профессиональной деятельности. С. А. Мамиченко [10] подчеркивает, что решение проблемных ситуаций – базовый элемент контекстного обучения.

В приведенном выше перечне инновационных форм обучения (табл. 1) отсутствует «Инфографика» – направление визуализации информации путем составления блок-схем, графиков, диаграмм и т.д. посредством графического моделирования при изображении явлений или объектов. Т. С. Комиссарова [11] наглядно демонстрирует возможность отображения процесса или структуры в логической схеме методом визуализации понятий и связей. Выделение главного из информации и обобщение деталей при переводе текста в графическое изображение характерно для проблемного и модульного обучения.

О. В. Агошкова [12] отмечает цифровизацию образования как мировую тенденцию. Наблюдается широкое использование дистанционных форм обучения как образовательной технологии. Популяризируются формы мобильного обучения (m-learning) и практики взаимного/кросс-обучения (p2p-learning), которые базируются на p2p-платформах. Платформы позволяют повышать уровень знаний и получать профессиональные навыки, используя блокчейн-технологии. Автор отметила, что к мировым тенденциям цифровизации относятся разработка электронных образовательных сред, использование в процессе обучения обучающих онлайн-программ (Skilbox, Geekbrains, Stepik и т.д.). Внедрение игр в процесс обучения (геймификация) обеспечивает вовлеченность и усвоение программ обучения.

Исследования Л. А. Чесноковой [13] подтверждают, что использование инновационных форм обучения, дополненное традиционными формами, повышает уровень знаний обучающихся. Интерактивные формы образования улучшают взаимодействие обучающихся при имитации реальной ситуации.

Н. Ф. Романцова [5] отмечает, что на качество обучения влияет не только активная учебно-познавательная деятельность обучающегося, но и квалификационный уровень знаний преподавателя.

В ходе проводимых исследований авторы [14] отметили, что половина опрошенных преподавателей не учитывают особенности восприятия информации школьниками.

Необходимость учета психологических особенностей восприятия информации отмечена и при исследовании организации обучения населения вопросам пожарной безопасности [1]. При визуализации непрерывной формы организации обучения вопросам пожарной безопасности (см. рис. 2) очевидна возрастная градация обучающихся, что дает возможность учета психологических особенностей восприятия.

По мнению авторов статьи, для устранения формализма знаний по вопросам пожарной безопасности у населения и отсутствия учета психологических особенностей восприятия информации с целью повышения уровня знаний целесообразно внести изменения в содержание программ обучения,

методологию, формы изложения материала при организации системы обучения населения вопросам пожарной безопасности и способы проверки знаний (в зависимости от категории обучающихся и требуемого объема информации).

Авторами разработаны предложения по использованию инновационных образовательных форм обучения (табл. 2).

Таблица 2

Предложения по использованию инновационных образовательных форм обучения вопросам пожарной безопасности

Объект исследования	Предложения по внедрению
Содержание программ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● изменение содержания программ с учетом психологических особенностей восприятия;</li> <li>● использование проектного обучения (выделение проблемы и поиск путей ее решения);</li> <li>● повышение наглядности преподаваемого материала;</li> <li>● изменение способов и приемов предоставления информации (использование ресурсов медиасреды для сбора, анализа и обобщения информации о проблеме);</li> <li>● чередование методологических принципов воспитания (подражание, внушение, обучение);</li> <li>● применение групповой мыследеятельности, коллективного обсуждения для постановки и осознания проблемы и поиска ее решения;</li> <li>● включение в программы обучения изучения конкретных проблемных ситуаций;</li> <li>● предоставление алгоритма действий в случае возникновения пожара</li> </ul>
Формы обучения	<ul style="list-style-type: none"> <li>● посредством просмотра мультфильмов, видеороликов;</li> <li>● в игровой форме;</li> <li>● использование тематических квестов в реальности;</li> <li>● использование электронных интерактивных учебных пособий;</li> <li>● использование компьютерных обучающих программ;</li> <li>● использование элементов шоковой терапии;</li> <li>● имитация реальной опасности в случае возникновения пожара;</li> <li>● получение информации посредством внедрения инновационных решений и интерактивной подачи материала через «погружение» обучающихся в виртуальную среду, идентичную реальной обстановке;</li> <li>● углубленное изучение материала за счет повышения эмоционального восприятия моделируемой обстановки;</li> <li>● использование учебно-методических комплексов образовательных центров безопасности (на базе разработанных обучающих тренажеров, аппаратно-программных комплексов);</li> <li>● создание и использование правдоподобных систем-симуляторов (имитационных моделей процесса с возможностью управления развитием процесса)</li> </ul>
Формы проверки знаний	<ul style="list-style-type: none"> <li>● компьютерное тестирование</li> </ul>

Использование электронных интерактивных учебных пособий, учебно-методических комплексов в образовательных центрах безопасности (на базе разработанных обучающих тренажеров, аппаратно-программных комплексов), основанных на виртуальном погружении обучающихся в среду, имитирующую различные чрезвычайные ситуации, позволит повысить эффективность усвоения материала за счет повышения эмоционального восприятия моделируемой обстановки.

Тренировочные комплексы, оборудованные компьютеризированными системами контроля, дадут возможность обеспечить условия реального пожара. Это, в частности, мобильные полигоны Combined Training System («Dräger», Германия), ПТС «Грот», ПТС «Лава», ПТС «Уголек» (АО «ПТС», Россия), Mobile Fire Trainer ML 2000 («Egeria Group», Польша) и стационарные комплексы, разрабатываемые по индивидуальным заказам.

В качестве одного из вариантов недорогих и эффективных средств подготовки к действиям в условиях пожара, ориентированных на широкие слои населения, можно использовать игровые формы обучения, характеризующиеся многофункциональностью, информативностью и высокой мотивацией участников. Обучение посредством игры позволит сформировать знания, умения и навыки безопасного поведения и уверенно применять их на практике.

Хорошо закрепить знания при погружении в игровую среду можно, используя тематические квесты в реальности. Разработка «квеста в реальности», где по сюжету необходимо спастись из помещения, охваченного пожаром, может стать альтернативой применения учебно-тренировочного комплекса. Выполнение игровых заданий способствует формированию психологической готовности участников к действиям в условиях пожара, а также позволяет закрепить теоретические знания правил пожарной безопасности и отработать практические навыки.

Для повышения восприятия информации людьми целесообразно использовать следующие технологии: интернет-маркетинг, интернет-рекламу, рекламу, «вписанную» в окружающую среду, натуралистические изображения, аналогии, «связывающие» проблему с некими универсальными, свойственными каждому ценностями (семья и дети), персонифицированные средства агитации, видеоролики, различные креативные инсталляции. Для подготовки сценария видеоролика в целях ведения противопожарной пропаганды целесообразно использовать несколько эмоциональных компонентов (смех, страх, интерес), так как в зависимости от индивидуальных особенностей люди воспринимают соответствующую информацию по-разному. Любые сильные эмоции, в том числе и негативные, эффективно влияют на процесс запоминания.

Необходимо отметить важность транслирования в интернете и на телевидении видеороликов, мультфильмов на противопожарную тематику с новыми сюжетами для поддержания уровня эмоциональной заинтересованности населения в вопросах обеспечения пожарной безопасности.

Учитывая, что человек восприимчив только к сильным и близким по времени стимулам, целесообразно:

- проводить обучение с использованием современных компьютерных технологий (в том числе компьютерные игры на противопожарную тематику с учетом возрастных категорий населения);
- в программы учебного процесса включать (в виде шоковой терапии) просмотр видеорепортажей с мест возникновения пожаров и из ожоговых центров.

Особое внимание необходимо уделить качеству проведения инструктажей по пожарной безопасности. Целесообразно изменить подачу изучаемого материала, применяя интерактивные методы обучения (участие в дискуссии, подготовку доклада) и используя элементы шоковой терапии, драматизацию, имитацию реальной опасности в случае возникновения пожара или выполнения реальных действий. С этой целью рекомендуется проводить занятия с использованием элементов проблемности, мозговой атаки, анализа конкретных ситуаций, ролевых игр. Следует включить в практику проведения инструктажей обязательное компьютерное тестирование уровня полученных знаний.

Разработка многопользовательских компьютерных обучающих игр в жанре шутера от первого лица, аналогичных “Counter-Strike”, для использования в системе обучения вопросам пожарной безопасности. Обучение через увлекательную игру, используя сюжет эвакуации из здания в случае возникновения пожара, позволит учесть психологические особенности восприятия человеком информации о причинах возникновения и опасных последствиях пожаров и сформировать навыки пожаробезопасного поведения.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** В результате проведенного аналитического исследования выделены следующие проблемы в организации обучения населения вопросам пожарной безопасности: формализм знаний, отсутствие учета психологических особенностей восприятия информации обучающимися, недостаточное использование мультимедиа и информационных технологий в программах обучения.

Повышение эффективности образовательного процесса обучения населения вопросам пожарной безопасности возможно путем внедрения инновационных образовательных форм обучения. Целесообразно разработать методику подачи материала по изучению правил пожарной безопасности с учетом непрерывности цикла обучения (рис. 2) начиная с детского возраста. Обучение с регулярным повторением материала и воздействие на разные органы чувств человека позволит эффективно закрепить знания и повысить возможность их дальнейшего применения на практике.

Актуально внедрение опыта МЧС Беларуси по созданию учебно-методических комплексов образовательного центра безопасности. Использование анимированных персонажей и явлений для создания

виртуального мира, усиленное использованием тренажерных и аппаратно-программных комплексов позволяет качественно расширить область получаемых в процессе обучения знаний.

#### Список литературы / References

1. Чубучный, Н. Ю. Система обучения населения правилам пожарной безопасности / Н. Ю. Чубучный, Е. И. Добрякова // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2019. – № 1(56). – С. 94 – 99.

Chubuchnyy N. Yu., Dobryakova Ye. I. *Sistema obucheniya naseleniya pravilam pozharnoy bezopasnosti* [System of teaching fire safety rules to population]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskij zhurnal*. Donetsk, 2019, 1(56), pp. 94-99. (In Russian)

2. Брушлинский, Н. Н. Научно-техническое обеспечение пожарной безопасности в современном мире (краткий очерк) / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, С. Вагнер // Киберленинка: офиц. сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-tehnicheskoe-obespechenie-pozharnoy-bezopasnosti-v-sovremennom-mire-kratkiy-ocherk> (дата обращения: 10.09.2022).

Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V., Vagner S. *Nauchno-tekhnicheskoye obespecheniye pozharnoy bezopasnosti v sovremennom mire (kratkiy ocherk)* [Scientific and technical support of fire safety in the modern world (brief overview)]. *Cyberleninka: official website*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchno-tehnicheskoe-obespechenie-pozharnoy-bezopasnosti-v-sovremennom-mire-kratkiy-ocherk> (accessed 10.09.2022). (In Russian)

3. Кафидов, В. В. Инфраструктурный подход к оценке эффективности систем безопасности / В. В. Кафидов. – М., 2013. – 84 с.

Kafidov V. V. *Infrastrukturnyy podkhod k otsenke effektivnosti sistem bezopasnosti* [Infrastructure approach to assessment of safety systems effectiveness]. Moscow, 2013, 84 p. (In Russian)

4. Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – 4-е изд., доп. – М. : Азбуковник, 1997. – 944 с.

Ozhegov S. I., Shvedova N. Yu. *Tolkovyy slovar russkogo yazyka. 4-e izd., dop.* [Explanatory dictionary of Russian language. The 4<sup>th</sup> supplemented edition]. Moscow, Azbukovnik Publ., 1997, 944 p. (In Russian)

5. Романцова, Н. Ф. Формализм в знаниях студентов педагогических вузов и методы его преодоления : монография / Н. Ф. Романцова, С. А. Осяк. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. – 160 с.

Romantsova N. F., Osyak S. A. *Formalizm v znaniyakh studentov pedagogicheskikh vuzov i metody yego preodoleniya : monografiya* [Formalism in the knowledge of students of pedagogical higher educational institutions and techniques for overcoming it : monograph]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federalnyy universitet Press, 2014, 160 p. (In Russian)

6. Скаткин, М. Н. Формализм в знаниях учащихся и пути его преодоления : методическое письмо / сост. М. Н. Скаткин. – М. : Учпедгиз, 1947. – 52 с.

Skatkin M. N. *Formalizm v znaniyakh uchashchikhsya i puti yego preodoleniya : metodicheskoe pismo* [Formalism in students' knowledge and ways of its overcoming : procedural letter]. Moscow, Uchpedgiz Publ., 1947, 52 p. (In Russian)

7. Ратникова, О. Д. Обучение мерам пожарной безопасности, проблемы и пути их решения / О. Д. Ратникова, М. А. Комова // Киберленинка: офиц. сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-meram-pozharnoy-bezopasnosti-problemy-i-puti-ih-resheniya> (дата обращения: 11.09.2022).

Ratnikova O. D., Komova M. A. *Obucheniye meram pozharnoy bezopasnosti, problemy i puti ikh resheniya* [Teaching the fire precautions, problems and ways of their solutions]. *Cyberleninka : official website*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-meram-pozharnoy-bezopasnosti-problemy-i-puti-ih-resheniya> (accessed 11.09.2022). (In Russian)

8. Селевко, Г. К. Энциклопедия образовательных технологий. В 2 т. / Г. К. Селевко. – М. : НИИ школьные технологии, 2006. – Т. 2. – 816 с.

Selevko G. K. *Entsiklopediya obrazovatelnykh tekhnologiy. V 2 t.* [Encyclopedia of educational technologies. In two volumes]. Moscow, NII shkolnye tekhnologii Publ., 2006, vol. 2, 816 p. (In Russian)

9. Ряписова, А. Г. Инновационные формы организации образовательного процесса / А. Г. Ряписова // Киберленинка: офиц. сайт. URL: <https://repo.nspu.ru/bitstream/nspu/1939/1/innovacionnyye-formy-organizacii-.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).

Ryapisova A. G. *Innovatsionnye formy organizatsii obrazovatel'nogo protsessa* [Innovative forms of educational process organization]. *Cyberleninka : official website*. Available at: <https://repo.nspu.ru/bitstream/nspu/1939/1/innovacionnyye-formy-organizacii-.pdf> (accessed 12.09.2022). (In Russian)

10. Мамиченко, С. А. Сущность и главные компоненты контекстного обучения студентов / С. А. Мамиченко // Киберленинка: офиц. сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/suschnost-i-glavnye-komponenty-kontekstnogo-obucheniya-studentov/viewer> (дата обращения: 14.01.2022).

Mamichenko S. A. *Sushchnost i glavnye komponenty kontekstnogo obucheniya studentov* [Essence and main components of contextual education of students]. *Cyberleninka : official website*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/suschnost-i-glavnye-komponenty-kontekstnogo-obucheniya-studentov/viewer> (accessed 14.01.2022). (In Russian)

11. Комиссарова, Т. С. Картографический метод визуализации информации / Т. С. Комиссарова, Е. А. Гаджиева // Киберленинка: офиц. сайт URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartograficheskiy-metod-vizualizatsii-informatsii-pri-podgotovke-obuchayushchih-sya-v-vysshey-shkole> (дата обращения: 23.09.2022).

Komissarova T. S., Gadzhieva Ye. A. *Kartograficheskiy metod vizualizatsii*

*informatsii* [Map-making technique of visualizing of information]. *Cyberleninka : official website*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartograficheskiy-metod-vizualizatsii-informatsii-pri-podgotovke-obuchayuschihsya-v-vysshey-shkole> (accessed 23.09.2022). (In Russian)

12. Агошкова, О. В. Мировые тенденции цифровизации образования / О. В. Агошкова, В. Г. Минченко // Цифровизация экономики и общества: проблемы, перспективы, безопасность : материалы III международной научно-практической конференции, ГОУ ВПО «Донбасская юридическая академия», 25.03.2021. – Донецк : Цифровая типография, 2021. – 375 с.

Agoshkova O. V., Minchenko V. G. *Mirovye tendentsii tsifrovizatsii obrazovaniya* [Global trends of digitalization of education]. *Tsifrovizatsiya ekonomiki i obshchestva: problemy, perspektivy, bezopasnost : materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, GOU VPO "Donbasskaya yuridicheskaya akademiya"*, 25.03.2021. Donetsk, Tsifrovaya tipografiya Publ., 375 p. (In Russian)

13. Чеснокова, Л. А. Особенности восприятия студентами инновационных технологий, применяемых в образовании // Инновационные методы обучения в высшей школе : сборник статей по итогам методической конференции ННГУ 10–12 февраля 2016 г. – Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2016. – 288 с.

Chesnokova L. A. *Osobennosti vospriyatiya studentami innovatsionnykh tekhnologiy, primenyaemykh v obrazovanii* [Specifics of students' perception of innovative technologies applied in education]. *Innovatsionnye metody obucheniya v vysshey shkole : sbornik statey po itogam metodicheskoy konferentsii NNGU 10-12 fevralya 2016 g.* Nizhny Novgorod, NNGU im. N. I. Lobachevskogo Press, 2016, 288 p. (In Russian)

14. Протасов Н. С., Коршунова О. В. Учет типа восприятия информации как фактор повышения успешности обучения // Концепт : научно-методический электронный журнал. – 2017. – Т. 29. – С. 280 – 281. URL: <http://e-koncept.ru/2017/770861.htm> (дата обращения: 23.09.2022).

Protasov N. S., Korshunova O. V. *Uchet tipa vospriyatiya informatsii kak factor povysheniya uspeshnosti obucheniya* [Consideration for a type of information perception as a factor of education efficiency improvement]. *Kontsept : nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal*, 2017, vol. 29, pp. 280-281. Available at: <http://e-koncept.ru/2017/770861.htm> (accessed 23.09.2022). (In Russian)

*Nikolay Yuryevich Chubuchnyi*, chief state inspector for fire safety supervision; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru)  
Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters  
of the Donetsk People's Republic

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone: (+7 856) 342-69-26

*Yelena Ivanovna Dobryakova*, scientific associate; e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-44

## INNOVATIVE FORMS OF TEACHING FIRE SAFETY TO POPULATION

**Purpose.** To investigate the possibility to apply the innovative technologies in teaching fire safety to population.

**Methods.** Information and analytical methods for assessing the educational innovative technologies.

**Results.** The existing approaches and innovative forms of education applied in educational system for students' level of knowledge upgrade have been considered. The solution of the problems of formal knowledge by improving the system of fire safety education for population has been set out.

**Scientific novelty.** The new approach for upgrading the fire safety teaching efficiency applying the innovative educational technologies has been proposed for the first time.

**Practical value.** The planned ways to solve the problem of formal knowledge will permit to increase the probability of achieving the maximum level of students' material understanding for applying the obtained knowledge of fire safety rules in practice.

**Keywords:** *teaching; fire safety issues; innovative forms; computer-aided technologies; education process efficiency.*

УДК [614.841.332:620.197.6]:519.242

*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru;*

*Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: tamdoka@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

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

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ СИМПЛЕКС-РЕШЕТЧАТОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**

**Цель.** Оптимизация компонентного состава огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука по двум параметрам, характеризующим его огнезащитные свойства.

**Методы.** Определение коэффициента вспучивания слоя покрытия и потери массы образцами проведено стандартными методами, оптимизация состава огнезащитного покрытия – симплекс-решетчатым методом планирования эксперимента.

**Результаты.** Выполнена оптимизация состава огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука по двум параметрам, характеризующим огнезащитные свойства вспучивающегося покрытия, – коэффициенту вспучивания и потере массы. Установлено содержание вспучивающихся добавок, определяющих огнезащитные свойства разрабатываемого состава и покрытия на его основе. Получены регрессионные зависимости коэффициента вспучивания и потери массы для системы «связующее – вспучивающаяся добавка», что позволило оптимизировать состав огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

**Научная новизна.** Впервые получены аналитические выражения полиномов неполного третьего порядка, устанавливающие зависимость коэффициента вспучивания и потери массы от компонентного состава огнезащитного покрытия.

**Практическая значимость.** Результаты исследования экспериментально подтвердили оптимальное массовое соотношение целевых добавок в рецептуре огнезащитного покрытия на основе связующего вещества – хлоропренового каучука. Покрытие позволяет повысить огнестойкость несущих металлических строительных конструкций, предотвратить возгорание и распространение пламени по древесине и материалам на ее основе, и тем самым снизить риск быстрого обрушения зданий и сооружений в условиях пожара.

**Ключевые слова:** *огнезащитное покрытие; оптимизация; полином; хлоропреновый каучук; огнестойкость.*

**Постановка проблемы.** Пожарная опасность объектов гражданского и промышленного строительства определяется количеством и свойствами материалов, находящихся внутри зданий и сооружений, а также способностью конструкций сопротивляться воздействию пожара в течение определенного времени (огнестойкостью).

К эффективному способу сохранения огнестойкости конструкций при пожаре можно отнести использование огнезащитных вспучивающихся покрытий. Вспучивающиеся покрытия образуют при воздействии огня тепловой барьер, который позволяет увеличить период достижения критического нагрева конструкции. Разработка рецептур и изучение огнезащитной эффективности покрытий экспериментальными способами представляет собой серьезную

проблему, которая заключается в трудоемкости проведения экспериментов и сложности получения полной информации, отражающей поведение материала покрытия под воздействием пожарной нагрузки [1].

Таким образом, появляется необходимость в применении методов численного моделирования, позволяющих получать требуемые параметры максимально точно и достоверно для испытываемого покрытия.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Большая часть научно-исследовательских работ посвящена модификации рецептур существующих огнезащитных вспучивающихся покрытий и разработке на эмпирической основе новых составов применительно к различным технологическим задачам [2–4]. Эти работы представляют определенный интерес, но не менее перспективным направлением можно считать развитие теоретических исследований по оптимизации составов многокомпонентных вспучивающихся покрытий и исследованию их огнезащитной эффективности [5].

**Цель исследования** – оптимизация компонентного состава огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука по двум параметрам, характеризующим его огнезащитные свойства.

**Методика проведения эксперимента.** Объектом исследования стало покрытие на основе хлоропренового каучука, базовая рецептура которого была разработана на основании результатов предыдущих исследований. Изучение его свойств проводили в два этапа: в условиях изотермического нагрева и при огневом воздействии на образцы древесины, обработанные вспучивающимся покрытием.

На первом этапе исследований использовали стандартную методику согласно ГОСТ Р 59637-2021 «Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля».

Коэффициент вспучивания  $K_{\text{всп}}$ , характеризующий кратность слоя вспененного кокса, рассчитывали по формуле

$$K_{\text{всп}} = h_2/h_1, \quad (1)$$

где  $h_1$  – исходная толщина покрытия, мм;

$h_2$  – толщина покрытия после испытания, мм.

Второй этап исследования предусматривал проведение огневых испытаний на установке «Керамическая труба» с целью определения потери массы исходного образца, подвергнутого воздействию открытого пламени газовой горелки.

Потерю массы образца  $\Delta m$ , %, рассчитывали по формуле

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1}, \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса образца до испытания, г;

$m_2$  – масса образца после испытания, г.

Исследуемое огнезащитное покрытие представляет собой многокомпонентную смесевую систему, поэтому для изучения его огнезащитной эффективности и решения задачи оптимизации состава применяли симплекс-решетчатый план неполного третьего порядка [6].

**Результаты исследований.** К базовым показателям, определяющим огнезащитные свойства покрытия, можно отнести коэффициент вспучивания и потерю массы. В ходе экспериментальных исследований выявлено, что с точки зрения процесса объемного расширения оптимальны серии составов на основе хлоропренового каучука со вспучивающимися добавками – боратом цинка, полифосфатом аммония (далее – ПФА) и терморасширяющимся графитом (далее – ТРГ).

Поэтому для оптимизации состава огнезащитного покрытия входными переменными ( $x$ ) выбраны массовые содержания указанных компонентов. В качестве выходных переменных ( $y_i$ ) взяты средние значения коэффициента вспучивания  $K_{всп.}$  и потери массы  $\Delta m$  двух параллельных опытов, принятые в работе критериями оптимизации и определяемые экспериментально по формулам (1) и (2) соответственно.

Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Входной фактор – компонентный состав			Выходной фактор	
	массовая доля			среднее значение потери массы $\Delta m$	среднее значение коэффициента вспучивания $K_{всп.}$
	бората цинка $x_1$	ПФА $x_2$	ТРГ $x_3$		
1	1	0	0	0,07	11
2	0	1	0	0,06	15
3	0	0	1	0,04	28
4	1/2	1/2	0	0,05	14
5	1/2	0	1/2	0,03	21
6	0	1/2	1/2	0,02	30
7	1/3	1/3	1/3	0,04	25

Эмпирические зависимости интерполировались 7-параметрическим приведенным полиномом неполного третьего порядка следующего вида:

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

Коэффициенты уравнения полинома (3) рассчитаны по формулам

$$\begin{aligned}\beta_1 &= y_1; \\ \beta_2 &= y_2; \\ \beta_3 &= y_3; \\ \beta_{12} &= 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2; \\ \beta_{13} &= 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3; \\ \beta_{23} &= 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3; \\ \beta_{123} &= 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3).\end{aligned}$$

После подстановки вычисленных коэффициентов в уравнение (3) получены регрессионная модель коэффициента вспучивания

$$K_{\text{всп}} = 11x_1 + 15x_2 + 28x_3 - 4x_1x_2 - 6x_1x_3 - 34x_2x_3 + 57x_1x_2x_3 \quad (4)$$

и регрессионная модель потери массы

$$\Delta m = 0,07x_1 + 0,06x_2 + 0,04x_3 - 0,06x_1x_2 - 0,1x_1x_3 - 0,12x_2x_3 + 0,39x_1x_2x_3, \quad (5)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – значения массовых содержаний вспучивающихся добавок.

Из модели (4) следует, что с точки зрения получения материала с максимальным вспучиванием наиболее эффективно введение терморасширяющегося графита (значение параметра при первой степени  $x_3$  максимально). Замещение терморасширяющегося графита на борат цинка и полифосфат аммония снижает коэффициент вспучивания примерно в два раза. В то же время, исходя из требования обеспечения высокой огнезащитной эффективности покрытия, совместное введение терморасширяющегося графита, бората цинка и полифосфата аммония решает эту задачу за счет комбинированного механизма вспучивания – интумесценцией графита и ячеистого вспучивания (вспенивания) бората цинка и полифосфата аммония.

Как следует из представленных результатов (см. табл.), для всех средних значений потери массы испытанных образцов древесины с покрытием выполняется неравенство  $\Delta m > 9 \%$ , что соответствует первой группе огнезащитной эффективности покрытия. Это позволяет утверждать, что область факторного пространства при выполнении оптимизации выбрана рационально. Следует подчеркнуть, что наиболее низкие значения потери массы образцами достигаются при достаточно высоких средних значениях коэффициента вспучивания коксового слоя –  $K_{\text{всп}} = 21 \dots 30$ . Увеличение количества интумесцентных фаз сопровождается возрастанием коэффициента вспучивания при одновременном сокращении потери массы.

Анализ полученных регрессионных моделей (4) и (5) позволяет сделать вывод о том, что основной фактор, влияющий на коэффициент вспучивания и потерю массы, следовательно, и на огнезащитную эффективность покрытия, – массовая доля бората цинка, полифосфата аммония и терморасширяющегося графита.

**Вывод.** Проведенная оптимизация позволила установить диапазоны содержания базовых компонентов состава: полифосфат аммония – 13,9...15,6 масс. %, терморасширяющийся графит – 9,0...10,4 масс. % и борат цинка – 2...3 масс. %, что определяет наиболее эффективные огнезащитные свойства (относительная потеря массы – 1 %, коэффициент вспучивания – 43,9) разработанного огнезащитного вспучивающегося состава и покрытия на его основе.

#### Список литературы / References

1. Уткин, С. В. Проблемы оценки эффективности огнезащитных покрытий для металлических конструкций / С. В. Уткин, Н. В. Семенова, С. А. Кондратьев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – № 7(164). – С. 159 – 161.

Utkin S. V., Semenova N. V., Kondratyev S. A. *Problemy otsenki effektivnosti ognezashchitnykh pokrytiy dlya metallicheskih konstruktsiy* [Problems of effectiveness assessment of fire-protective coatings for metal constructions]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 7(164), pp. 159-161. (In Russian)

2. Nurkulov, E. N., Beknazarov, K. H. S., Jalilov, A. T. *Synthesis and study of the properties of the metal-containing oligomer antypirene obtained based on local raw materials*. Scientific Bulletin of Namangan State University, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 100-103. (In English)

3. Дрижд, Л. Об особенностях конкуренции на рынке огнезащитных составов в Украине / Л. Дрижд // F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты. – 2011. – № 6(48). – С. 21 – 23.

Drizhd L. *Ob osobennostyakh konkurentsii na rynke ognezashchitnykh sostavov v Ukraine* [On specifics of competition on the fire-protective means market in Ukraine]. *F+S: tekhnologii bezopasnosti i protivopozharnoy zashchity*, 2011, no. 6(48), pp. 21-23. (In Russian)

4. Зыбина, О. А. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных композиций / О. А. Зыбина, А. В. Варламов, С. С. Мнацаканов. – Новосибирск: ЦРНС. – 2010. – 50 с.

Zybina O. A., Varlamov A. V., Mnatsakanov S. S. *Problemy tekhnologii koksoobrazuyushchikh ognezashchitnykh kompozitsiy* [Problems of technology of coke-forming fire-protective compositions]. Novosibirsk, TsRNS Publ., 2010, 50 p. (In Russian)

5. Бардин, А. В. Огнестойкость металлоконструкций на примере метода численного моделирования / А. В. Бардин, О. Ю. Сударь // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 8(35). – С. 36 – 47.

Bardin A. V., Sudar O. Yu. *Ognestoykost metallokonstruktsiy na primere metoda chislennoy modelirovaniya* [Flame-resistance of metal constructions exemplified

by numerical simulation method]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*, 2015, no. 8(35), pp. 36-47. (In Russian)

6. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры) / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха, И. А. Потяженко. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 264 с.

Bondar A. G., Statyukha G. A., Potyazhenko I. A. *Planirovanie eksperimenta pri optimizatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii (algoritmy i primery)* [Planning of experiment within optimization of chemical technology processes]. Kiev, Vyshcha shkola. Golovnoye izd-vo Publ., 1980, 264 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 11.08.2022

*Viktoria Valentinovna Lebedeva*, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;

*Igor Nikolayevich Nepochatykh*, scientific associate; e-mail: tamdoka@mail.ru

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-55

## OPTIMIZATION OF FIRE-PROTECTIVE COATING COMPOSITION APPLYING SIMPLEX-LATTICE PLANNING METHOD

**Purpose.** Optimization of the component composition of the chloroprene rubber-based fire-retardant coating according to two parameters characterizing its fire-protective properties.

**Methods.** Determination of an intumescence coefficient for the coating layer and a mass loss of the samples has been conducted by the standard methods; optimization of the fire-retardant coating composition has been fulfilled by the simplex-lattice method of the experiment planning.

**Results.** The optimization of the chloroprene rubber-based fire-protective coating composition has been fulfilled according to two parameters determining the fire-retardant properties of the intumescent coating, i.e. intumescence coefficient and mass loss. The content of the intumescent additives characterizing the fire-retardant properties of the designed composition and the coating based on it has been established. The regression dependences of the intumescence coefficient and mass loss have been derived for the “binding agent – intumescent additive” system which has made it possible to optimize the composition of the chloroprene rubber-based coating with the improved performance characteristics.

**Scientific novelty.** The novel analytical expressions of the third order incomplete polynomials have been derived establishing the dependence of the intumescence coefficient and mass loss on the component composition of the fire-retardant coating.

**Practical value.** The results of the investigation have experimentally confirmed the optimum mass ratio of the target additives in the formulae of the fire-protective coating based on the binding agent, i.e. chloroprene rubber. The coating makes it possible to improve the fire-resistance of bearing metal structures, to prevent ignition and spread of flame along the wood and wood-based materials thus to reduce the risk of sudden collapse of the buildings and constructions in conditions of a fire.

**Keywords:** fire-protective coating; optimization; polynomial; chloroprene rubber; fire-resistance.

УДК [622.822.225:001.891.572](477.61/.62)

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, глав. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;*

*Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: ennio\_80@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 340-97-96*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ОКИСЛЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГЛЕЙ ДОНБАССА

**Цель.** Изучить кинетику теплового эффекта окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма на основе разделения кинетики адсорбции и хемосорбции кислорода.

**Методы.** Математическое моделирование теплового эффекта окисления газонасыщенных углей на основе экспериментальных результатов кинетики адсорбции и хемосорбции кислорода.

**Результаты.** Установлена зависимость скорости тепловыделения от степени метаморфизма углей для определения температуры самовозгорания углей различной степени метаморфизма.

**Научная новизна.** На основе проведенных ранее исследований теплоты реакции окисления газонасыщенных углей, изучения степени разделения поглощенного углями кислорода и вступившего в реакцию окисления впервые предложено новое понятие «скорость тепловыделения сорбента (угля)».

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволят научно обосновать рекомендации по прогнозу эндогенной пожароопасности угольных скоплений.

**Ключевые слова:** адсорбция; диффузия; реакция; математическое моделирование; тепловой эффект окисления; скорость тепловыделения.

**Постановка проблемы.** Известно, что тепловой эффект реакции окисления угольного вещества независимо от ее протекания определяется только начальным и конечным состоянием и составляет для случая окисления углерода  $3,93 \cdot 10^5$  Дж/моль (94 ккал/моль) при условии, что в ходе реакции объем и давление постоянны.

В ходе эксперимента с углями различных пластов шахт Донбасса тепловой эффект реакции взаимодействия кислорода с углем, по данным работы [1], изменялся в пределах  $2,7 \cdot 10^5 \dots 27 \cdot 10^5$  Дж/моль. Это позволило П. С. Пашковскому сделать вывод, что принимать фиксированное значение теплоты реакции окисления при оценке процессов самонагрева угля неправильно. Анализируя сведения о тепловых эффектах окисления угля, автор пришел к заключению, что между склонностью угля к самовозгоранию и теплотой реакции окисления прямой функциональной связи не существует. Угли, при выемке которых происходило большое количество эндогенных пожаров, отличаются повышенным количеством выделившейся теплоты при окислении. Например, высшую теплоту реакции окисления имеет уголь пласта  $m_3$  шахты им. Г. Г. Капустина («Лисичанскуголь»), данный уголь склонен к самовозгоранию. Высшей теплотой реакции окисления отличаются также склонные к самовозгоранию угли пластов  $l_3$  шахты им. Ю. А. Гагарина («Артёмуголь»),  $l_1$  шахты им. В. И. Ленина («Макеевуголь») и  $l_1$  шахты «Юнком» («Орджоникидзеуголь»), а теплота реакции окисления не склонного

к самовозгоранию угля пласта  $h_6$  шахты «Донецкая» («Горезантрацит») выше, чем теплота реакции склонных к самовозгоранию углей пластов  $m_3$  шахт им. В. И. Бажанова и «Чайкино» («Макеевуголь»).

Подводя итог исследованию теплоты реакции окисления углей, П. С. Пашковский сделал вывод, что по абсолютному значению теплоты окисления нельзя характеризовать степень склонности угля к самовозгоранию. Однако, поскольку его значение для различных углей колеблется в широких пределах, теплоту реакции необходимо учитывать при оценке тепловых процессов самовозгорания угля.

Существующая методика определения тепловых эффектов окисления угля требует сложных экспериментальных исследований, поэтому на практике принимают среднее значение теплоты реакции окисления угля, равное  $3,76 \cdot 10^5$  Дж/моль, что нельзя считать правильным [2, 5].

Ископаемые угли в отличие от чистого углерода, для которого тепловой эффект постоянен, отличаются наличием минеральных примесей в тонкорассеянном состоянии либо в виде отдельных кристаллов разной формы и размера, поэтому из-за разнообразного состава примесей в ископаемых углях и разной степени их углефикации теплота реакции окисления отличается.

В работах [2, 3] для определения инкубационного периода и склонности углей к самовозгоранию были проведены экспериментальные исследования углей, содержащих 7...35 % летучих горючих: измеряли суммарные тепловые эффекты окисления и тепловые эффекты, отнесенные к единице поглощенного кислорода, не зависящие от диффузионных или кинетических особенностей сорбции кислорода, размеров поверхности, массы угля и его фракционного состава. Однако не было учтено, что эти факторы существенно влияют на суммарный тепловой эффект.

Еще один недостаток выполненных исследований – принятие величин поглощенного определенной массой угольных частиц кислорода за его количество, вступающее в реакции окисления. Как показано в работе [4], только небольшая часть поглощенного углем кислорода вступает с ним в реакции. Поэтому изучение этого вопроса представляет не только теоретический, но и практический интерес, так как от этого зависит решение задачи вероятности самовозгорания конкретного скопления угля в шахте.

Исходя из вышеизложенного, сформулирована **цель исследования** – изучить кинетику теплового эффекта окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма на основе разделения кинетики адсорбции и хемосорбции кислорода.

**Результаты исследований.** Анализируя результаты (табл. 1), показывающие тесную связь теплоты реакции окисления  $q_0$ , Дж/моль, с константой скорости окисления  $k$ ,  $s^{-1}$ , предположим, что их произведение – это новая характеристика угля, скорость тепловыделения  $v_{q_0}$ , Дж/моль, определяющая его склонность к самовозгоранию. Для подтверждения обратимся к методике определения склонности угля к самовозгоранию [2, 6], в которой комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию  $t$ , с, определяется следующей зависимостью

Таблица 1

## Теплота окисления различных углей шахт Донбасса

Шахта, индекс пласта	Доля горючих веществ, $V^r$ , %	Выделяющаяся теплота, Дж	Теплота реакции окисления $q_0$ , $10^{-5}$ ·Дж/моль	Константа скорости окисления $k$ , $10^2$ ·с $^{-1}$	Концентрация кислорода $C_x$ , моль/м $^3$	Скорость тепловыделения	
						$\nu_{q_0} \cdot 10^{-3}$ , Дж/моль	$\omega_{q_0} \cdot 10^{-3}$ , Дж/(м $^3$ ·с)
«Комсомолец Донбасса», $l_3$	30	0,41	6,6	0,31	6,94	2,1	14,57
Им. А. И. Гаевого, $l_3$	22	0,43	6,1	0,40	1,07	2,5	2,68
Им. Ю.А. Гагарина, $l_1$	25	0,21	5,5	0,49	2,59	3,7	9,60
Им. М.И. Калинина, $l_3$	20	0,26	16,1	0,15	0,59	2,4	1,41
«Северная», $l_1$	25	0,33	8,9	0,43	2,59	3,0	7,78
«Южная», $l_1$	25	0,43	5,8	0,51	2,59	3,0	7,78
«Торецкая», $l_3$	28	0,27	7,6	0,25	4,94	1,9	9,38
Им. А.Ф. Засядько, $m_3$ $l_1$	36	0,23	25,9	0,23	15,41	5,9	90,92
	34	0,33	8,4	0,28	12,11	2,4	29,06
Им. Челюскинцев, $m_3$	33	0,47	4,6	0,65	10,65	3,0	31,96
«Куйбышевская», $l_4$	36	0,37	4,5	0,9	15,41	4,1	63,20
Им. А.А. Скочинского, $h_6$	31	0,25	3,9	0,82	8,07	3,2	25,84
Им.Г.Г. Капустина, $m_3$	34	2,46	5,8	0,6	12,11	3,5	42,38
Им. В.И. Ленина, $l_1$	23	1,02	24,1	0,14	1,48	3,4	5,03
Им. К.И. Поченкова, $m_3$ $l_1$	34	0,41	10,5	0,33	12,11	3,5	42,39
	25	0,19	4,8	0,6	2,59	2,9	7,51
Им. В.М. Бажанова, $m_3$	27	0,29	8,2	0,36	4,07	3,0	12,21
«Чайкино», $m_3$	30	0,30	6,8	0,47	6,94	3,2	22,20
«Александровская», $l_1$	9	0,45	7,2	0,2	10,76	1,4	15,06
«Булавинская», $l_3$ $l_1$	10	0,53	7,6	0,25	8,54	1,9	16,23
	9	0,27	12,2	0,19	10,76	2,3	24,75
«Ольховатская», $l_3$	8	0,46	8,9	0,18	13,34	1,6	21,35
«Полтавская», $l_1$ $l_3$	7	0,41	6,1	0,23	16,32	1,4	22,85
	8	0,42	6,2	0,24	13,34	1,5	20,01
«Углегорская», $m_3$	9	0,49	8,5	0,21	10,76	1,8	19,37
«Донецкая», $h_6$	17	0,46	4,0	0,8	0,87	3,2	2,78

$$t = \frac{\rho c_V T_0}{(q_0 C k) \ln \left( \frac{T_{кр}}{T_0} \right)}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность угля, кг/м $^3$ ;

$c_V$  – удельная теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$T_0$  и  $T_{кр}$  – начальная и критическая температура угля, К;  
 $q_0$  – теплота реакции окисления, Дж/моль;  
 $C$  – концентрация кислорода, поглощенного углем, моль/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – константа скорости окисления угля, с<sup>-1</sup>.

Из формулы (1) следует, что комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию  $t$  обратно пропорционален произведению  $q_0 \cdot k$ , то есть скорости тепловыделения  $V_{q_0}$ . Таким образом, при изучении эндогенной пожароопасности необходимо обращать внимание не на отдельно взятые и определенные в лабораторных условиях значения теплоты реакции окисления  $q_0$  и константы скорости окисления  $k$ , а на их произведение, то есть на скорость тепловыделения  $V_{q_0}$ .

Исследования [2, 3] теплового эффекта окисления углей основывались на определении значений поглощенного углями кислорода в хроматографической колонке в течение нескольких секунд, когда реакции окисления угольных частиц могли произойти только на их поверхностях. В действительности скопления угля в горных выработках шахт подвергаются окислению длительное время (несколько суток) [6]. А инкубационный период самовозгорания составляет 20...40 сут.

Поэтому изучение процесса окисления углей и выделяющейся в результате этого теплоты надо проводить на протяжении всего периода их низкотемпературного окисления.

Дальнейшие исследования низкотемпературного окисления угля показали, что существенное влияние на этот процесс имеет также величина концентрации поглощенного углями кислорода  $C$ , моль/м<sup>3</sup>.

В работе [4] впервые предложен метод разделения кинетики поглощенного и прореагировавшего кислорода и установлены численные значения параметров хемосорбции кислорода. Доля кислорода  $\delta$ , вступившего в реакции окисления с углем разной степени метаморфизма, представлена в таблице 2.

Таблица 2

Доля кислорода, вступившего в реакции окисления  
с углем разной степени метаморфизма

Шахта, пласт	$V^{daf}$ , %	Константа скорости окисле- ния $k$ , м <sup>3</sup> /(с·моль)	Параметры низкотемпературного окисления углей					
			Время, час/сек					
			12/ 43200	24/ 86400	48/ 172800	72/ 259200	120/ 432000	240/ 864000
			$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$
Им. С.М. Кирова, $h_{10}^B$	8,2–10,6	$1 \cdot 10^{-9}$	0,86	0,74	0,62	0,52	0,34	0,23
«Холодная Балка», $h_{10}^B$	13,2	$1,43 \cdot 10^{-9}$	0,82	0,80	0,77	0,59	0,11	0,095
«Горняк-95», $h_8^B$	22	$1,61 \cdot 10^{-9}$	0,36	0,22	0,12	0,092	0,02	0,015

Шахта, пласт	$V^{\text{daf}}, \%$	Константа скорости окисле- ния $k$ , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$	Параметры низкотемпературного окисления углей					
			Время, час/сек					
			12/ 43200	24/ 86400	48/ 172800	72/ 259200	120/ 432000	240/ 864000
			$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$	$\delta$
«Щегловская Глубокая», $l_3$	25,4–27,8	$8,9 \cdot 10^{-9}$	0,49	0,4	0,28	0,22	0,077	0,054
«Россия», $m_3$	42	$2,9 \cdot 10^{-9}$	0,83	0,81	0,81	0,80	0,68	0,66
Им. Челюскинцев, $l_1$	42,6	$1,1 \cdot 10^{-9}$	0,84	0,82	0,83	0,82	0,71	0,72

Из анализа полученных результатов следует, что для углей различной степени метаморфизма доля кислорода  $\delta$ , вступившего в реакцию окисления угля, по мере его адсорбции неуклонно уменьшается, а общая величина адсорбции повышается до наступления сорбционного равновесия. На примере исследованных углей показано, что 90 % кислорода поглощается в течение 3 сут и 95 % в течение 10 сут.

Установлены зависимости относительных величин хемосорбции кислорода  $\frac{a_{\text{хим}}}{a_{\text{эксп}}}$  от степени метаморфизма углей (рис. 1), из анализа которых следует, что в обоих случаях связь величин хемосорбции кислорода  $\frac{a_{\text{хим}}}{a_{\text{эксп}}}$  со степенью метаморфизма весьма тесная, коэффициент корреляции более 0,98.

На основе результатов [4] для адсорбции углями кислорода и зависимостью между поглощенным кислородом и вступившим в реакцию окисления определены величины вступившего в реакцию окисления кислорода  $C_x$  для углей (табл. 1).

Скорость тепловыделения  $\omega_{q_0}$  с учетом количества вступающего в реакции окисления с углем кислорода выразим в виде

$$\omega_{q_0} = q_0 C_x k. \quad (2)$$

Определено количество вступающего в реакции окисления с углем кислорода  $C_x$  и скорости тепловыделения  $\omega_{q_0}$  (см. табл. 1).

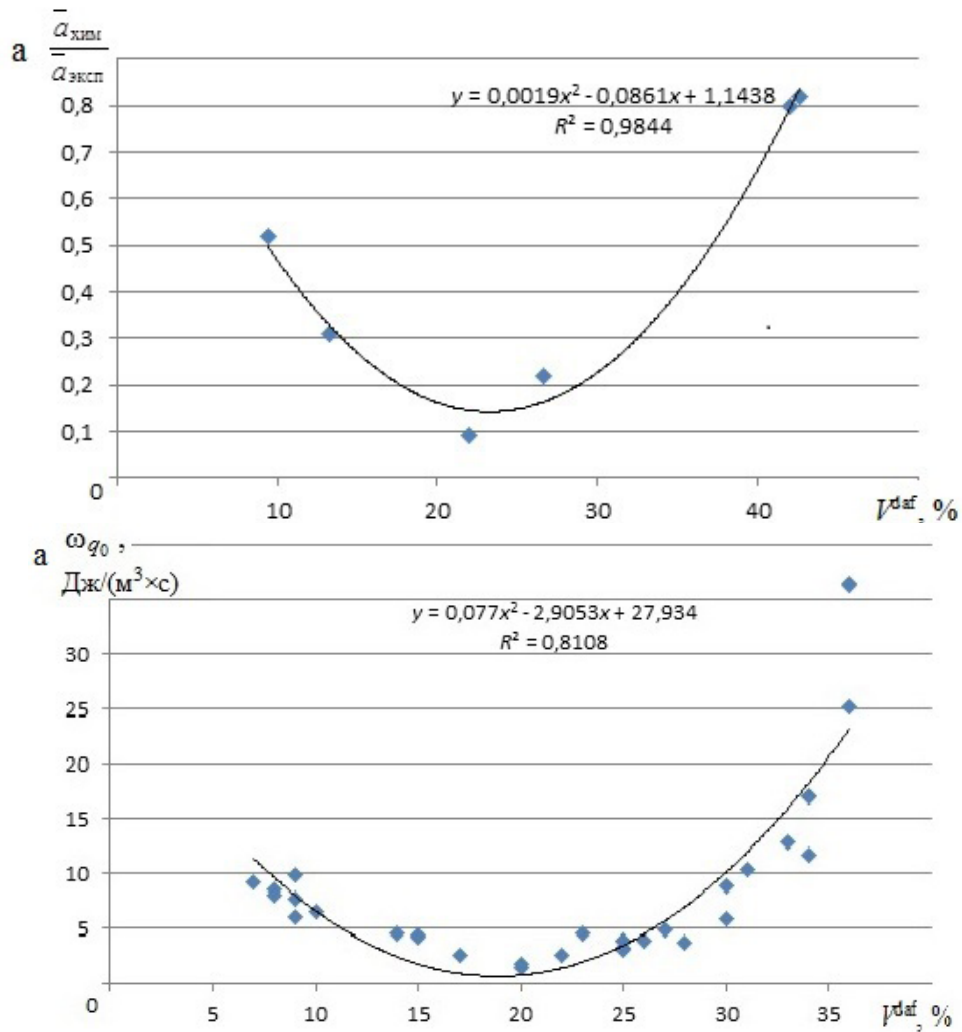
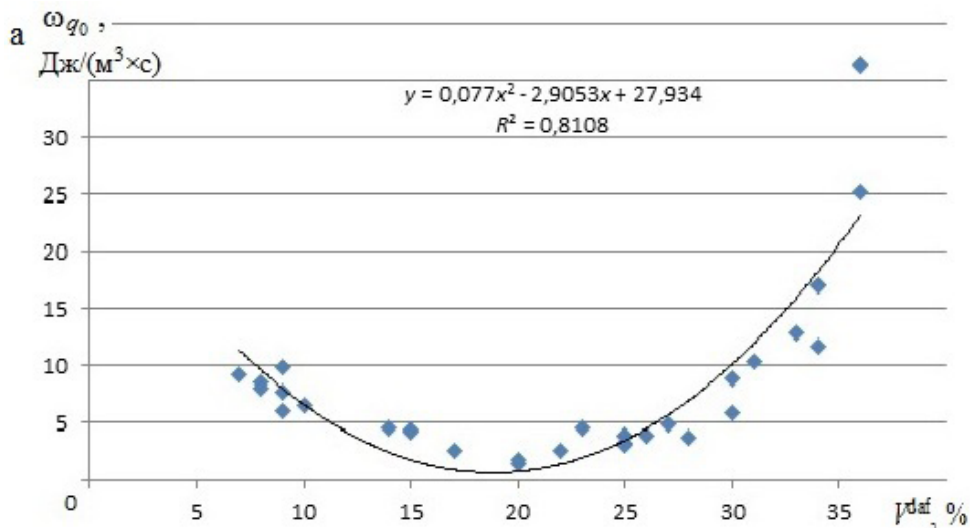


Рис. 1. Зависимость относительных величин хемосорбции кислорода  $\frac{a_{хим}}{a_{эсп}}$  от степени метаморфизма углей:

а) 3 сут от начала процесса адсорбции; б) 10 сут от начала процесса адсорбции

Установлены зависимости скорости тепловыделения  $\omega_{q_0}$  от степени метаморфизма угля (рис. 2).



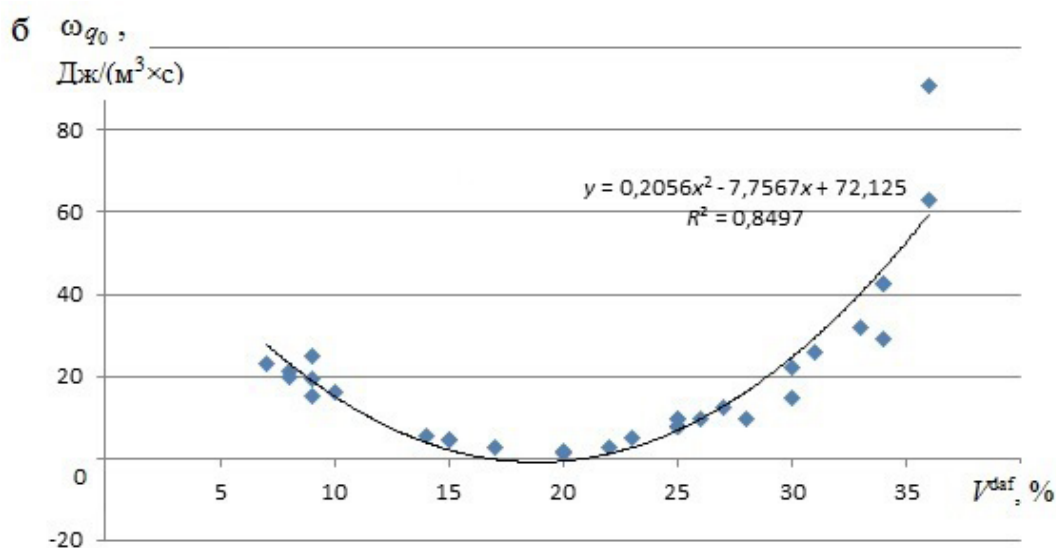


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения  $\omega_{q_0}$  от степени метаморфизма углей:

а) 3 сут от начала процесса адсорбции; б) 10 сут от начала процесса адсорбции

В отличие от ранее выполненных проведенные исследования позволили детальнее изучить механизм самовозгорания углей.

Полученная зависимость будет использована для определения температуры самовозгорания углей различной степени метаморфизма.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Проанализированы данные теплоты окисления различных углей шахт Донбасса, изучена кинетика адсорбции и окисления газонасыщенных углей разной степени метаморфизма. На основе проведенных исследований степени разделения поглощенного углями кислорода и вступившего в реакцию окисления впервые сформулировано новое понятие «скорость тепловыделения сорбента (угля)». Определена доля кислорода  $\delta$ , вступившего в реакции окисления с углями разной степени метаморфизма, которая в процессе адсорбции неуклонно уменьшается, а общая адсорбция увеличивается до наступления сорбционного равновесия.

Полученные результаты позволят научно обосновать рекомендации по прогнозу эндогенной пожароопасности угольных скоплений.

#### Список литературы / References

1. Пашковский, П. С. Эндогенные пожары на угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк : Ноулидж, 2013. – С. 792.

Pashkovskiy P. S. *Endogennyye pozhary na ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ., 2013, 792 p. (In Russian)

2. Греков, С. П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С. П. Греков, П. С. Пашковский, В. П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46 – 50.

Grekov S. P., Pashkovskiy P. S., Orlikova V. P. *Teplovoy effect okisleniya ugley i endogennaya pozharoopasnost* [Heat effect of coal oxidation and spontaneous fire hazard]. *Ugol Ukrainy*, 2014, no. 10, pp. 46-50. (In Russian)

3. Греков, С. П. Графо-аналитический способ определения инкубационного периода самовозгорания угля / С. П. Греков, Б. Н. Кошовский, А. А. Всякий // Уголь Украины. – 2010. – № 11. – С. 34 – 38.

Grekov S. P., Koshovskiy B. N., Vsyakiy A. A. *Grafo-analiticheskiy sposob opredeleniya inkubatsionnogo perioda samovozgoraniya uglya* [Graph-analytical method for determination of incubation period of coal spontaneous combustion]. *Ugol Ukrainy*, 2010, no. 11, pp. 34-36. (In Russian)

4. Греков, С. П. Параметры низкотемпературного окисления угля разной степени метаморфизма / С. П. Греков, В. П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2022. – № 3(59). – С. 7 – 17.

Grekov S. P., Orlikova V. P. *Parametry nizkotemperaturnogo okisleniya uglya raznoy stepeni metamorfizma* [Parameters of low-temperature oxidation of coal with different grades of metamorphism]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2022, no. 3(59), pp. 7-17. (In Russian)

5. Карнаухов, А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов / А. П. Карнаухов. – Новосибирск : Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 470 с.

Karnaukhov A. P. *Adsorbtsiya. Tekstura dispersnykh i poristykh materialov* [Adsorption. Texture of dispersion and porous materials]. Novosibirsk : Nauka. Sib. Predpriyatiye RAN, 1999, 470 p. (In Russian)

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

Ageyev V. G., Pashkovskiy P. S., Grekov S. P. *Profilaktika endogennoy pozharoopasnosti : monografiya* [Prevention of spontaneous fire hazard : monograph]. Donetsk, 2020, 592 p. (In Russian)

**Svyatoslav Pavlovich Grekov**, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher;  
**Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko**, head of department;  
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”  
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 340-97-96

## INVESTIGATION OF OXIDATION HEAT EFFECT KINETICS OF GAS-SATURATED COAL OF DONETS BASIN

**Purpose.** To study the kinetics of oxidation heat effect of gas-saturated coal with different grades of metamorphism following the separation of adsorption kinetics and chemisorption of oxygen.

**Methods.** Mathematical modeling of oxidation heat effect of gas-saturated coal based on experimental results of adsorption kinetics and oxygen chemisorption.

**Results.** The dependence of heat formation rate on the grade of coal metamorphism has been established for determination of spontaneous ignition temperature of coal with different grades of metamorphism.

**Scientific novelty.** The novel term “heat release rate of sorbent (coal)” has been proposed following the conducted earlier investigations of heat of the gas-saturated coal oxidation reaction, the study of separation extent of the oxygen adsorbed by coal and the one entered the oxidation reaction for the first time.

**Practical value.** The obtained results will make it possible to substantiate scientifically the recommendations on prediction the spontaneous fire hazard of coal accumulations.

**Keywords:** *adsorption; diffusion; reaction; mathematical modeling; heat effect of oxidation; heat release rate.*

## УДК 622.822.7:614.844.2"Тонкораспыленная вода"

*Андрей Юрьевич Коляда, нач. отд.; e-mail: kolyada1980@mail.ru;*

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

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

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

*Олег Игоревич Коврижкин, командир; e-mail: metro-1973@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Оперативный военизированный горноспасательный отряд г. Донецк» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, пер. Николенко, 7. Тел.: (+7 856) 343-52-64*

## ФЛЕГМАТИЗАЦИЯ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

**Цель.** Обосновать параметры подачи тонкораспыленной воды для флегматизации зоны пламенного горения и ликвидации пожара в горных выработках и других протяженных подземных объектах.

**Методы.** Аналитический метод исследования, включающий анализ и обобщение результатов выполненных ранее исследований; математическое моделирование; теоретические методы, основанные на законах тепломассопереноса.

**Результаты.** Получены зависимости для определения скорости распространения и длины зоны пламенного горения в горной выработке, времени жизни капли и скорости генерации пара с учетом размеров капель тонкораспыленной воды. Сравнение скоростей генерации пара и воздушного потока в горной выработке позволяет определить необходимый расход пара в зоне пламенного горения.

**Научная новизна.** Впервые установлены зависимости длины и объема зоны горения от вида горючего материала в аварийной выработке определен необходимый расход пара, образующегося в зоне горения, для флегматизации зоны пламенного горения.

**Практическая значимость.** На основе анализа результатов исследования будут разработаны технические требования к установке для флегматизации зоны пламенного горения при подземных пожарах.

**Ключевые слова:** *подземный пожар; зона горения; зона пиролиза; завеса; флегматизация; тонкораспыленная вода; пароводяная завеса.*

**Постановка проблемы.** Анализ аварийности на угольных шахтах за 2020 г., проведенный ГВГСС Донецкой Народной Республики, показывает, что ликвидация пламенного горения в горной выработке – до сих пор нерешенная проблема.

Для начала активной ликвидации зоны горения горноспасателям необходимо «догнать» развивающийся пожар и воздействовать на него огнетушащими веществами. Скорость развития пожара может быть такова, что пожар уходит вперед, воспламеняя новые участки. Чтобы предотвратить дальнейшее развитие пожара, применяют локализацию, то есть размещение в зоне пламенного горения установок, распыляющих воду и снижающих температуру потока пожарных газов до безопасной величины. Однако даже при локализации пожара приступить к активному тушению зоны горения горноспасатели не всегда могут из-за высоких температур и задымленности в зоне тления, находящейся перед зоной горения.

Поэтому более эффективный способ тушения пожара – применение флегматизации пламенного горения, что обеспечит подачу тонкораспыленной воды непосредственно в очаг горения. Капли испаряющейся тонкораспыленной воды образуют водяной пар, который вытесняет кислород из зоны горения, и таким образом ликвидируется пожар.

**Анализ последних публикаций.** Преимущество тушения пламенного горения тонкораспыленной водой состоит в образовании большого количества пара в объеме, превышающем начальный объем капель в 1640 раз [1]. Малый диаметр капель (50...100 мкм) обеспечивает практически мгновенное их испарение и распространение образующегося пара по всему объему зоны горения и его флегматизацию [2].

Результаты исследований процесса охлаждения пожарных газов для локализации пожара представлены в нормативных документах по обеспечению пожарной безопасности угольных предприятий [3].

**Цель исследования** – установить параметры подачи тонкораспыленной воды для флегматизации зоны пламенного горения и ликвидации пожара в горных выработках и других протяженных подземных объектах.

**Изложение основного материала.** Пожар в проветриваемой горной выработке условно разделен на ряд зон по степени теплового воздействия на горючий материал (рис. 1):

- зона «А» – выгоревший участок. Характеризуется полным выгоранием горючего материала и снижением температуры ниже 473 К;
- зона «Б» – зона тления, где происходит догорание горючей нагрузки, температура ниже 553 К;
- зона «В» – зона пламенного горения, в которой температура может достигать 1500 К и выше;
- зона «Г» – зона пиролиза, где происходит активное разложение (пиролиз) горючих материалов, выделяются горючие газы и летучие продукты пиролиза. Температура в этой зоне может достигнуть 553...773 К;
- зона «Д» – зона предварительного нагрева и начала пиролиза горючих материалов, выделение которых незначительно, а температура не превышает 553 К.

Среди способов тушения тонкораспыленной водой доминирует флегматизация пожара паром.

В зоне пламенного горения образуется значительное количество водяного пара, флегматизирующего горение, уменьшается концентрация кислорода, скорость его диффузии к реакционным центрам. Это приводит к снижению интенсивности реакции горения и количества выделяющейся теплоты.

В условиях подземного пожара в горной выработке флегматизация особенно эффективна, поскольку ограничивающая объект поверхность препятствует утечкам образующегося пара за пределы зоны горения [4, 5].

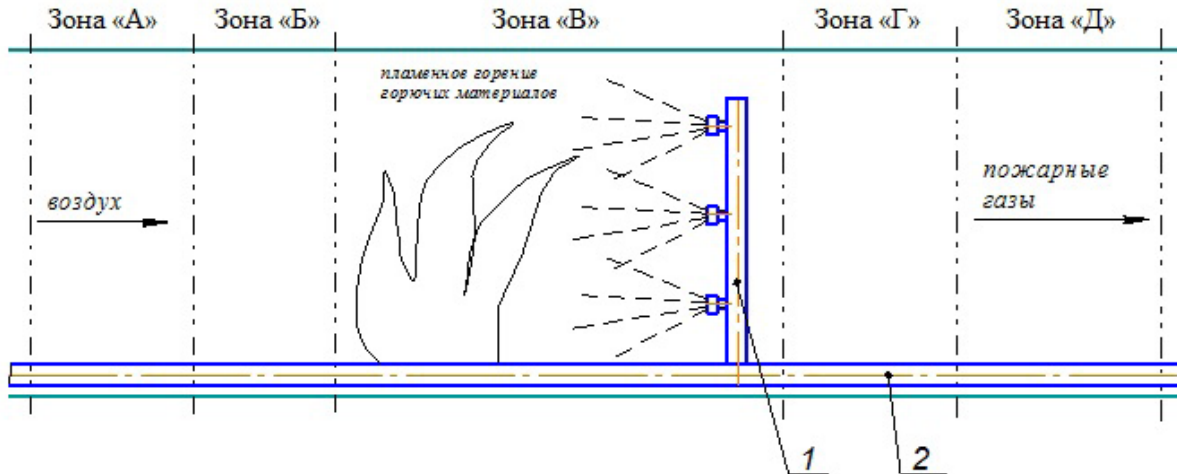


Рис. 1. Структурная схема зон пожара в проветриваемой горной выработке:  
1 – тонкораспыленная вода; 2 – противопожарный трубопровод

При испарении 1 мл воды образуется  $\frac{1}{18}$  моль водяного пара, что эквивалентно  $1,244 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.

Для снижения концентрации кислорода до 15 % в зону пламенного горения необходимо подать объем пара  $V_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>, равный

$$V_{\text{п}} = \frac{C_0 - C_{\text{к}}}{100} V_{\text{гор}},$$

где  $C_0$  – доля кислорода в воздухе, поступающего в зону горения, %;

$C_{\text{к}}$  – доля кислорода в воздухе, на выходе из зоны горения, %;

$V_{\text{гор}}$  – объем зоны горения, м<sup>3</sup>.

В работе [6] получено уравнение для определения длины зоны горения подземного пожара  $L$ , м:

$$L = \frac{v_{\text{в}} S (C_0 - C_{\text{к}}) \rho_{\text{к}}}{P_{\text{гор}} \omega_{\text{гор. O}_2}},$$

где  $v_{\text{в}}$  – скорость воздушного потока, поступающего в зону горения, м/с;

$S$  – площадь поперечного сечения выработки в свету, м<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{к}}$  – плотность кислорода, кг/м<sup>3</sup>;

$P_{\text{гор}}$  – часть периметра выработки, имеющая пожарную нагрузку, м;

$\omega_{\text{гор. O}_2}$  – удельная скорость выгорания кислорода, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Из уравнения баланса расхода кислорода получено значение скорости распространения пожара  $v_{\text{п}}$ , м/с,

$$v_{\text{п}} = \frac{v_{\text{в}} S \rho_{\text{к}} (C_0 - C_{\text{к}})}{v B_3},$$

где  $v$  – стехиометрический коэффициент;

$B_3$  – пожарная нагрузка на 1 погонный метр, кг/м.

Следовательно, объем пара можно найти по формуле

$$V_{\Pi} = LS.$$

Объем пара, необходимый для флегматизации зоны горения,

$$V_{\Pi} = \frac{6 \cdot 10^{-2} v_B S^2 \rho_K}{P_{\text{Гор}} \omega_{\text{Гор.О}_2}}.$$

Примем диаметр капли тонкораспыленной воды, равный  $d_K$ , м, тогда общее число капель, необходимых для флегматизации зоны горения, составит:

$$N_K = \frac{2,89 \cdot 10^4 v_B S^2 \rho_K}{\pi d_K^3 P_{\text{Гор}} \omega_{\text{Гор.О}_2}}.$$

В работе [7] получено выражение для определения времени жизни капли  $\tau_K$ , с (время нагрева  $\tau_H$ , с, плюс время полного испарения  $\tau_{\text{ис}}$ , с),

$$\tau_K = \tau_H + \tau_{\text{ис}} = \frac{\rho_B c_B d_K}{3\lambda} \ln \left( \frac{T_{\Phi} - T_{K0}}{T_{\Phi} - T_{\text{кип}}} \right) + \left( \frac{R_B \rho_B d_K^2}{2\lambda (T_{\Phi} - T_{\text{кип}})} \right),$$

где  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$c_B$  – удельная теплоемкость воды, кг/м<sup>3</sup>;

$T_{K0}$  – начальная температура капли, К;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности пожарных газов, Вт/(м·К);

$R_B$  – удельная теплота парообразования воды, Дж/кг;

$T_{\Phi}$  – температура в зоне горения (в зависимости от вида горючих материалов), К;

$T_{\text{кип}}$  – температура кипения воды, К.

Время генерации пара (при допущении, что все капли тонкораспыленной воды, попадающие в зону горения, испаряются одновременно)  $\tau_{\text{ген}}$ , с,

$$\tau_{\text{ген}} = \tau_K.$$

Вентиляционным потоком образующийся пар выносится из зоны горения  $\tau_B$ , с,

$$\tau_B = \frac{v_B S^2 (C_0 - C_K) \rho_K}{v_{\Pi} P_{\text{Гор}} \omega_{\text{Гор.О}_2}}.$$

Поскольку  $\tau_{\text{ген}} \ll \tau_B$ , то за время выноса пар может быть генерирован не менее  $\frac{\tau_B}{\tau_{\text{ген}}}$  раз.

Расход пара тонкораспыленной воды  $q_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>/с, составит

$$q_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{\tau_{\text{ген}}}. \quad (1)$$

Таким образом, для ликвидации пламенного горения в зону «В» (см. рис. 1) должна быть подана тонкораспыленная вода с расходом, определяемым по уравнению (1). Это исключит возможность распространения пламени вдоль выработки.

#### **Выводы.**

1 В результате проведенных исследований установлены зависимости длины и объема зоны горения от вида горючего материала в аварийной выработке, скорости их выгорания, скорости воздушного потока в системе вентиляции и в сечении выработки; определен необходимый расход пара, образующегося в зоне горения, для флегматизации зоны пламенного горения.

2. Необходимо провести исследования материального баланса водяного пара и пожарных газов для расчета времени флегматизации аварийного участка.

#### Список литературы / References

1. Цариченко, С. Г. Проблемы использования тонкораспыленной воды в автоматических установках пожаротушения / С. Г. Цариченко // Алгоритм безопасности. – 2005. – № 5.

Tsarichenko S. G. *Problemy ispolzovaniya tonkoraspylyonnoy vody v avtomaticheskikh ustanovkakh pozharotusheniya* [Problems of using the atomized water in automatic fire extinguishing units]. *Algoritm bezopasnosti*, 2005, no. 5, 64 p. (In Russian)

2. Гергель, В. И. Пожаротушение тонкораспыленной водой / В. И. Гергель, Е. А. Мешалкин // Материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Часть 2. Горение и проблемы тушения пожаров. – М. : ВНИИПО, 2017. – С. 369 – 372.

Gergel V. I., Meshalkin Ye. A. *Pozharotusheniye tonkoraspylyonnoy vodoy* [Atomized water fire extinguishment]. *Materialy XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 80-letiyu FGBU VNIPO MChS Rossii. Chast 2. Goreniiye i problemy tusheniya pozharov*. Moscow, VNIPO Publ., 2017, pp. 369-372. (In Russian)

3. Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР : утв. МЧС ДНР 31.05.2016 № 517. – Донецк : НИИГД «Респиратор», 2016. – 304 с.

*Pravila pozharnoy bezopasnosti dlya predpriyatiy ugolnoy promyshlennosti DNR : utv. MChS DNR 31.05.2016 № 517* [Fire safety regulations for mining industry

enterprises of the Donetsk People's Republic as amended by MChS of the DPR of May 31, 2016 № 517]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016, 304 p. (In Russian)

4. Цариченко, С. Г. Некоторые вопросы пожаротушения тонкораспыленной водой / С. Г. Цариченко // Средства спасения. Противопожарная защита. – 2004. – № 10. – С. 203 – 205.

Tsarichenko S. G. *Nekotorye voprosy pozharotusheniya tonkoraspylyonnoy vodoy* [Some of the questions on atomized water fire extinguishment]. *Sredstva spaseniya. Protivopozharnaya zashchita*, 2004, no. 10, pp. 203-205. (In Russian)

5. Душкин, А. Л. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин, С. Е. Ловчинский // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 11. – С. 53 – 55.

Dushkin A. L., Lovchinskiy S. Ye. *Vzaimodeystviye plameni goryuchey zhidkosti s tonkoraspylyonnoy vodoy* [Interaction of flammable liquid flame with atomized water]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53-55. (In Russian)

6. Коляда, А. Ю. Развитие подземных пожаров и требования к активным средствам их тушения / А. Ю. Коляда // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – № 3(27). – С. 11 – 15.

Kolyada A. Yu. *Razvitiye podzemnykh pozharov i trebovaniya k aktivnym sredstvam ikh tusheniya* [Development of underground fires and requirements on active means of their extinguishing]. *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity*, 2021, no. 3(27), pp. 11-15. (In Russian)

7. Коляда, А. Ю. Параметры тушения пожаров тонкораспыленной водой / А. Ю. Коляда, И. Ф. Дикенштейн, Д. А. Тимошенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2022. – № 1(59). – С. 34 – 43.

Kolyada A. Yu., Dikenshteyn I. F., Timoshenko D. A. *Parametry tusheniya pozharov tonkoraspylyonnoy vodoy* [Parameters of atomized water extinguishment of fires]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. Donetsk, 2022, no. 1(59), pp. 34-43. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С. П. Грековым  
Дата поступления рукописи 23.11.2022

**Andrey Yuryevich Kolyada**, head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

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

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

*Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”*

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-40

**Oleg Igorevich Kovrizhkin**, commander; e-mail: metro-1973@mail.ru

State Budgetary Institution “Donetsk City Emergency Para-military Mine-Rescue Unit

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence, *Emergencies*

*and Elimination of Consequences of Natural Disasters*

283048, Donetsk, 7, pereulok Nikolenko. Phone (+7 856) 343-52-64

## PHLEGMATIZING THE FLAMING COMBUSTION IN A MINE WORKING

**Purpose.** To substantiate the parameters of atomized water delivery for phlegmatizing the flaming combustion area and elimination of a fire in the mine workings and other extensive underground facilities.

**Methods.** The analytical method of investigation that includes analysis and generalization of the previously conducted investigations results; mathematical modeling; theoretical methods based on the heat and mass transfer laws.

**Results.** The dependences for determining the rate of spreading and length of the flaming combustion area in the mine working have been obtained; lifetime of a drop and vapour generation rate factoring in the size of the atomized water drops. The comparison of the vapour generation rate and the air flow velocity in the mine working makes it possible to determine the required vapour consumption in the flaming combustion area.

**Scientific novelty.** The novel dependences of the length and volume of the combustion area on a type of flammable material contained in the emergency mine working have been established; the required rate of vapour generated in the combustion area has been determined for phlegmatizing the flaming combustion area.

**Practical value.** Based on the analysis of the investigation results the engineering specifications on the installation for phlegmatizing the flaming combustion area in case of the underground fires are to be developed.

**Keywords:** *underground fire; combustion area; pyrolysis zone; screen; phlegmatizing; atomized water; vapour water screen.*

### III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 622.867.322

*Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, первый заместитель директора*

*(по научной работе); e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;*

*Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: lzborshik@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*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 949) 332-78-45*

#### СИСТЕМА КИСЛОРОДОПИТАНИЯ ИЗОЛИРУЮЩЕГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО РЕСПИРАТОРА С ОПТИМАЛЬНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА

**Цель.** Разработать изолирующий регенеративный респиратор с оптимальным содержанием кислорода (до 60 %) в газовой смеси для увеличения времени защитного действия.

**Методы.** Экспериментальные и аналитические методы исследований динамики потоков газовой смеси при различных конструктивных изменениях изолирующих регенеративных респираторов.

**Результаты.** Разработаны функциональные схемы респиратора с параллельным и последовательным расположением регенеративного и поглотительного патронов, проведены экспериментальные исследования изменения потоков в воздухопроводной системе на динамической установке с «искусственными легкими». Предложена функциональная схема респиратора с параллельным и последовательным расположением регенеративного и поглотительного патронов и клапаном перепуска, что позволило увеличить время защитного действия аппарата.

**Научная новизна.** На основании результатов сравнительных исследований функциональных схем респиратора с параллельным и последовательным расположением регенеративного и поглотительного патронов впервые разработана конструкция респиратора с клапаном перепуска для изменения потоков газовой смеси в воздухопроводной системе респиратора пропорционально содержанию кислорода.

**Практическая значимость.** Выполненные исследования позволяют определить направления совершенствования конструкции регенеративного респиратора с оптимальным содержанием кислорода и устранить недостатки в конструкции респиратора.

**Ключевые слова:** *дыхательный аппарат; респиратор; химически связанный кислород; надпероксид калия; химический поглотитель известковый.*

**Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.** Изолирующие регенеративные респираторы широко используются горноспасателями для защиты органов дыхания при выполнении аварийно-спасательных работ в непригодной для дыхания среде.

Степень безопасности дыхания в респираторе во многом зависит от газового состава воздуха, циркулирующего в замкнутой системе «респиратор – органы дыхания человека».

Согласно требованиям ГОСТ Р 12.4.253-2011 «ССБТ. СИЗОД. Автономные изолирующие дыхательные аппараты со сжатым и с химически связанным кислородом для горноспасателей. Общие технические условия» объемная доля кислорода во вдыхаемой газовой смеси должна быть не менее 20 %. Допускается также снижение объемной доли кислорода до 17 % на время не более 3 мин (в начальный период и в конце испытания). Данный стандарт регламентирует и верхнюю границу содержания кислорода (не более 60 %), что обусловлено нарушениями окислительно-восстановительных процессов в организме человека при длительном дыхании воздухом с высокими концентрациями кислорода. В некоторые периоды работы в изолирующем дыхательном аппарате концентрация кислорода может составлять 90...95 % [1].

Известно, что при длительном вдыхании газовой смеси с высоким содержанием кислорода наблюдается явление гипероксии (повышенное содержание (давление) кислорода в тканях организма вследствие увеличения его содержания во вдыхаемом воздухе, легких и крови). Гипероксия характеризуется развитием комплекса физиологических реакций и патологических нарушений.

Начальные реакции организма в гипероксических условиях – физиологические и имеют приспособительное значение. Происходит урежение дыхания и сердечного ритма, снижение объема легочной вентиляции, систолического и минутного объема сердца, сужение сосудов сетчатки глаза и головного мозга, депонирование крови в паренхиматозных органах, уменьшение объема циркулирующей крови и т. д. Эффективность подобных защитных реакций относительна, поскольку они нередко осложняются развитием противоположных реакций. Так, сужение капилляров и замедление кровотока приводят не только к уменьшению нарастания парциального давления кислорода в тканях, но и к задержке в них углекислоты, то есть к гиперкапнии, которая вызывает расширение сосудов, нивелируя тем самым защитную сосудистую реакцию на кислород.

С увеличением парциального давления кислорода в гипероксических средах и удлинением времени воздействия развиваются патологические реакции, способные перерасти в кислородное отравление.

Токсическое действие кислорода при использовании дыхательных аппаратов может проявиться общетоксической формой, развивающейся при парциальном давлении кислорода в пределах 1...4 атм, когда не успевают прогрессировать легочные поражения и судороги, а патологические нарушения наблюдаются со стороны многих органов и тканей.

Токсический эффект избытка кислорода – функция уровня парциального давления кислорода и времени действия. Безопасная экспозиция нормобарической гипероксии для здорового человека составляет несколько часов. При парциальном давлении кислорода более 0,3 МПа симптомы кислородного отравления могут развиваться через несколько минут.

Наиболее ранним объективным признаком поражения кислородом легких считают снижение жизненной емкости легких, обусловливаемое как боязнью усиления болей и возникновения кашля при глубоком вдохе, так и образованием диффузных мелкоочаговых ателектазов (спадений ткани легкого).

Кислород оказывает токсическое действие и на другие органы и системы организма (кровеносная система, сердце и др.). Снижается осмотическая резистентность эритроцитов, уменьшается ферментная активность лимфоцитов, фагоцитарная активность нейтрофилов. Нередко изменяется ЭКГ: увеличивается амплитуда зубцов Т и уширяются зубцы Р.

Поэтому при ведении работ большой продолжительности должны применяться СИЗОД, обеспечивающие концентрацию кислорода, близкую к физиологической.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При выполнении аварийно-спасательных работ в непригодной для дыхания среде применяют средства индивидуальной защиты органов дыхания – изолирующие респираторы, конструкция которых совершенствовалась на протяжении длительного времени и продолжается в настоящем [2].

Вопрос снижения содержания кислорода во вдыхаемой из респиратора газовой смеси прорабатывался с XX века. Среди последних разработок – изолирующий дыхательный аппарат РТ-2СБР с химически связанным кислородом со сбалансированной регенерацией выдыхаемой газовой смеси [3], у которого в отличие от других респираторов с химически связанным кислородом отсутствует сброс дыхательной смеси в окружающую среду и создается оптимальная (20...50 %) объемная доля кислорода во вдыхаемой газовой смеси. Респиратор отличается экономным использованием регенеративного продукта, расход которого в два раза меньше, чем в обычных респираторах с химически связанным кислородом. В связи с этим значительно уменьшено тепловыделение.

Респиратор РТ-2СБР имеет регенеративный и поглотительный патроны, два мешка выдоха, мешок вдоха, узел балансировки с клапаном перепуска, обеспечивающий изменение объемного расхода потоков газовой смеси через регенеративный и поглотительный патроны в зависимости от наполнения второго дыхательного мешка выдоха.

Для реализации Концепции совершенствования газодымозащитной службы в системе ГПС МЧС Российской Федерации и Концепции совершенствования пожарных автомобилей и их технической эксплуатации в системе ГПС МЧС РФ разработан дыхательный аппарат «ДАСК-КАМПО» [4], который обеспечивает пользователя обогащенной кислородом газовой смесью с содержанием кислорода не более 40 %. Конструкция аппарата предусматривает применение датчика парциального давления кислорода и блока управления (мобильного блока), подающего команды на пневмоклапан, включающий дополнительную

подачу кислорода. Такая конструкция позволяет осуществлять достаточно тонкую подстройку подачи кислорода, однако требует применения сложных и дорогостоящих электронных датчиков, которые к тому же должны быть работоспособными в специфических условиях угольной шахты.

**Цель исследования** – разработать изолирующий регенеративный респиратор с оптимальным содержанием кислорода (до 60 %) в газовой смеси для увеличения времени защитного действия.

**Результаты исследований.** В процессе проработки схемных решений дыхательного аппарата с оптимальной концентрацией кислорода для снижения объемной доли его во вдыхаемом воздухе были рассмотрены следующие варианты:

- а) снижение интенсивности выделения кислорода кислородсодержащим продуктом;
- б) разбавление дыхательной смеси воздухом;
- в) уменьшение пульсаций потока газовой смеси через регенеративный патрон.

Анализ этих схемных решений показал объективные сложности их реализации, что позволило определиться с выбором одного из трех вариантов.

Снижение интенсивности выделения кислорода надпероксидным калиевым продуктом типа ОКЧ (вариант «а») может быть достигнуто путем предварительного частичного осушения выдыхаемого человеком воздуха (влажность выдыхаемого воздуха фактически составляет 95...100 %) или очистки его от некоторого количества диоксида углерода перед подачей в регенеративный патрон с продуктом ОКЧ. Для этого в конструкцию респиратора необходимо включить патрон – осушитель  $\text{CO}_2$ .

Конструкция аппарата с предварительным частичным осушением выдыхаемого человеком воздуха требует специального устройства (например, патрона-осушителя), которое должно иметь возможность регулировки в зависимости от изменяющейся влажности.

Испытания дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом и большим временем защитного действия (далее – ВЗД) дают основание утверждать, что влажность воздуха в магистрали выдоха к концу ВЗД (приблизительно с 95 до 35 %) значительно изменяется (уменьшается). Следует учесть, что эти данные, полученные в лабораторных условиях на динамических установках, могут не учитывать особенности реального применения респираторов с периодически изменяющимися в процессе работы физическими нагрузками, в ходе которых влажность (как и содержание диоксида углерода) в магистрали выдоха периодически изменяется в значительных пределах. В связи с вышеизложенным устройство осушения должно иметь возможность регулировки режима работы и постоянного контроля влажности воздуха в воздухопроводной системе респиратора. Это потребует применения компактных электронных устройств в ударо-пыле-влаго-взрывобезопасном исполнении,

чтобы применять их в условиях горных выработок во время аварийно-спасательных работ.

Разбавление кислородной дыхательной смеси воздухом (вариант «б») потребует оснащения конструкции респиратора воздушным баллоном увеличенной емкости. Дыхательные аппараты с воздушными баллонами имеют высокую удельную массу (отношение массы аппарата к ВЗД), поэтому у данного варианта конструкции будет увеличенная масса, что весьма нежелательно.

Уменьшение пульсаций потока газовой смеси через регенеративный патрон (вариант «в») возможно осуществить применением в респираторе двух патронов: с кислородсодержащим продуктом и с поглотителем диоксида углерода. Количество воздуха, проходящего через каждый из патронов, регулируется автоматически управляемым клапаном. Принимая во внимание опыт НИИ «Респиратор» в создании дыхательных аппаратов с химически связанным и со сжатым кислородом, данный вариант конструкции считаем перспективным для реализации в разрабатываемом образце.

Специалистами НИИ «Респиратор» разработаны функциональные схемы респиратора (рис. 1), имеющие параллельное и последовательное расположение патронов.

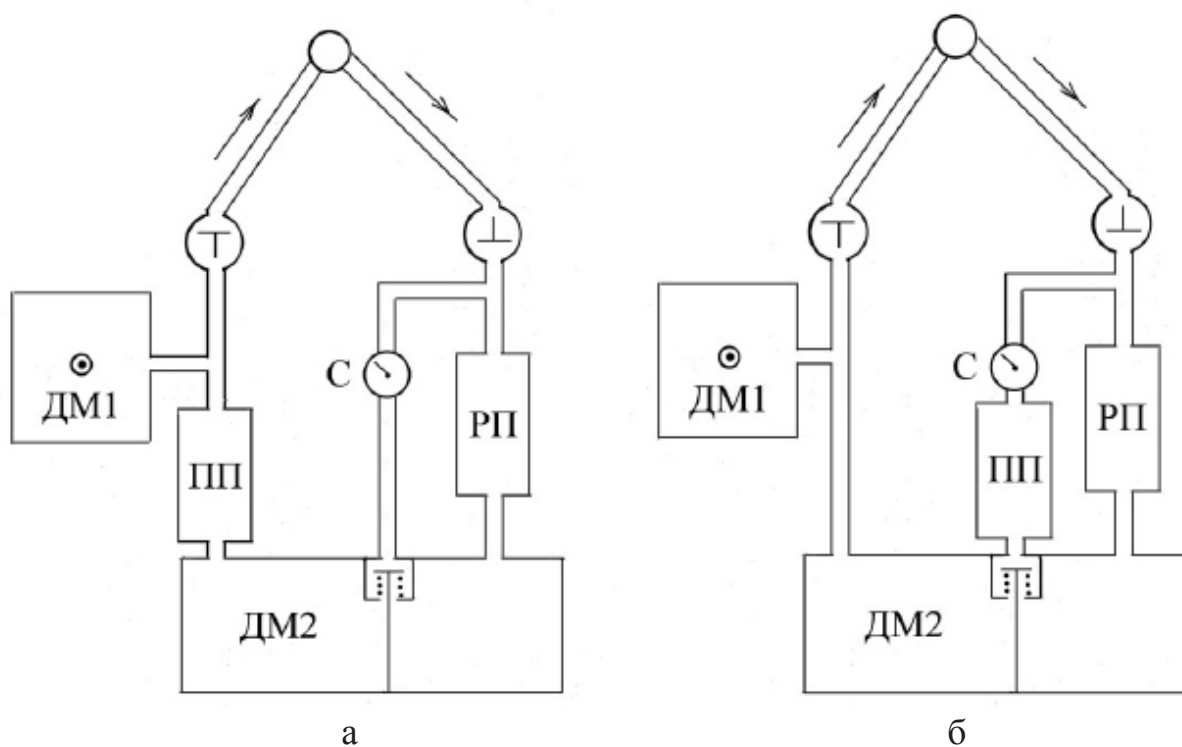


Рис. 1. Функциональные схемы респиратора:

а – с последовательным расположением патронов; б – с параллельным расположением патронов; РП – патрон регенеративный (с ОКЧ); ПП – патрон поглотительный (с ХП-И); ДМ1 – мешок дыхательный вдоха; ДМ2 – мешок дыхательный выдоха; С – спирометр

При разработке дыхательных аппаратов одним из главных вопросов становится усовершенствование конструкции регенеративных и поглотительных

патронов. Заряд продукта в патроне ориентировочно определен следующим образом. Согласно пп. 8.22.2 ГОСТ Р 12.4.253 при работе средней тяжести человек выдыхает  $1,0 \text{ дм}^3$  диоксида углерода в минуту. Если номинальное ВЗД дыхательного аппарата должно быть не менее 2 ч (120 мин), а фактическое ВЗД аппарата должно превышать номинальное ВЗД не менее чем на 10 %, то фактическое ВЗД должно составлять не менее 132 мин. Таким образом, регенеративный патрон с кислородсодержащим продуктом должен за ВЗД поглотить  $132 \text{ дм}^3$  диоксида углерода.

Сорбционная емкость продукта ОКЧ-3 составляет  $75 \text{ дм}^3/\text{кг}$  [5]. Следовательно, масса продукта в регенеративном патроне должна быть не менее  $1,76 \text{ кг}$

$$132 \text{ дм}^3 : 75 \text{ дм}^3/\text{кг} = 1,76 \text{ кг}.$$

Объем кислорода, выделяющегося при этом, составит

$$190 \text{ дм}^3/\text{кг} \cdot 1,76 \text{ кг} = 335 \text{ дм}^3.$$

Поскольку в предлагаемых схемах конструкции респиратора задействован и патрон с поглотителем диоксида углерода, принято решение об использовании в лабораторных условиях регенеративного патрона из шахтных самоспасателей ШСС-1П, в котором масса кислородсодержащего продукта всего  $0,9 \text{ кг}$ , то есть в два раза меньше расчетной величины. Исходя из этого, объем выделяющегося кислорода составит

$$190 \text{ дм}^3/\text{кг} \cdot 0,9 \text{ кг} = 171 \text{ дм}^3.$$

Анализ данных по теоретической удельной сорбционной емкости поглотителей позволяет сделать предположение, что в разрабатываемом дыхательном аппарате масса ХП-И должна быть в два раза меньше массы ОКЧ. Однако очевидно, что свое влияние на сорбцию диоксида углерода должны оказывать химическая активность сорбентов и другие факторы (конструкция патронов, условия протекания реакций). Поэтому более точные данные о массе сорбентов могут быть получены только в результате экспериментальных исследований разрабатываемого образца.

Масса поглотителя в патроне (картридже) респиратора Р-30 составляет  $2,0 \dots 2,2 \text{ кг}$ . Статическая (составляющая около 70 % от стехиометрической) активность ХП-И по диоксиду углерода –  $210 \dots 215 \text{ дм}^3/\text{кг}$ , то есть заряд ХП-И, равный  $2,0 \dots 2,2 \text{ кг}$ , способен поглотить  $\text{CO}_2$  объемом  $420 \dots 460 \text{ дм}^3$ .

Следует отметить, что ХП-И не только не поглощает влагу выдыхаемого воздуха, но и сам выделяет ее в процессе реакции сорбции  $\text{CO}_2$  (около  $0,05 \text{ кг/ч}$ ). Также воздух насыщается влагой, содержащейся в самом химическом известковом поглотителе (около  $0,03 \text{ кг/ч}$ ).

При последовательном расположении патронов (рис. 1а) выдыхаемый воздух вначале поступает в регенеративный патрон с ОКЧ, где происходит

поглощение диоксида углерода и выделение кислорода, затем – в дыхательный мешок выдоха. После того как дыхательный мешок выдоха наполнится и начнет срабатывать избыточный (перепускной) клапан, открывается обводная линия, которая обеспечивает движение газовой смеси мимо регенеративного патрона с ОКЧ непосредственно в дыхательный мешок выдоха. Газовоздушная смесь из дыхательного мешка выдоха, включающая в себя часть, прошедшую через регенеративный патрон с ОКЧ, и часть, прошедшую мимо него, поступает в поглотительный патрон с ХП-И. Разделение потоков позволяет снизить содержание кислорода в циркулирующей в респираторе газовой смеси.

При параллельном расположении патронов (рис. 1б) процесс регенерации вначале происходит аналогично, но, после того как дыхательный мешок выдоха наполнится и начнет срабатывать избыточный (перепускной) клапан, открывается воздуховодная линия, которая обеспечивает движение газовой смеси мимо патрона регенеративного с ОКЧ через патрон поглотительный ХП-И в дыхательный мешок выдоха. Газовоздушная смесь из дыхательного мешка, включающая в себя часть, прошедшую через регенеративный патрон с ОКЧ, и часть, прошедшую через поглотительный патрон с ХП-И, поступает на вдох пользователя. Здесь аналогично предыдущему варианту также имеет место разделение потоков газовой смеси.

Результаты испытаний функциональной схемы дыхательного аппарата с параллельным и последовательным соединением патронов представлены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний функциональной схемы дыхательного аппарата

Параметр	Образец с последовательным соединением патронов		Образец с параллельным соединением патронов	
	145	300	65	66
Время защитного действия, мин	145	300	65	66
Объем поданного диоксида углерода до проскока, дм <sup>3</sup>	163,3	361,0	108,4	78,4
Объемная доля кислорода на 1-й мин, %	19,4	48,1	17,6	15,6
Объемная доля кислорода в конце времени защитного действия, %	92,45	85,90	65,13	89,96
Сопротивление дыханию, мм вод. ст (вдох/выдох)	17/72	25/95	14/41	65/85
Объемная доля диоксида углерода на вдохе, %:				
• на 5-й мин;	0,39	0,05	0,28	0,96
• в конце времени защитного действия	0,70	0,88	1,50	1,67
Объем поглощенного диоксида углерода, дм <sup>3</sup>	–	350	–	–

Проведенные экспериментальные исследования показали значительное увеличение ВЗД аппарата с последовательным соединением патронов.

Для определения объемного расхода газовой смеси через поглотительный и регенеративный патроны на одной из магистралей дыхательного аппарата использован спирометр (газовый расходомер). Испытания показали, что при параллельном расположении патронов большая часть потока газовой смеси проходит через патрон с ОКЧ: через регенеративный патрон прошел в 12,5 раза больший объем газовой смеси, чем через поглотительный патрон. Такая разница в объемных расходах не могла быть обусловлена сопротивлением патронов, которое отличалось незначительно (96 Па в поглотительном патроне и 82 Па в регенеративном до опыта). При этом значительное превышение объема газовой смеси, проходящего через регенеративный патрон, по сравнению с поглотительным патроном сохранялось на протяжении всего эксперимента (рис. 2).

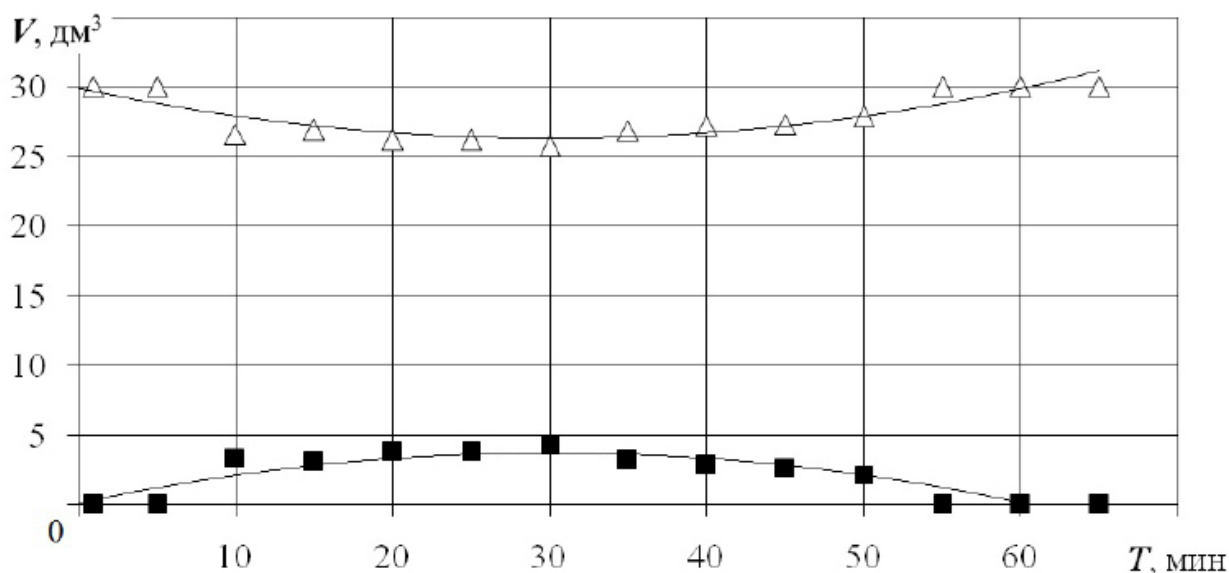


Рис. 2. Динамика потоков газовой смеси, проходящей через регенеративный и поглотительный патроны, при их параллельном расположении:

1 – через регенеративный патрон (с ОКЧ); 2 – через поглотительный патрон (с ХП-И)

Также испытания аппарата с параллельным соединением патронов показали, что до 100-й мин через оба патрона проходило равное количество газовой смеси за единицу времени. После 100-й мин наблюдалось значительное превышение потока газовой смеси (в 3...5 раз), проходящей через поглотительный патрон (с ХП-И), по сравнению с регенеративным патроном (с ОКЧ) (рис. 3). Такое изменение потоков может быть объяснено почти одинаковым сопротивлением патронов в начальный период работы образца респиратора и последующим увеличением сопротивления регенеративного патрона с ОКЧ по мере отработки продукта.

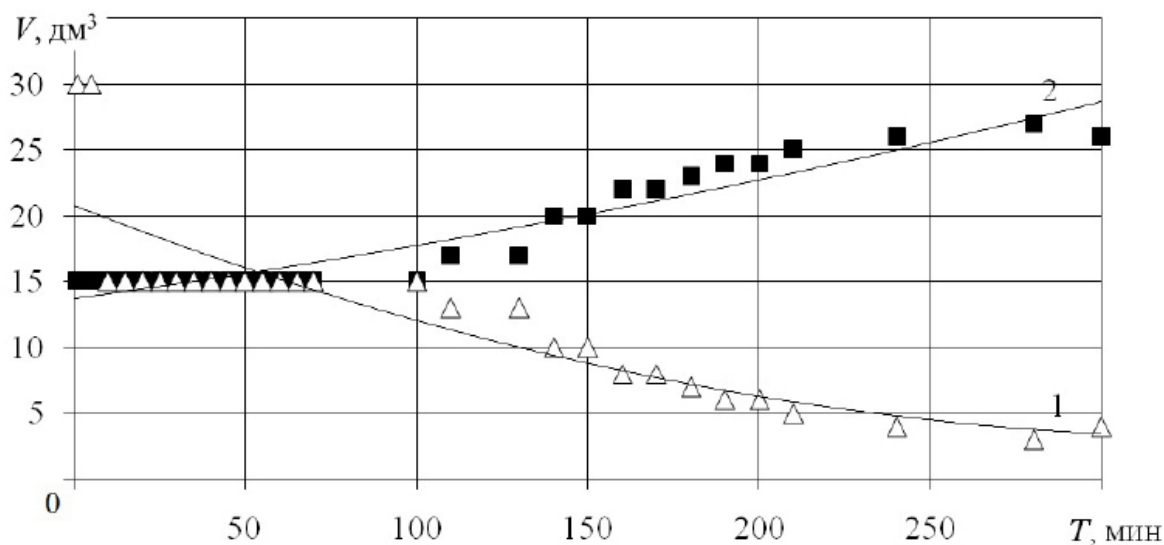


Рис. 3. Динамика потоков газовой смеси, проходящей через регенеративный и поглотительный патроны при их последовательном расположении:  
1 – через патрон регенеративный (с ОКЧ); 2 – через патрон поглотительный (с ХП-И)

Объемная доля кислорода в конце времени защитного действия сохранялась на высоком уровне у обоих образцов (рис. 4). Для устранения данного недостатка была разработана третья функциональная схема с параллельным расположением патронов и клапаном перепуска (рис. 5), который обеспечивает управление газовоздушными потоками в двух воздуховодных магистралях – с регенеративным и поглотительным патронами.

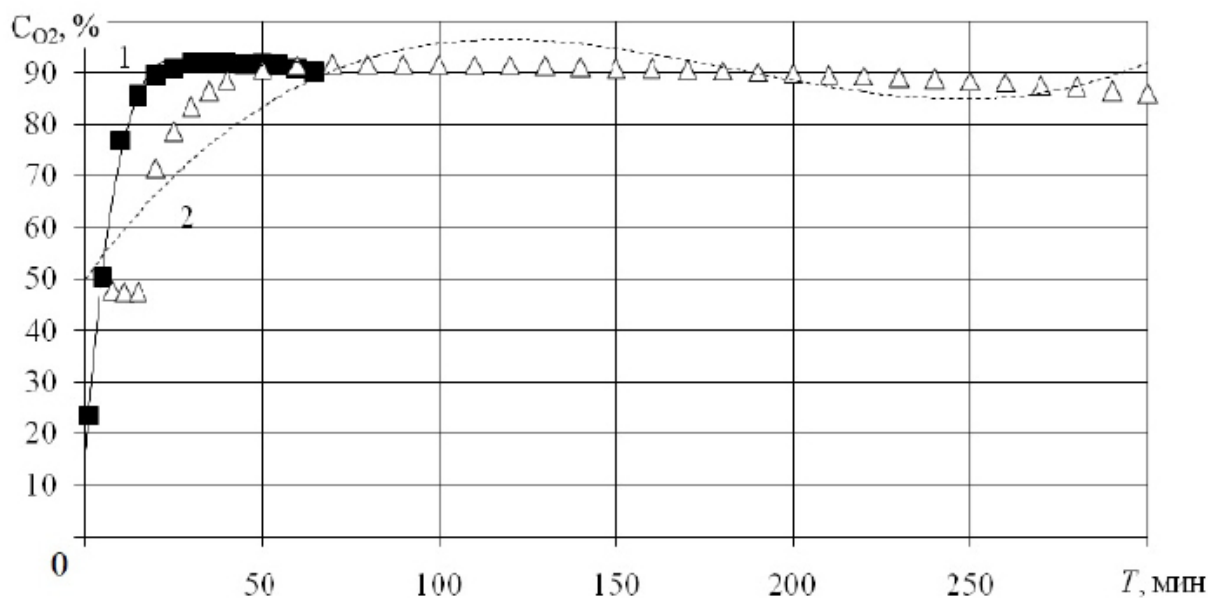


Рис. 4. Динамика содержания кислорода в респираторе с параллельным и последовательным расположением патронов:  
1 – респиратор с параллельным расположением патронов;  
2 – респиратор с последовательным расположением патронов

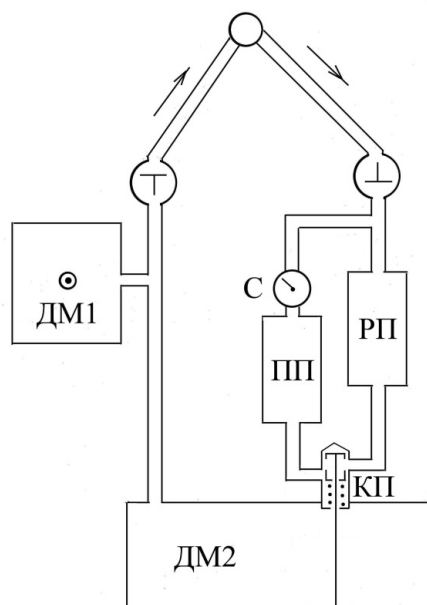


Рис. 5. Функциональная схема респиратора с параллельным расположением патронов и клапаном перепуска:  
 РП – патрон регенеративный (с ОКЧ); ПП – патрон поглотительный (с ХП-И);  
 ДМ1 – мешок дыхательный вдоха; ДМ2 – мешок дыхательный выдоха;  
 С – спирометр; КП – клапан перепуска

В схеме дыхательного аппарата с параллельным расположением патронов и клапаном перепуска обеспечивается перекрытие воздуховодной магистрали с регенеративным патроном в случае наполнения мешка дыхательного до максимального объема, в отличие от функциональных схем дыхательных аппаратов (см. рис. 1), в которых воздуховодная магистраль с регенеративным патроном всегда открыта.

В процессе срабатывания, когда запорная часть клапана находится в промежуточном положении, газоздушная смесь проходит через оба патрона пропорционально образуемым проходным сечениям.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Исследованы образцы респиратора с параллельной и последовательной схемами расположения патронов. Установлено, что респиратор с последовательным расположением патронов во время испытаний показал значительное увеличение времени защитного действия (до 300 мин). Однако содержание кислорода в респираторах обеих схем было на высоком уровне. Разработана новая функциональная схема (с параллельным расположением патронов и клапаном перепуска), в которой устранены отмеченные недостатки.

#### Список литературы / References

1. Батырев, В. В. Основы индивидуальной защиты человека от опасных химических и радиоактивных веществ : научно-методическое издание /

В. В. Батырев, Г. А. Живулин. – М. : ЦНИИ ЧС и ГО МЧС России, 2016. – 204 с.

Batyrev V. V., Zhivulin G. A. *Osnovy individualnoy zashchity cheloveka ot opasnykh khimicheskikh i radioaktivnykh veshchestv : nauchno-metodicheskoye izdaniye* [Basics of personal protection of a human against hazardous chemical and radioactive substances]. Moscow, TsNII ChS i GO MChS Rossii Publ., 2016, 204 p. (In Russian)

2. Брюханов, А. М. Совершенствование регенеративных респираторов / А. М. Брюханов, Р. С. Плетенецкий // Вестник Академии гражданской защиты. – 2020. – № 4(24). – С. 43 – 48.

Bryukhanov A. M., Pletenetskiy R. S. *Sovershenstvovaniye regenerativnykh respiratorov* [Improvement of regenerative breathing apparatuses]. Vestnik Akademii grazhdanskoй zashchity Press, 2020, no. 4(24), pp. 43-48. (In Russian)

3. Гудков, С. В. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования / С. В. Гудков, С. И. Дворецкий, С. Б. Путин, В. П. Таров. – М. : Машиностроение, 2008. – 188 с.

Gudkov S. V., Dvoretzkiy S. I., Putin S. B., Tarov V. P. *Izoliruyushchiye dykhatelnye apparaty i osnovy ikh proektirovaniya* [Self-contained breathing apparatuses and principles of their design]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008, 188 p. (In Russian)

4. Кулик, А. Ю. АО «КАМПО»: от КИП-5 до БЕТА-ГС / А. Ю. Кулик, П. Г. Смолин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий, Москва, 12 – 16 мая 2021 года. – М. : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. – С. 756 – 760.

Kulik A. Yu., Smolin P. G. *AO “KAMPO” : ot KIP-5 do BETA-GS* [AO “KAMPO” : from KIP-5 to BETA-GS]. *Aktualnye problemy pozharnoy bezopasnosti : materialy XXXIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy Godu nauki i tekhnologiy, Moskva, 12-16 maya 2021 goda*. Moscow, FGBU VNIIPО MChS Rossii Publ., 2021, pp. 756-760. (In Russian)

5. Диденко, Н. С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н. С. Диденко. – 2-е изд. – М. : Недра, 1990. – 160 с.

Didenko N. S. *Regenerativnye respiratory dlya gornospasatelnykh rabot. 2-e izd.* [Regenerative breathing apparatuses for mine-rescue operations. The 2<sup>nd</sup> edition]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 160 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 24.10.2022

*Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director (on science);*

*e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;*

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

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

*Viktor Ivanovich Frantsev, advanced engineer; e-mail: oszd\_niigd\_3@mail.ru*

*State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”*

*of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,*

*Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”*

*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-45*

## **OXYGEN FEEDING SYSTEM OF SELF-CONTAINED REGENERATIVE BREATHING APPARATUS WITH OPTIMUM OXYGEN CONTENT**

**Purpose.** Investigation of microclimate of inhaled air in the regenerative breathing apparatuses for accelerating the protective power time.

**Methods.** Experimental and analytical methods of investigations of dynamics of gas-air mix streams during various constructive changes in self-contained regenerative breathing apparatuses.

**Results.** The functional circuits of a breathing apparatus with parallel and sequential layout of regenerative and absorbing cartridges have been designed, the experimental investigations of changing the streams in the air system have been conducted on the “iron lungs” dynamic installation. The functional circuit of the breathing apparatus with parallel and sequential layout of the regenerative and absorbing cartridges and bypass valve has been proposed which will allow accelerating the apparatus protective power time.

**Scientific novelty.** Based on the results of the comparative investigations of the functional circuits of the breathing apparatus with parallel and sequential layout of the regenerative and absorbing cartridges the novel construction of the breathing apparatus with bypass valve for changing gas-air mix streams in the air system of the breathing apparatus proportionally to oxygen content has been developed.

**Practical value.** The conducted investigations permit to determine directions for improving the construction of the regenerative breathing apparatus with optimum oxygen content and to eliminate shortcomings in the breathing apparatus construction.

**Keywords:** *breathing apparatus; respirator; chemical oxygen; potassium superoxide; chemical lime absorbent.*

УДК [614.895.5:621.565.53]:001.891.572

*Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, зам. нач.; e-mail: agz@mail.dnmchs.ru;*  
*Алексей Борисович Серёгин, нач. каф.; e-mail: sab-1965@mail.ru*  
ГБОУ ВО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР  
283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел.: (+7 856) 303-27-01; 311-09-10

## УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТИВОТЕПЛОЙ ОДЕЖДЕ СПАСАТЕЛЕЙ

**Цель.** Установить закономерности нестационарных теплообменных процессов в противотепловой одежде спасателей с улучшенными параметрами аккумулятора холода для оценки времени защитного действия.

**Методы.** Теоретические исследования теплообменных процессов, проходящих в противотепловой одежде спасателей, с учетом новых параметров аккумулятора холода.

**Результаты.** Получены зависимости динамики температуры в новом аккумуляторе холода (АХ-5) и подкостюмном пространстве до и после таяния в нем льда, увеличено время защитного действия в противотепловом костюме горноспасателей ТК-60М на 33 %, в костюме пожарных спасателей в 2,4 раза.

**Научная новизна.** Впервые разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – человек – физическая нагрузка» с АХ-5, учитывающая температуру окружающей среды, теплофизические характеристики слоев и геометрические параметры оболочки АХ, фазовое превращение хладагента (льда в воду) и дальнейший его теплообмен, энергозатраты человека и отношение площади, занимаемой аккумуляторами холода, к площади подкостюмного пространства. Это позволит использовать минимальное количество АХ-5 при заданном допустимом времени работы спасателей.

**Практическая значимость.** Результаты исследований учтены при усовершенствовании технических характеристик противотепловых средств, обеспечат безопасность спасателей, позволят сократить время ведения работ в экстремальных микроклиматических условиях.

**Ключевые слова:** спасатель; противотепловая одежда; температура; аккумулятор холода; теплообменные процессы; защитное действие; пододежное пространство.

**Постановка проблемы.** В настоящее время в противотепловой одежде и средствах ее обеспечения в качестве аккумулятора холода (АХ) спасатели ГВГСС используют водоледяной охлаждающий элемент ОЭ-2 с минимальной толщиной полиэтиленовой пленки  $0,15 \cdot 10^{-3}$  м. После нескольких применений при замораживании в камере азотной установки «Зима-А» водоледяной охлаждающий элемент выходит из строя, поэтому он рассчитан на одноразовое применение, что при длительных и сложных ликвидациях аварий в экстремальных микроклиматических условиях существенно снижает время использования противотепловой одежды и увеличивает стоимость ведения работ [1].

В то же время на оснащении у спасателей МЧС отсутствует противотепловая и термостойкая одежда с охлаждением подобного типа, что при высоких эрготермических нагрузках увеличивает вероятность перегревания организма [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [3] приведены результаты исследований по определению количества применений аккумуляторов холода, оболочка которого выполнена из полиэтиленовой и поливинилхлоридной пленки толщиной  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м, без учета предельных значений их коэффициента теплопроводности и прочности, не проведены исследования по определению времени защитного действия в противотепловой одежде спасателей при их использовании.

Кроме того, в работе [3] установлено, что наиболее рационально делать оболочку аккумулятора холода (АХ-5) из серийно выпускаемой поливинилхлоридной пленки толщиной  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м с коэффициентом теплопроводности  $0,218 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Также доказано, что ее частота применения по сравнению с оболочкой из полиэтиленовой пленки аналогичной толщины увеличена в 6 и 8 раз при замораживании в морозильных камерах фирмы «Норд» с температурой минус  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и «Зима-А» – минус  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Известно, что с увеличением толщины пленки АХ с более низким коэффициентом теплопроводности в противотепловой одежде медленнее протекает процесс нагревания, что в конечном счете приводит к увеличению времени ее защитного действия.

Кроме того, в работе [4] температуру ОЭ-2 в пододежном пространстве (далее – ПП) в течение всего периода функционирования системы охлаждения принимали постоянной и равной  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , а замена многослойной оболочки одним, эквивалентным по тепловой проводимости, слоем и представление второй производной температуры по пространственной переменной в уравнении теплопроводности конечными разностями, предпринятые с целью получения простого аналитического решения в виде экспоненциальной зависимости температуры в оболочке и ПП от времени, не позволяют моделировать фактическое снижение температуры в ПП в начальный период эксплуатации. Это заведомо завышает рассчитанные исследователями необходимые запасы хладагента.

Поэтому актуальны исследования теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – спасатель – физическая нагрузка» с новыми АХ-5, позволяющие определить время защитного действия одежды.

**Цель работы.** Установить закономерности нестационарных теплообменных процессов в противотепловой одежде спасателей с улучшенными параметрами аккумулятора холода для оценки времени защитного действия.

**Изложение основного материала и полученных научных результатов.** Рассмотрим расчетную схему основной поверхности тела горноспасателя (без рук и ног) в противотепловой одежде [1].

Отдельная секция АХ-5 имеет цилиндрическую форму (рис. 1), поэтому динамику температуры в нем можно представить системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial \tau} &= a_{\text{п}}^2 \frac{\partial^2 T_{\text{п}}}{\partial r^2}, & r \in (-\delta_0; 0); \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} &= \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2}, & r \in (0; x); \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} &= \bar{a}^2 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2}, & r \in (x; R) \end{aligned} \right\},$$

где  $r$  – координата, отсчитываемая от поверхности АХ-5 по нормали к ней к центру, м;  
 $x$  – значение координаты на границе фазового превращения льда в воду, м;  
 $R$  – радиус основания АХ-5, м;  
 $x^* = R$  – предельная глубина фронта плавления льда, м;  
 $a_{\text{п}}^2 \approx 1,87 \cdot 10^{-5}$  – температуропроводность ПП, м<sup>2</sup>/с;  
 $\tilde{T}$  – температура воды, К;  
 $\tilde{a}^2 \approx 1,30 \cdot 10^{-7}$  – температуропроводность воды;  
 $\bar{T}$  – температура льда, К;  
 $\bar{a}^2 \approx 1,23 \cdot 10^{-6}$  – температуропроводность льда, м<sup>2</sup>/с;  
 $\delta_{\text{п}}$  – толщина пленки, м.

Принимаем следующие начальные условия:

$$T_{\text{п}}(r,0) = T_0; \quad \bar{T}(r,0) = T_0 - \Delta_0; \quad x(0) = 0,$$

где  $\Delta_0$  – разность между нормальной температурой и начальной температурой льда, К.

Такое представление уравнений позволит установить взаимосвязь между температурами окружающей среды, в слоях одежды, ПП и телом спасателя.

Предполагаем, что расчет температуры льда АХ-5, как и температуры в слоях одежды, будет проходить в малые дискретные моменты времени, в пределах которых ее в ПП можно считать постоянной, причем координата фронта фазового превращения – функция времени  $x = x(t)$ .



$$\lambda_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=0} = \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \Big|_{r=0},$$

которое дополним условием непрерывности температурного поля

$$T_{\Pi}(0, \tau) = \tilde{T}(0, \tau).$$

Общее решение (1) представим в виде

$$T_{\Pi} = A_{\Pi} + B_{\Pi} \psi(z_{\Pi}); \quad \tilde{T} = \tilde{A} + \tilde{B} \psi(\tilde{z}); \quad \bar{T} = \bar{A} + \bar{B} \psi(\bar{z}),$$

где  $A_{\Pi}, B_{\Pi}, \tilde{A}, \tilde{B}, \bar{A}, \bar{B}$  – определяются из краевых условий;

$\psi(z) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  – интегральная функция или так называемая функция ошибок  $erf(z)$ ;

$$z_{\Pi} = \frac{r}{2a_{\Pi}\sqrt{\tau}}; \quad \tilde{z} = \frac{r}{2\tilde{a}\sqrt{\tau}};$$

$\bar{z} = \frac{r}{2\bar{a}\sqrt{\tau}}$  – значения безразмерной пространственной координаты в пределах ПП, жидкой и твердой фаз АХ-5 соответственно.

Моделирование динамики температурного поля по глубине АХ-5 необходимо начинать с определения положения границы фазовых превращений в заданный момент времени. Расчеты производим до момента времени достижения фронта плавления льда в АХ-5.

Получены, в частности, результаты определения динамики температуры АХ-5 при максимальной температуре в ПП 30 °С (для горноспасателей) и 40 °С (для пожарных-спасателей), период плавления льда в которых составляет 80 и 60 мин соответственно.

Для исследования динамики температуры воды в АХ-5 после плавления льда применим уравнение теплопроводности в виде

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{\tau}} = \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{r}^2}, \quad (3)$$

где  $\tilde{\tau} = \tau - \tau^*$  – время с момента завершения периода плавления льда, с;

$\tilde{r} = R - r$  – координата, отсчитываемая от оси АХ-5 в радиальном направлении к его поверхности, м, с начальным и граничным условиями

$$T(\tilde{r}, 0) = \tilde{T};$$

$$-\tilde{\lambda}_3 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \Big|_{\tilde{r}=0} = \tilde{\alpha}_3 (\tilde{T} \Big|_{\tilde{r}=0} - T_{\text{п}}); \quad \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \Big|_{\tilde{r}=R} = 0,$$

где  $\tilde{\lambda}_3 \neq \lambda_3$  и  $\tilde{\alpha}_3 \neq \alpha_3$  – коэффициенты теплопроводности АХ-5 и теплообмена между ПП и АХ-5 после завершения периода плавления льда.

Решение уравнения (3) имеет вид

$$\tilde{T}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = \dot{T} + (T_{\text{п}} - \dot{T}) \left[ 1 - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \dot{A} e^{-\dot{A} \tilde{Fo}} \right];$$

$$\dot{A} = \frac{6\tilde{Bi}(\tilde{Bi} + 4)}{\tilde{Bi}^2 + 6\tilde{Bi} + 12},$$

где  $\tilde{Fo} = \frac{a^2 \tilde{\tau}}{R^2}$  – число Фурье;

$\tilde{\xi} = \frac{\tilde{r}}{R}$  – относительная величина пространственной координаты;

$\tilde{Bi} = \frac{\tilde{\alpha}_3}{\tilde{\lambda}_3} R$  – число Био.

Получены результаты одного из вариантов расчетов безразмерной (избыточной) температуры воды при  $\tilde{Bi} = 1,0$  в диапазоне  $\tilde{Fo} = 0,1 \dots 3,0$ , где

$$\tilde{i}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = 1 - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \dot{A} e^{-\dot{A} \tilde{Fo}}. \quad (4)$$

Следовательно, в отличие от результатов, полученных в работе [5], данная математическая модель позволяет моделировать динамику температуры АХ-5 в процессе плавления льда и после нагревания воды до температуры охлаждения тела спасателя 20 °С.

Согласно зависимости (4) получены результаты моделирования динамики температуры в слоях оболочки по радиусу АХ-5 и, в частности, в ПП костюма ТК-60М горноспасателей при воздействии температуры воздуха окружающей среды 60 °С и костюма пожарных-спасателей ТОК-200 при – 200 °С, которые соответствуют своим санитарным нормам (рис. 2, 3).

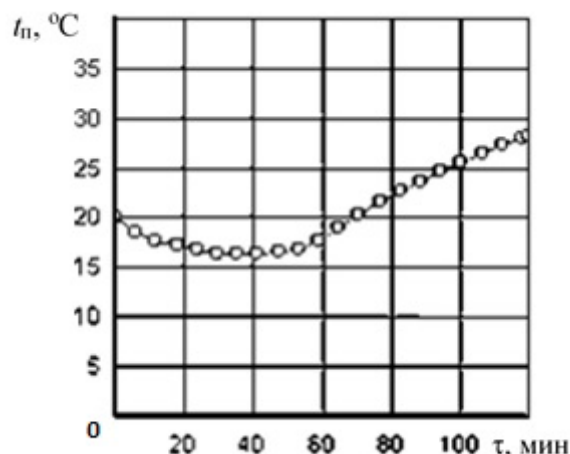


Рис. 2. Динамика температуры в пододежном пространстве костюма ТК-60М при температуре 60 °С

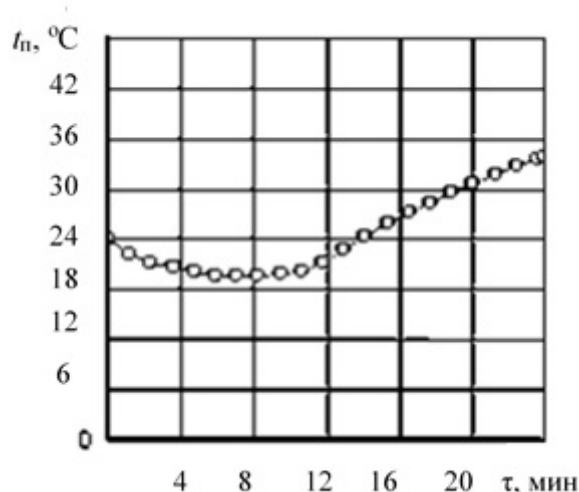


Рис. 3. Динамика температуры в пододежном пространстве костюма ТОК-200 при температуре окружающей среды 200 °С

Отсюда следует, что использование АХ-5 в костюме ТК-60М по сравнению с ОЭ-2 обеспечивает увеличение времени защитного действия (120 и 90 мин соответственно) на 33 %, а в ТОК-200 – в 2,4 раза.

**Выводы.** Разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в противотепловом костюме спасателя с улучшенными параметрами аккумулятора холода, учитывающая одновременное воздействие температуры окружающей среды, теплофизические характеристики слоев и геометрические параметры его оболочки, фазовое превращение хладагента (льда в воду) и дальнейший его теплообмен, энергозатраты человека и площадь ПП. Это дало возможность увеличить время защитного действия противотеплового костюма горноспасателей ТК-60М на 33 %, а костюма пожарных-спасателей ТОК-200 в 2,4 раза.

## Список литературы / References

1. Индивидуальная противогазотепловая защита / Ю. Ф. Булгаков, С. В. Борщевский, И. Ф. Марийчук [и др.] ; под общ. ред. Ю.Ф. Булгакова, И.Ф. Марийчука : монография. – Донецк : Норд Компьютер, 2016. – 250 с.

Bulgakov Yu. F., Borshchevskiy S. V., Mariychuk I. F. [et al.]. *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita: monografiya* [Individual gas and heat protection: monograph]. Donetsk, Nord Computer Publ., 2016, 250 p. (In Russian)

2. Завьялов, Г. В. Обоснование параметров противотеплового костюма с водяным охлаждением : специальность 05.26.01 «Охрана труда»: дис. ... канд. техн. наук / Завьялов Геннадий Вячеславович. – Донецк, 2020. – 196 с.

Zavyalov G. V. *Obosnovanie parametrov protivoteplovogo kostyuma s vodyanym okhlazhdeniem : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of parameters of heat protective suit with water cooling: Cand. tech. sci. diss.]. Donetsk, DonNTU Press, 2020, 196 p. (In Russian)

3. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / В. О. Положий, И. Ф. Марийчук, О. В. Папазова, А. А. Гаврилко // Горноспасательное дело : сборник научных трудов / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 165 – 172.

Polozhiy V. O., Mariychuk I. F., Papazova O. V., Gavrillko A. A. *Mnogokratnoe primeneniye okhlazhdayushchikh elementov protivoteplovoy odezhdy* [Multiple application of heat protective clothing cooling packs]. Gornospasatelnoye delo : sbornik nauchnykh trudov / NIIGD “Respirator”. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 165-172. (In Russian)

4. Кирьян, А. П. Параметры аккумулятора холода для индивидуальной противогазотепловой защиты спасателей / А. П. Кирьян, А. Б. Серегин // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2022. – Вып. 3(31). – С. 15 – 21.

Kiryay A. P., Seryogin A. B. *Parametry akkumulyatora kholoda dlya individualnoy protivogazoteplovoy zashchity spasateley* [Parameters of cold accumulator for rescuers' personal protection against gas and heat]. Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity. Donetsk, 2022, issue 3(31), pp. 15-21. (In Russian)

5. Гаврилко, А. А. Разработка метода и технических средств обеспечения безопасности пожарных при эрготермических нагрузках : специальность 05.26.01 «Охрана труда» : дис. ... канд. техн. наук / Гаврилко Александр Андреевич. – Киев, 2005. – 177 с.

Gavrillko A. A. *Razrabotka metoda i tekhnicheskikh sredstv obespecheniya bezopasnosti pozharnykh pri ergotermicheskikh nagruzkakh : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of method and technical means of providing the safety of fire-fighters under ergo-thermal loads: Cand. tech. sci. diss.]. Kiev. 2005, 177 p. (In Russian)

*Andrey Petrovich Kiryan, Cand. Sci. (Tech.), deputy commander; e-mail: agz@mail.dnmchs.ru;*  
*Aleksey Borisovich Seryogin, head of chair; e-mail: sab-1965@mail.ru*  
*State Budget Educational Institution of Higher Education “The Civil Defence Academy of the Ministry*  
*for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences*  
*of Natural Disasters of the Donetsk People’s Republic”*  
*283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+7 856) 303-27-01; 311-09-10*

## **SPECIFIED MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN RESCUERS’ HEAT PROTECTIVE CLOTHING**

**Purpose.** To establish regularities of the transient heat exchange processes in the rescuers’ heat protective clothing with improved parameters of a cold accumulator for assessment of the protective power time.

**Methods.** Theoretical investigations of the heat exchange processes proceeding in the rescuers’ heat protective clothing factoring in the new parameters of the cold accumulator.

**Results.** The dependences of the temperature dynamics in the new cold accumulator (AX-5) and the under-suit space before and after ice melting in it have been derived, the protective power time has been increased for the TK-60M mine-rescuer’s heat protective suit by 33 per cent and 2.4-fold for the fire-fighters’ suit.

**Scientific novelty.** The novel mathematical model of the transient heat exchange processes in the “environment – heat protective suit – human – physical load” system with the AX-5 cold accumulator has been developed factoring in the ambient temperature, thermal and physical characteristics of layers and geometrical parameters of the AX cold accumulator membrane, phase change of heat-removing agent (ice into water) and its further heat exchange, human energy expenditures and relation of cold accumulators surface to the under-suit space surface. It will permit to utilize the minimum number of the AX-5 cold accumulators within the predetermined allowable operation time of the rescuers.

**Practical value.** The results of the investigations have been taken into account during improvement of technical characteristics of the heat protective means, they will ensure safety of the rescuers, permit to reduce the time of conducting the operations in the extreme microclimate conditions.

**Keywords:** *rescuer; heat protective clothing; temperature; cold accumulator; heat exchange processes; protective action; under-the-suit space.*

УДК 621.65:[622.822.7:614.842.621]

*Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak\_ds@mail.ru;*

*Галина Николаевна Земляк, вед. инж.; e-mail: opbush@mail.ru*

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-41*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ

**Цель.** Установить аналитические закономерности для определения гидравлических параметров сети противопожарного трубопровода при подключении центробежных насосов по параллельной схеме.

**Методы.** Аналитические исследования гидравлических процессов при подключении центробежных насосов по параллельной схеме.

**Результаты.** Получено решение системы характеристических уравнений сети трубопроводов и центробежных насосов.

**Научная новизна.** Впервые установлена зависимость расхода и напора воды от удельного сопротивления и длины трубопровода при подключении центробежных насосов по параллельной схеме для насосов, имеющих различные технические характеристики и независимо от их количества.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют определить эффективность подключения центробежных насосов по параллельной схеме.

**Ключевые слова:** *центробежные насосы; параллельная схема; подключение; характеристика сети; рабочая точка.*

**Постановка проблемы.** Угольные предприятия Донецкой Народной Республики в соответствии с требованиями пп. 8.1.1 «Правил пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Донецкой Народной Республики» должны быть оборудованы насосными станциями для тушения пожаров на поверхностном и подземном комплексе. В связи с длительными сроками эксплуатации участки противопожарных трубопроводов приходят в негодность, и подача воды от насосных станций выполняется по другим маршрутам. Кроме того, на поверхностном комплексе строят новые сооружения, которые изначально не планировались при оборудовании насосных станций. Также для обеспечения расхода воды на тушение пожара на угольных предприятиях требуется применение высокопроизводительного насосного оборудования либо групп насосов с меньшей производительностью, объединенных по параллельной схеме подачи воды.

Все это приводит к необходимости перерасчета гидравлических параметров для новых схем подключения насосного оборудования.

**Анализ последних публикаций.** Сведения о совместной работе насосов при параллельном подключении приведены в работе [1], описан

графический метод определения рабочей точки совместной работы нескольких насосов. Авторы работы [2] получили аналитические зависимости напора и затрачиваемой мощности от подачи воды, которые могут быть использованы только для насосов типа KSN3.230.800.10.5.E, что ограничивает область их применения. В работе [3] изложены способы обеспечения гидравлических параметров при параллельной работе насосных агрегатов за счет применения средств частотного регулирования, однако для реализации указанных способов необходимы затраты на оборудование средствами автоматизации и дополнительную коммутационную аппаратуру.

**Цель исследования** – установить аналитические закономерности для определения гидравлических параметров сети противопожарного трубопровода при подключении центробежных насосов по параллельной схеме.

**Результаты исследования.** Характеристика центробежного насоса определяется графически изображенными зависимостями напора воды, потребляемой электрической мощности и коэффициента полезного действия от подачи воды. В общем виде рабочие зоны насосов представляют собой криволинейные параллелограммы, верхняя линия которых – характеристика насоса с наибольшим диаметром рабочего колеса, а нижняя – с наименьшим диаметром.

Форма характеристики зависит от конструктивных особенностей центробежного насоса. Она может быть пологой, пологопадающей и возрастающей [4]. Преимущество центробежных насосов с пологой характеристикой – большой диапазон значений подачи воды при небольших изменениях напора. Для центробежных насосов с пологопадающей характеристикой характерно значительное колебание значений напоров при малом изменении расходов воды. Применение центробежных насосов с возрастающей характеристикой нецелесообразно ввиду неустойчивой работы, когда одному значению напора будут соответствовать две различные подачи воды.

В соответствии с работой [5] характеристика центробежного насоса может быть описана следующей формулой:

$$H = H_0 + AQ - BQ^2,$$

где  $H$  – напор воды, создаваемый центробежным насосом, м вод. ст;

$H_0$  – напор воды при нулевом расходе воды, м вод. ст;

$A, B$  – постоянные коэффициенты, зависящие от типа насоса;

$Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с.

При подаче воды центробежными насосами значения расхода и напора воды в точке потребления напрямую зависят от характеристики трубопровода.

Уравнение характеристики сети трубопроводов имеет вид

$$H = h_c + \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2, \quad (1)$$

где  $h_c$  – необходимое давление воды в точке отбора, м вод. ст;

$A_i$  – удельное сопротивление  $i$ -го участка трубопровода,  $(с/м^3)^2$ . Значение может быть взято из работы [6];

$l_i$  – длина  $i$ -го участка трубопровода, м;

$Q$  – расход воды,  $м^3/с$ .

Рабочие параметры центробежного насоса определяют по совмещенному графику характеристики насоса и характеристики сети трубопроводов. Рабочая точка – место пересечения кривых характеристик. По ней определяют, какой напор, расход, потребляемую электрическую мощность и коэффициент полезного действия имеет центробежный насос при подаче в сеть трубопроводов заданной длины и определенного диаметра. Следует учитывать, что при изменении подачи воды при работе центробежного насоса рабочая точка тоже смещается.

Если требуется увеличить расход воды, центробежные насосы подключают в единую систему по параллельной схеме. Для определения рабочих параметров параллельно соединенных насосов необходимо на одном графике совместить характеристику насосов и характеристику сети трубопроводов. Для построения характеристики параллельной работы нескольких насосов выполняют сложение подач этих насосов при одинаковых напорах. Таким образом, главное ограничение по объединению насосов в параллельную схему – разница в значениях развиваемых напоров.

Стоит отметить, что увеличение расхода воды в два раза (для двух центробежных насосов с одинаковыми техническими характеристиками) возможно только при нулевой подаче, в остальных случаях суммарная подача насосов, работающих параллельно на общий трубопровод, меньше суммарной подачи при индивидуальной работе каждого насоса.

Для нахождения рабочей точки при работе двух одинаковых насосов необходимо решить систему уравнений

$$\begin{cases} H = H_0 + 2AQ - 4BQ^2; \\ H = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2. \end{cases} \quad (2)$$

Найдем расход воды  $Q$ , используя первое уравнение системы (3):

$$\begin{cases} Q = \frac{2A + \sqrt{4A^2 - 16B(H_0 - H)}}{8B}; \\ H = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2. \end{cases} \quad (3)$$

Для насосов с разными подачами воды система уравнений (3) примет вид

$$\begin{cases} Q = \frac{2A_1 + \sqrt{4A_1^2 - 16B_1(H_0 - H)}}{8B_1} + \frac{2A_2 + \sqrt{4A_2^2 - 16B_2(H_0 - H)}}{8B_2}; \\ H = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2. \end{cases} \quad (4)$$

Если подставить значение расхода воды из первого уравнения системы (4) во второе, то получим выражение для определения напора воды

$$H = h_c + 4 \sum_{i=1}^n A_i l_i \frac{(2A + \sqrt{4A^2 - 16B(H_0 - H)})^2}{64B}. \quad (5)$$

Напор воды  $H$  из уравнения (5) определяют численным методом. Подставив  $H$  в первое уравнение системы (3), получим величину расхода воды  $Q$  насосов, работающих по параллельной схеме подключения.

Для разветвленной сети подачи воды с трубопроводами разных диаметров, а также при определении работы центробежных насосов с разными расходами необходимо проводить множество расчетов. Чтобы упростить решение задачи, требуется разработка специального программного обеспечения.

При проектировании сети противопожарного водоснабжения выбор насосов и схему их работы можно выполнять, исходя из уравнения (1) характеристики сети трубопроводов. То есть, проведя предварительные расчеты по определению расхода и напора в самой удаленной точке, подбирают центробежные насосы с соответствующими техническими характеристиками. Следует учитывать, что в случае подключения двух насосов по параллельной схеме значения удельного сопротивления труб необходимо рассчитывать по уравнению (1) для расхода в четыре раза большего, а для трех насосов уже в девять раз большего.

**Выводы.** Установлены зависимости совместной работы центробежных насосов при параллельной схеме подключения к общей сети трубопроводов, позволяющие определить эффективность такого подключения.

#### Список литературы / References

1. Матвиенко, А. В. Расчет совместной работы насосов при параллельном их подключении / А. В. Матвиенко, Б. И. Томилова, М. И. Фоканова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41746189> (дата обращения: 20.09.2022).

Matvienko A. V., Tomilova B. I., Fokanova M. I. *Raschyot sovmestnoy raboty nasosov pri parallelnom ikh podklyuchenii* [Calculation of joint action of pumps

under their parallel connection]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 12. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41746189> (accessed 20.09.2022). (In Russian)

2. Великанов, Н. Л. Характеристики параллельно соединенных канализационных насосов высокой производительности / Н. Л. Великанов, В. А. Наумов, С. И. Корягин // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2019. – № 4(50). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41581531> (дата обращения: 20.09.2022).

Velikanov N. L., Naumov V. A., Koryagin S. I. *Kharakteristiki parallelno soedinyonnykh kanalizatsionnykh nasosov vysokoy proizvoditelnosti* [Characteristics of parallel connected high-capacity sewage pumps]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*, 2019, no. 4(50). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41581531> (accessed 20.09.2022). (In Russian)

3. Сербин, Ю. В. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования / Ю. В. Сербин, А. А. Прокопов, В. П. Бугров // Теплоэнергоэффективные технологии. Информационный бюллетень. – 2007. – № 2(47). URL: <https://ic-art.ru/video-publikatsii/publikatsii/> (дата обращения: 20.09.2022).

Serbin Yu. V., Prokopov A. A., Bugrov V. P. *Parallelnaya rabota nasosnykh agregatov pri ispolzovanii tekhnologii chastotnogo regulirovaniya* [Parallel action of pump units in case of frequency regulation technology application]. *Teploenergoeffektivnye tekhnologii. Informatsionnyy byulleten*, 2007, no. 2(47). Available at: <https://ic-art.ru/video-publikatsii/publikatsii/> (accessed 20.09.2022). (In Russian)

4. Жучков, В. В. Противопожарное водоснабжение / В. В. Жучков, А. А. Пименов, Ю. Л. Карасев. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. – 298 с.

Shuchkov V. V., Pimenov A. A., Karasyov Yu. L. *Protivopozharnoe vodosnabzheniye* [Firefighting water supply]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2016, 298 p. (In Russian)

5. Бойко, Е. Г. Причины нерациональной работы насосных установок горно-металлургического комплекса и пути их решения / Е. Г. Бойко, Ю. Г. Осадчук // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – 2006. – № 10. – С. 319 – 323.

Boyko E. G., Osadchuk Yu. G. *Prichiny neratsionalnoy raboty nasosnykh ustanovok gorno-metallurgicheskogo kompleksa i puti ikh resheniya* [Reasons of irrational operation of pump units of mining and smelting complex and ways for solution]. *Gornyyu informatsionno-analiticheskiy byulleten : nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*, 2006, no. 10, pp. 319-323. (In Russian)

6. Абросимов, Ю. Г. Гидрогазодинамика / Ю. Г. Абросимов, В. В. Жучков, С. В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 325 с.

Abrosimov Yu. G., Zhuchkov V. V., Puzach S. V. *Gidrogazodinamika* [Hydraulic

gas dynamics]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2015, 325 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 16.11.2022

**Dmitry Sergeyevich Buryak**, scientific associate; e-mail: buryak\_ds@mail.ru;  
**Galina Nikolayevna Zemlyak**, advanced engineer; e-mail: opbush@mail.ru  
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”  
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,  
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-41

## INVESTIGATION OF HYDRAULIC PARAMETERS OF CENTRIFUGAL PUMPS WITH PARALLEL CONNECTION DIAGRAM

**Purpose.** To establish analytical regularities for determination of hydraulic parameters of the fire pipe-line network in course of the parallel connection of the centrifugal pumps.

**Methods.** Analytical investigations of hydraulic processes in course of the parallel connection of the centrifugal pumps.

**Results.** The characteristic equations system solution has been obtained for the network of pipe-lines and centrifugal pumps.

**Scientific novelty.** The novel dependence of water discharge and pressure on the pipe-line specific resistivity and length has been established in course of connecting the centrifugal pumps according to the parallel diagram with various number of pumps with different technical characteristics.

**Practical value.** The obtained results make it possible to determine the effectiveness of centrifugal pumps connection according to the parallel diagram.

**Keywords:** centrifugal pumps; parallel diagram; connection; network characteristic; operation point.

УДК 614.8"363":[622.012:622.7]

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

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

*Государственное бюджетное учреждение*

*«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-44*

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОГО РИСКА НА УГЛЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

**Цель.** Разработать методику оценки технического риска чрезвычайных ситуаций и мероприятия, направленные на снижение риска отказов технологического оборудования для практического применения инженерно-техническим персоналом углеперерабатывающих предприятий.

**Методы.** Использован вероятностный метод оценки рисков чрезвычайных ситуаций для выбора оптимальных технических решений по снижению риска чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах угольной отрасли, основанный на статистических данных о надежности работы технологического оборудования.

**Результаты.** Разработаны мероприятия для снижения технического риска чрезвычайных ситуаций на углеперерабатывающих предприятиях.

**Научная новизна.** Впервые предложены мероприятия, направленные на снижение риска отказов технологического оборудования углеперерабатывающих предприятий на основе оценки технических рисков чрезвычайных ситуаций.

**Практическая значимость.** Оценка технического риска позволяет уменьшить вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций на углеперерабатывающих предприятиях за счет разработки и внедрения мероприятий, направленных на снижение количества отказов технологического оборудования.

**Ключевые слова:** *технический риск; углеперерабатывающие предприятия; чрезвычайная ситуация; тяжесть последствий; вероятность; оценка риска; снижение риска.*

**Постановка проблемы.** Методологическое обеспечение анализа и оценки риска представляет собой совокупность методов, методик и программных средств, включающих в себя теоретические, аналитические и математические исследования, и позволяет идентифицировать опасности, возникающие при эксплуатации промышленных объектов. Однако рекомендованные к практическому применению методы оценки риска имеют ряд существенных недостатков, которые в значительной мере влияют на своевременную разработку плана мероприятий по снижению рисков чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) при эксплуатации технологического оборудования.

Как показала практика, существующие методики оценки вероятности возникновения ЧС и ущерба от возможных негативных последствий опираются на достаточно сложные математические методы расчета, которые не всегда возможно выполнить в условиях производства. Статистические данные о ЧС, на основании которых осуществляется аналитическое и математическое определение вероятности возникновения и последствий ЧС, зачастую недостаточно информативны и достоверны. Поэтому актуальная задача –

разработать общедоступные подходы к оценке риска ЧС на углеперерабатывающих предприятиях Донецкой Народной Республики.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существует значительное количество исследований, посвященных различным подходам и методам анализа и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, к которым относятся и углеперерабатывающие предприятия [2–5]. Однако простых и общедоступных подходов для применения очень мало, и они имеют общий характер. Эти методы не предусматривают постоянного мониторинга состояния технологического оборудования. Кроме того, они не всегда учитывают специфические особенности, присущие промышленным объектам угольной отрасли.

**Цель исследования** – разработка эффективной и доступной методики оценки технического риска ЧС и мероприятий, направленных на снижение риска отказов технологического оборудования, для практического применения инженерно-техническим персоналом углеперерабатывающих предприятий.

**Результаты исследований.** В настоящее время вероятностный метод считается одним из наиболее приемлемых для применения при оценке рисков ЧС на предприятиях угольной отрасли. С помощью вероятностных методов можно находить оптимальные технические решения для конкретных технических устройств и находящихся с ними в контексте инфраструктурных объектов (далее – ТУ).

Технический риск представляет собой вероятность отказа ТУ с негативными последствиями за определенный период функционирования промышленного объекта.

Алгоритм анализа и оценки технического риска может представлять собой следующие этапы:

- сбор сведений о состоянии ТУ, об условиях их эксплуатации, авариях, отказах и инцидентах;
- определение причин, аварий, отказов и инцидентов;
- оценка тяжести и вероятности рисков ЧС и при работе ТУ, вывод о возможности их дальнейшей эксплуатации;
- разработка корректирующих мероприятий по снижению рисков ЧС при эксплуатации ТУ.

Исходные данные для оценки рисков ЧС на технических устройствах и объектах углеперерабатывающих предприятий следующие:

- перечень контролируемых ТУ;
- количество ЧС (аварий, отказов, инцидентов) по каждому виду ТУ;
- средняя продолжительность и стоимость ремонта узлов и систем по каждому виду ТУ;
- плановая наработка на отказ по каждому виду ТУ.

Предлагается следующая методика оценки технического риска на углеперерабатывающих предприятиях.

Технический риск ЧС  $R$ , балл, рассчитывают по формуле

$$R = CP, \quad (1)$$

где  $C$  – тяжесть последствий ЧС, балл;

$P$  – вероятность ЧС, балл.

Тяжесть последствий ЧС предложено рассчитывать по формуле

$$C = C_1k_1 + C_2k_2 + C_3k_3 + C_4k_4, \quad (2)$$

где  $C_1$  – тяжесть последствий ЧС по степени влияния на персонал, балл (табл. 1);

$C_2$  – тяжесть последствий ЧС по степени влияния на состояние самого ТУ и технологический процесс, балл (табл. 2);

$C_3$  – тяжесть последствий ЧС по степени влияния на затраты по ремонту ТУ, балл (табл. 3);

$C_4$  – тяжесть последствий ЧС по степени влияния на окружающую среду, балл (табл. 4);

$k_1, k_2, k_3, k_4$  – весовые коэффициенты влияния последствий ЧС на здоровье персонала, состояние самого ТУ и технологического процесса, затраты по ремонту ТУ и состояние окружающей среды соответственно. Суммарное значение весовых коэффициентов составляет 1,0, и устанавливаются они в долях единицы в зависимости от экспертных оценок.

Вероятность ЧС  $P$  определяют в зависимости от остаточного технического ресурса оборудования (табл. 5).

Таблица 1

Классификация тяжести последствий ЧС по степени влияния на персонал  $C_1$

Тяжесть последствий ЧС	Характеристика тяжести последствий ЧС	Балл
Минимальная	Микротравма, не требующая оказания первой медицинской помощи, без потери трудоспособности	1
Умеренная	Легкая травма с необходимостью оказания медицинской помощи и потерей трудоспособности до 5 сут	2
Существенная	Травма средней тяжести или тяжелая с потерей трудоспособности свыше 5 сут до 30 сут	3
Значительная	Тяжелая травма или профессиональное заболевание, повлекшие стойкую утрату трудоспособности и/или инвалидность	4
Катастрофическая	Травма или профессиональное заболевание со смертельным исходом. Групповой несчастный случай	5

Таблица 2

Классификация тяжести последствий ЧС по степени влияния на состояние самого ТУ и технологический процесс  $C_2$

Тяжесть последствий ЧС	Характеристика тяжести последствий ЧС	Балл
Минимальная	Незначительное изменение параметров ТУ без влияния на технологический процесс	1
Умеренная	Изменение параметров ТУ с негативным влиянием на технологический процесс и возможностью устранения обслуживающим персоналом в течение смены	2
Существенная	Существенное изменение параметров ТУ с остановкой технологического процесса до суток и привлечением для устранения специалистами предприятия	3
Значительная	Выход из строя ТУ с остановкой технологического процесса более суток, но возможностью восстановления с привлечением специализированной организации	4
Катастрофическая	Выход из строя ТУ, повлекший за собой выход из строя других звеньев технологического процесса с его полной остановкой на срок более 30 сут или невозможностью восстановления	5

Таблица 3

Классификация тяжести последствий ЧС по степени влияния на затраты по ремонту  $C_3$

Тяжесть последствий ЧС	Характеристика тяжести последствий ЧС	Балл
Минимальная	Незначительные затраты на техническое обслуживание (менее 5 % от стоимости ТУ)	1
Умеренная	Затраты на ремонт составляют 5...20 % стоимости ТУ	2
Существенная	Затраты на ремонт составляют 20...30 % стоимости ТУ	3
Значительная	Затраты на ремонт составляют 30...50 % стоимости ТУ	4
Катастрофическая	Затраты на ремонт составляют более 50 % стоимости ТУ или его полную замену	5

Таблица 4

Классификация тяжести последствий ЧС по степени влияния на окружающую среду  $C_4$

Тяжесть последствий ЧС	Характеристика тяжести последствий ЧС	Балл
Минимальная	Значения вредных факторов не превышают ПДК	1
Умеренная	Значения вредных факторов в пределах рабочей зоны превышают ПДК не более чем в 2 раза	2
Существенная	Значения вредных факторов в пределах границ предприятия превышают ПДК не более чем в 2 раза	3

Окончание табл. 4

Тяжесть последствий ЧС	Характеристика тяжести последствий ЧС	Балл
Значительная	Вредные факторы распространяются за границы предприятия с превышением ПДК не более чем в 2 раза	4
Катастрофическая	Вредные факторы распространяются за границы предприятия с превышением ПДК в 2 и более раза	5

Таблица 5

Вероятность чрезвычайных ситуаций *P*

Остаточный технический ресурс (отношение фактически обработанного ресурса к нормативному), %	Вероятность, балл
Высокий (не более 20)	1
Достаточный (21...40)	2
Средний (41...60)	3
Низкий (61...80)	4
Очень низкий (более 81)	5

Оценка уровня технического риска выполняется согласно пятиуровневой шкале в зависимости от попадания средневзвешенного балла, характеризующего опасность ЧС в пределах одного из диапазонов баллов (табл. 6).

Таблица 6

## Оценка уровня риска

Диапазон баллов	Соответствующие уровни риска
1,0...4,0	Приемлемый риск
4,1...9,0	Допустимый риск
9,1...12,0	Значительный риск
12,1...25	Недопустимый риск

Необходимые меры безопасности при различных уровнях риска приведены в таблице 7.

Таблица 7

## Меры безопасности при различных уровнях риска

Степень риска	Необходимые меры безопасности
Приемлемый риск	Контроль параметров вредных и опасных факторов в соответствии с требованиями нормативных документов
Допустимый риск	Восстановление работоспособности ТУ с использованием действующих на предприятии технических ремонтных регламентов

Окончание табл. 7

Степень риска	Необходимые меры безопасности
Значительный риск	Остановка технологического процесса. Разработка и выполнение специальных мероприятий по устранению риска ЧС. Если остановка невозможна по технологическим причинам, то необходимо принять дополнительные меры по защите персонала и устранить риск в согласованные с заинтересованными сторонами сроки
Неприемлемый риск	Работа в опасной зоне категорически запрещается до устранения риска ЧС

Результаты оценки риска ЧС для различных категорий технологического оборудования (грохота, сепараторы, насосы, трубопроводы, транспортные средства, грузоподъемные механизмы, электрооборудование и т.д.) используют для разработки плана мероприятий по снижению рисков ЧС при эксплуатации ТУ.

Процедура разработки мероприятий по снижению рисков ЧС при эксплуатации ТУ включает следующие этапы:

- оценка тяжести и вероятности рисков ЧС и при работе ТУ;
- расчет суммы баллов, характеризующих вероятность и последствия ЧС в зонах ответственности каждого ИТР;
- разработка Программы по снижению рисков ЧС на квартал;
- постановка конкретных задач инженерно-техническому персоналу по снижению рисков возможных ЧС (на квартал, месяц, неделю, сутки, смену);
- отчеты ИТР о ходе выполнения и результатах работ по снижению рисков ЧС (ежемесячный, недельный, суточный, сменный);
- квартальный отчет о результатах снижения рисков ЧС на предприятии с расчетом экономического эффекта;
- оценка производственной деятельности инженерно-технического персонала по снижению рисков ЧС при эксплуатации ТУ.

**Выводы.** Разработанная методика оценки технического риска на углеперерабатывающих предприятиях позволяет:

- на основе единого критерия (уровня риска) оценить техническое состояние технологического оборудования для рационального использования ресурсов по повышению надежности эксплуатации промышленного объекта;
- оценить результаты производственной деятельности инженерно-технического персонала по снижению рисков ЧС при эксплуатации технологического оборудования;
- разработать и осуществить мероприятия по снижению рисков ЧС на промышленном объекте.

#### Список литературы / References

1. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных

объектах». – М. : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – Серия 27. – Вып. 16. – 56 с.

*Rukovodstvo po bezopasnosti “Metodicheskiye osnovy po provedeniyu analiza opasnostey i otsenke riska avariyy na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh”* [Safety guide “Methodological principles of conducting the analysis of hazards and risk assessment of emergencies at hazardous industrial facilities”]. Moscow, ЗАО “Nauchno-tehnicheskiy tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti” Publ., 2016, series 27, issue 16, 56 p. (In Russian)

2. Методические рекомендации по выбору методов оценки рисков чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах. – Донецк : НИИГД «Респиратор», 2021. – 32 с.

*Metodicheskiye rekomendatsii po vyboru metodov otsenki riskov chrezvychaynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh* [Guidelines on selecting the techniques of emergency risks assessment at hazardous industrial facilities]. Donetsk, NIIGD “Respirator” Publ., 2021, 32 p. (In Russian)

3. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск : в 2 ч. / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с.

Korchagin A. B., Serdyuk V. S., Bokarev A. I. *Nadyozhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk* [Dependability of technical systems and technogenic risk]. Omsk, OmGTU Press, 2011, 228 p. (In Russian)

4. Ковалевич, О. М. Возможности вероятностного метода прогнозирования рисков при реализации инфраструктурных проектов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 2. – С. 37 – 42.

Kovalevich O. M. *Vozmozhnosti veroyatnostnogo metoda prognozirovaniya riskov pri realizatsii infrastrukturykh projektov* [Capabilities of probability method of risks prediction in realization of infrastructure projects]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy*, 2013, no. 2, pp. 37-42. (In Russian)

5. Губина, Т. А. Анализ методик по оценке рисков возникновения аварийных ситуаций на опасных производственных объектах / Т. А. Губина, А. А. Алексеев, А. С. Мосолов // Сборник статей по материалам IV международной научно-практической конференции. – 2016. – № 4(1). – С. 162 – 175.

Gubina T. A., Alekseyev A. A., Mosolov A. S. *Analiz metodik po otsenke riskov vozniknoveniya avariynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh* [Analysis of methodologies for assessing the risks of emergencies occurrence at hazardous industrial facilities]. *Sbornik statey po materialam IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2016, no. 4(1), pp. 162-175. (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*  
*State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”*  
*of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,*  
*Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”*  
*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-44*

## **SPECIFICS OF TECHNICAL RISK ESTIMATION AT COAL PREPARATION PLANTS**

**Purpose.** To develop a methodology for assessing the technical risk of emergencies and measures aimed at reducing the risk of technological equipment failure for practical application by the engineering and technical personnel of the coal preparation plants.

**Methods.** A probability method has been applied for assessing the emergency risks in order to select the optimal technical solutions for their reduction at the industrial facilities of the coal industry; the method is based on the statistical data on dependability of the technological equipment operation.

**Results.** The measures have been developed for reducing the technical risk of emergencies at the coal preparation plants.

**Scientific novelty.** For the first time ever the measures aimed to reduce the risk of the technological equipment failures at the coal preparation plants have been proposed on the basis of the emergency technical risks assessment.

**Practical value.** The assessment of the technical risk allows reducing the probability of emergency situations occurrence at the coal preparation plants due to the development and implementation of measures aimed at minimizing the number of the technological equipment failures.

**Keywords:** *technical risk; coal preparation plants; emergency situation; severity of consequences; probability; risk assessment; risk reduction.*

**Указатель статей, опубликованных в журнале  
«Научный вестник НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» в 2022 году**

<b>ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ</b>	Вып.	Стр.
<b>Агеев В. Г., Греков С. П., Орликова В. П.</b> Теоретическое исследование параметров адсорбции азота ископаемыми углями	1	16
<b>Агеев В. Г., Греков С. П., Орликова В. П.</b> Избирательность адсорбции газов при окислении ископаемых углей	2	7
<b>Агеев В. Г., Греков С. П., Мавроди А. В.</b> Инженерный метод расчета переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт при их обесточивании	4	7
<b>Берестовая А. А., Шаповалов В. В.</b> Термодинамический анализ процесса горения в окисдно- и пероксидно- солевых системах	2	26
<b>Галухин Н. А.</b> Математическая модель движения жидкости в пожаротушащей установке с акустическим распылением	2	17
<b>Греков С. П., Орликова В. П.</b> Параметры низкотемпературного окисления угля разной степени метаморфизма	3	7
<b>Долженков А. Ф., Лебедева В. В.</b> Устойчивость огнезащитного покрытия к воздействию природных и техногенных факторов	3	18
<b>Ефименко В. Л.</b> Экспериментальные исследования устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости	3	36
<b>Ковалев А. П., Колесник Л. И.</b> Построение схем замещения сложных по структуре восстанавливаемых систем для оценки их надежности и пожаробезопасности	4	26
<b>Козлитин А. А., Лебедева В. В., Щербакова О. Н., Сиверский А. В.</b> Сорбенты для обнаружения компонентов нефтепродуктов в пробах после пожара	4	37
<b>Коляда А. Ю., Дикенштейн И. Ф., Тимошенко Д. А.</b> Параметры тушения пожаров тонкораспыленной водой на начальной стадии развития	1	34
<b>Мавроди А. В.</b> Прогноз газовой обстановки на выемочном участке при обесточивании угольной шахты	3	27
<b>Мамаев В. В., Галухин Н. А.</b> Математическая модель газодинамических процессов в закачном порошковом огнетушителе с газовым аккумулятором	1	7
<b>Старикова И. Г.</b> Определение коэффициентов теплоотдачи от угля в окружающие среды	4	17
<b>Чубучный Н. Ю., Добрякова Е. И.</b> Анализ методов оценки состояния объектов при проведении пожарного аудита	2	38
<b>Шаповалов В. В., Шлома В. В.</b> Жидкофазный абсорбент кислорода на основе системы кобальт(II) – гистидин – аммиак	1	26

<b>БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ</b>	Вып.	Стр.
<b>Агеев В. Г., Греков С. П., Мавроди А. В.</b> Математическая модель газодинамических процессов при техногенных авариях в шахтах вследствие их обесточивания	2	47
<b>Борисенко Э. В., Службин Ю. А., Бударецкий С. И., Чернышев И. А.</b> Цифровой измеритель скорости газовой выделенности метана	3	66
<b>Греков С. П., Головченко Е. А.</b> Математическая модель динамики адсорбции кислорода слоем газонасыщенного угля при необратимой реакции первого порядка	3	48
<b>Греков С. П., Головченко Е. А.</b> Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса	4	66
<b>Захаров Д. В., Нека С. А., Добрякова Е. И.</b> Обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений и мест их дислокации	1	44
<b>Князева Т. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И.</b> Контроль защитной способности поглотителя ХП-И	2	58
<b>Козлитин А. А., Храпоненко О. В., Щербакова О. Н., Сиверский А. В.</b> Идентификация горючих жидкостей в пробах, отобранных с места пожара	2	73
<b>Коляда А. Ю., Буряк Д. С.</b> Обоснование гидравлических параметров рукавных линий	1	71
<b>Коляда А. Ю., Дикенштейн И. Ф., Коврижкин О. И.</b> Флегматизация пламенного горения в горной выработке	4	75
<b>Лебедева В. В., Козлитин А. А., Непочатых И. Н.</b> Влияние эксплуатационных факторов на огнезащитную эффективность покрытия	1	62
<b>Лебедева В. В., Непочатых Н. А.</b> Оптимизация состава огнезащитного покрытия методом симплекс-решетчатого планирования	4	60
<b>Орликова В. П., Момот Д. И.</b> Газовый анализ продуктов термического разложения древесины	2	64
<b>Пефтибай Г. И., Галухин Н. А., Еремин А. В.</b> Экспериментальные исследования погрешности регулятора расхода воды для смесительно-нагнетательных установок	3	58
<b>Симонов А. М., Всякий А. А., Мавроди А. В., Агарков Ал. В.</b> Методика расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений	1	53
<b>Хацько М. С.</b> Оценка профессионально-производственных факторов риска аварий на промышленных предприятиях	3	73
<b>Чубучный Н. Ю., Добрякова Е. И.</b> Инновационные формы обучения населения вопросам пожарной безопасности	4	47

<b>ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ</b>	Вып.	Стр.
<b>Буряк Д. С., Земляк Г. Н.</b> Исследование гидравлических параметров центробежных насосов при параллельной схеме подключения	4	103
<b>Гулько С. Е., Гомаль И. И., Мачикина Д. В.</b> Безопасность использования шахтных вод в качестве альтернативного источника водоснабжения	3	91
<b>Гуржий В. В., Березин А. А., Политучий Д. А.</b> Практическая значимость Методических рекомендаций по выявлению и изъятию фрагментов электроустановок с места пожара	2	109
<b>Долженков А. Ф., Джалетова Е. К., Никулина А. А.</b> Оценка экологического риска загрязнения атмосферы выбросами котельных малой мощности	1	77
<b>Долженков А. Ф., Джалетова Е. К., Никулина А. А.</b> Обоснование мер по снижению риска загрязнения атмосферы котлами малой мощности	3	102
<b>Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И.</b> Влияние фракционного состава и высоты слоя поглотителя ХП-И на его сорбционную емкость	1	93
<b>Иваненко А. Ф., Мухин П. Е.</b> Особенности расчета технического риска на углеперерабатывающих предприятиях	4	109
<b>Капустин В. Б., Мороз Т. О., Томилов М. К.</b> Анализ нормативных правовых актов ДНР в сфере радиационной, химической и биологической защиты	3	110
<b>Кирьян А. П., Серёгин А. Б.</b> Уточненная математическая модель теплообменных процессов в противотепловой одежде спасателей	4	94
<b>Князева Т. В., Мороз Т. О.</b> Трехмерная модель теплового состояния пожарного в условиях повышенных температур	1	83
<b>Коляда А. Ю., Буряк Д. С.</b> Исследование процессов флегматизации водяным паром очага горения	2	103
<b>Мамаев В. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И.</b> Рециклинг шахтных самоспасателей с химически связанным кислородом, непригодных для эксплуатации	3	81
<b>Мамаев В. В., Зборщик Л. А., Плетенецкий Р. С., Францев В. И.</b> Система кислородопитания изолирующего регенеративного респиратора с оптимальным содержанием кислорода	4	82
<b>Мамаев В. В., Иваненко А. Ф., Мухин П. Е., Попова Л. М.</b> Исследование проблем техногенной безопасности на ликвидируемых шахтах ДНР	2	94
<b>Медгаус В. М., Папазова О. В., Попов Н. Н., Шлома В. В.</b> Контроль технического состояния аппаратов ИВЛ для продления срока службы	1	101
<b>Симонов А. М., Карнаух Н. В., Агарков Ал. В., Захлебин В. В.</b> Обеспечение безопасности ведения аварийно-спасательных работ в шахтах после внезапных выбросов	2	82

## Издания ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»



**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 самонагрева угля и других органических материалов, методы профилактики эндогенных пожаров. Проведен анализ существующих методов и математических моделей определения самовозгорания материалов органического происхождения. Разработаны математические модели самонагрева 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.

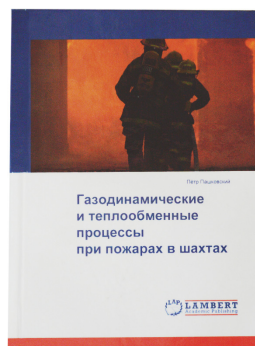
Для инженерно-технического персонала научно-исследовательских, проектных и конструкторских организаций, работников промышленности и сотрудников органов надзора и контроля за безопасностью производства.



**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



**Пашковский, П. С. Газодинамические и теплообменные процессы при пожарах в шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк, 2018. – 298 с.**

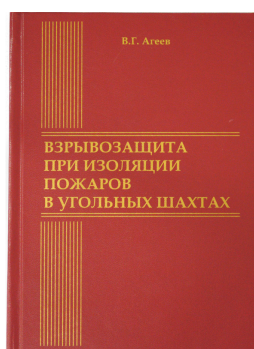
В настоящей книге систематизированы вопросы управления вентиляцией шахт при ликвидации подземных пожаров. Рассмотрены проблемы термодинамики газов, теплообмена между потоком нагретого воздуха и окружающей среды, термодинамические процессы в шахте. Приведена характеристика аварийных вентиляционных режимов, 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.



**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.

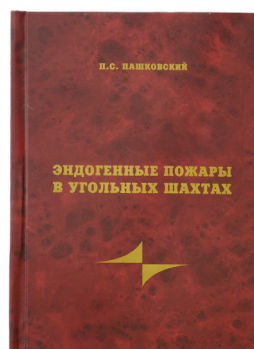
Монография предназначена для специалистов в области пожарной безопасности, инженерно-технических работников шахт, научно-исследовательских организаций, студентов технических вузов.



**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.



**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.

## 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»

2022, № 4(59)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Переводчик Л.А. Ахундова

Учредитель и издатель

*Государственное бюджетное учреждение  
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

**Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование**

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к выходу в свет 09.12.2022.

Адрес редакции и издателя: ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»,  
ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+7 856) 332-78-01; 332-78-60

Объем 3,71 Мб

E-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 12 декабря 2022 г.