



Государственный научно-исследовательский институт
горноспасательного дела, пожарной безопасности
и гражданской защиты «Респиратор»
Министерства по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий Донецкой Народной Республики

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 2(58)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 2(58). – 120 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 рассчитаны на ученых и специалистов, занимающихся вопросами предупреждения чрезвычайных ситуаций, борьбы с их последствиями, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, работников различных отраслей промышленности.

Учредитель и издатель – Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «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	Ю.Ф. Булгаков
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.Г. Игишев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	В.П. Коптиков (Российская Федерация)
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 (договор № 157-03/2016 от 23.03.2016).

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 2 от 27.05.2021).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации печатной версии журнала ААА № 000086 от 14.12.2016.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



The "Respirator" State Scientific Research Institute
of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the Ministry of the Donetsk People's Republic
for Civil Defence, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD "RESPIRATOR"

Scientific-technical journal

No. 2(58)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2021

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2021. – No. 2(58). – 120 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 – The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection 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.)	Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.)	S.Ye. Gul'ko
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Igishev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	V.P. Koptikov (Russian Federation)
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" (РИИЦ) (contract no. 157-03/2016 from 23.03.2016).

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 2 from 27.05.2021).

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

Registration certificate of the printing version of the journal AAA no. 000086 from 14.12.2016.

Registration certificate of the network publication AAA no. 000121 from 20.04.2017.

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная и промышленная
безопасность***

Агеев В.Г., Коврижкин О.И.
Фильтрация азота через выработанное
пространство при инертизации
изолируемого выемочного участка 7

**Греков С.П., Орликова В.П.,
Волынец В.В.**
Двухфазное кислородное окисление
угля различного фракционного состава 15

Мамаев В.В., Галухин Н.А.
Газодинамические процессы
в закачных огнетушителях 24

Лебедева В.В., Храпоненко О.В.
Обнаружение компонентов
легковоспламеняющихся жидкостей
методом газовой хроматографии 31

**Головченко Е.А., Момот Д.И.,
Пашковский О.П.**
Пожаробезопасные параметры
формирования плоского породного
отвала 40

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

Лебедева В.В., Щербакова О.Н.
Разработка многокомпонентных
сорбентов симплекс-решетчатым
методом 48

**Зборщик Л.А., Плетенецкий Р.С.,
Францев В.И.**
Зависимости массообмена от схем
испытаний сорбентов 58

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

Ageyev V.G., Kovrizhkin O.I.
Nitrogen filtration through a goaf during
inertization of the working area under
insulating 7

**Grekov S.P., Orlikova V.P.,
Volynets V.V.**
Two-phase oxygen oxidation of coal
of different fractional composition 15

Mamayev V.V., Galukhin N.A.
Gas-dynamic processes in dry powder
rechargeable fire extinguishers 24

Lebedeva V.V., Khraponenko O.V.
Detection of components of highly
flammable liquids by gas chromatography
method 31

**Golovchenko Ye.A., Momot D.I.,
Pashkovskiy O.P.**
Fire-safe parameters for formation
of a flat overburden dump 40

II. Safety in emergencies

Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N.
Development of multicomponent sorbents
by the simplex-lattice method 48

**Zborshchik L.A., Pletenetskiy R.S.,
Frantsev V.I.**
Dependences of mass exchange
on test patterns of sorbents 58

Тохташ Н.А.

Влияние психологических аспектов на снижение производственного травматизма спасателей

64

Tokhtash N.A.

Influence of psychological aspects on reduction of occupational injury rate of rescuers

Ковалев А.П.

Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложной по структуре восстанавливаемой системы с учетом двух видов несовместных отказов электрооборудования

78

Kovalyov A.P.

Estimation of reliability of electric power supply of load nodes of structurally complex recoverable system factoring in two types of incompatible electrical equipment failures

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

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

**Мамаев В.В., Симонов А.М.,
Агарков Ал.В.**

Системы дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров в шахтах

90

**Mamayev V.V., Simonov A.M.,
Agarkov Al.V.**

Systems of remote monitoring of gas conditions during elimination of fires in mines

**Лебедева В.В., Непочатых И.Н.,
Храпоненко О.В.**

Лабораторная установка для исследования свойств огнезащитного покрытия

100

**Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N.,
Khraponenko O.V.**

Laboratory installation for investigation of fire-retardant coating characteristics

Подвигин К.А.

Закономерности движения струи охлажденного воздуха в горной выработке

109

Podvigin K.A.

Regularities of cooled air stream movement in a mine working

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 622.822.7:614.842.614

*Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-01*

*Олег Игоревич Коврижкин, командир; e-mail: metro-1973@mail.ru
Оперативный государственный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР
283048, Донецк, пер. Николенко, 7. Тел. (+38 062) 343-52-64*

ФИЛЬТРАЦИЯ АЗОТА ЧЕРЕЗ ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРИ ИНЕРТИЗАЦИИ ИЗОЛИРУЕМОГО ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

Цель. Определить скорость фильтрации азота через выработанное пространство для расчета общегазового обмена при инертизации выработок выемочного участка.

Методы. Аналитические исследования и математические расчеты процесса фильтрации азота в выработанном пространстве.

Результаты. Получены выражения для концентрации азота в вентиляционном и откаточном штреках, рассчитана скорость фильтрации азота в выработанном пространстве.

Научная новизна. Рассчитана фильтрационная скорость азота при его утечках в выработанное пространство.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют рассчитать объем азота, поступающего из выработанного пространства в выемочный участок, и учесть его в общегазовом обмене изолируемой выработки.

Ключевые слова: азот; изолируемый участок; выработанное пространство; откаточный штрек; вентиляционный штрек; фильтрация; концентрация.

Постановка проблемы. При подаче газообразного азота в изолируемый выемочный участок с целью создания взрывобезопасной среды или тушения пожара на динамику изменения концентрации азота (особенно в вентиляционном штреке) влияет наличие больших объемов выработанных пространств (далее – ВП), через которые происходит фильтрация газа, поданного в откаточный штрек и лаву.

Поэтому необходимо определить распределение и величину утечек азота через ВП в вентиляционный штрек.

Анализ последних публикаций. Вопросами фильтрации азота через ВП занимались В.Ю. Горб и А.Е. Калюсский еще в начале 70-х годов прошлого века.

В настоящее время В.А. Портола, Н.Л. Галсанов изучают проблему распространения азота и инертных составов на его основе в ВП шахт с целью повышения эффективности тушения эндогенных пожаров в ВП [1, 2].

В этих работах принимается, что поступление азота в ВП осуществляется через скважины, пробуренные с земной поверхности или из близлежащих

горных выработок, азот распространяется равномерно по сфере вокруг точки подачи. Скорость азота определяют по формуле

$$V = \frac{Q}{4\pi R^2 \Pi}, \quad (1)$$

где Q – расход подаваемого в скважину азота, $\text{м}^3/\text{с}$;

R – расстояние от точки подачи азота, м ;

Π – пористость скопления угля и пород в ВП.

В реальных условиях в ВП могут быть сформированы потоки газа, возникающие из-за разности давления воздуха в горных выработках, принудительной подачи воздуха. Нагнетание азота в перемещающиеся в ВП утечки воздуха приведет к возмущению этого потока. В результате возникнут потоки подаваемого азота, движущиеся в том числе навстречу фильтрующемуся воздуху и перпендикулярно вектору его движения (рис. 1).

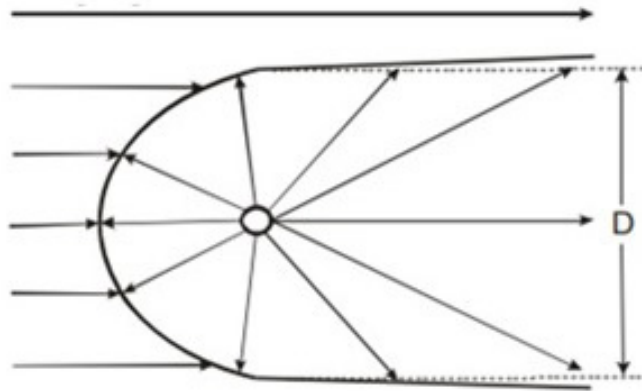


Рис. 1. Схема движения азота при выходе в выработанное пространство с фильтрующимся потоком воздуха

В работах Д.Ю. Палеева предложено решение сетевой задачи проветривания ВП и включения их в общешахтную вентиляционную сеть [3, 4]. В работе [5] рассмотрен аэродинамический способ торможения процесса окисления угля в ВП. Пожароопасные скорости фильтрации воздуха в ВП находятся в пределах $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ $\text{м}/\text{с}$.

По данным НЦ ВостНИИ (г. Кемерово), пожароопасными являются утечки воздуха $0,1 \dots 0,9$ $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$, при этом наиболее благоприятные условия для окисления создаются при потоке воздуха $0,3 \dots 0,6$ $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$ [5].

Таким образом, теоретические и экспериментальные модели фильтрации азота в ВП и его влияния на процесс заполнения изолируемых выработок выемочного участка не разработаны.

Выработанное пространство представляет собой техногенную полость в земных недрах, образующуюся в результате извлечения полезных ископаемых, а также покрывающих и вмещающих горных пород.

Очистное выработанное пространство состоит из обрушенных блоков разрыхленных пород основной и непосредственной кровли. Его можно представить в виде полости, нижняя часть которой заполнена мелким уплотненным материалом, а верхняя – отдельными крупными кусками с большими пустотами между ними. Вдоль целиков, оконтуривающих выработанное пространство, имеются крупные связанные пустоты (остатки подготовительных выработок и пространства под опирающимися на целики пластами кровли). В верхней части выработанного пространства могут существовать крупные пустоты – «купола».

Таким образом, выработанное пространство можно рассматривать как пористую среду с высокой проницаемостью и четко выраженной анизотропией.

Аэродинамические процессы в ВП относятся к классу турбулентных пространственных течений через крупнокусковую пористую среду и являются очень сложными. По этой причине аналитические решения аэродинамики ВП отсутствуют, а инженерные расчеты таких течений не производятся.

В работах [7, 8] рассматривается процесс фильтрации азота через ВП.

Цель статьи – определить скорость фильтрации азота через выработанное пространство для расчета общегазового обмена в изолируемых выработках, заполняемых инертным газом.

Изложение основного материала. Схема заполнения азотом изолированного участка с целью создания взрывобезопасной среды или тушения пожара представлена на рис. 2.

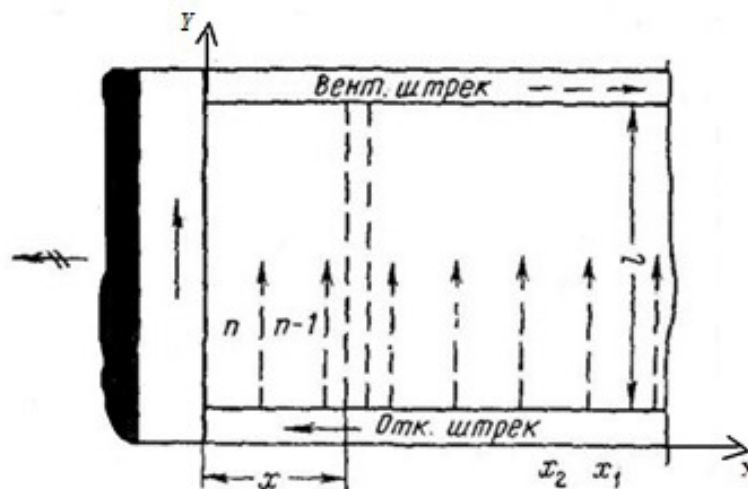


Рис. 2. Схема движения азота на изолируемом участке

Если пренебречь незначительными потерями азота на сорбцию и заполнение трещин стенок по сравнению с утечками его в ВП, то распределение концентрации азота по длине откаточного штрека описывается дифференциальным уравнением

$$\Psi \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{Q(x)}{S_{от}} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где ψ – коэффициент турбулентной диффузии азота, м²/с;

c – концентрация азота в откаточном штреке;

$Q(x)$ – расход смеси в штреке, м³/с;

$S_{от}$ – площадь поперечного сечения откаточного штрека, м²;

x – текущая координата, м;

τ – время, с.

Величину $Q(x)$ определяют из дифференциального уравнения

$$\frac{r(x)L}{m^2} \left(\frac{dQ}{dx} \right)^2 = R \int_0^x Q^2(x) dx + LQ_0^2, \quad (3)$$

где $r(x)$ – удельное сопротивление ВП, кц;

L – длина лавы, м;

m – мощность пласта, м;

R – удельное сопротивление, $R = R_1 + R_3$, кц;

R_1 – удельное сопротивление откаточного штрека, кц;

R_2 – удельное сопротивление лавы, кц;

R_3 – удельное сопротивление вентиляционного штрека, кц;

Q_0 – количество азота, проходящего через лаву, м³/с.

Решение уравнений (2) и (3) с граничными условиями

$$\begin{cases} C(x_0, t) = f(t); \\ C(x, 0) = C_0 \end{cases} \quad (4)$$

путем преобразований Лапласа позволяет получить распределение концентрации азота в откаточном штреке.

Теперь рассмотрим, как проходит фильтрация азота при заполнении участка с трехсторонним примыканием ВП.

Расположим оси координат, как показано на рис. 2.

Для полосы, имеющей абсциссу x , запишем уравнение

$$\Psi \frac{\partial^2 c^*}{\partial y^2} = u(x) \frac{\partial c^*}{\partial y} + \Pi \frac{\partial c^*}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где C^* – концентрация азота, $C^* = C - C_0$;

C_0 – начальная концентрация азота;

$u(x)$ – условная скорость движения азота по ВП, $u(x) = \frac{Q'(x)}{\Pi m h}$, м/с;

$Q'(x)$ – расход азота через полосу шириной h , м³/с.

Расход $Q'(x)$ можно определить как

$$Q'(x) = \int_x^{x+h} \frac{dQ}{dx} dx, \quad (6)$$

$$\text{тогда } u(x) = \frac{Q'(x)}{\Pi mh} = \frac{\int_x^{x+h} \frac{dQ}{dx} dx}{\Pi mh}. \quad (7)$$

При $h \rightarrow 0$ имеем

$$\lim_{h \rightarrow 0} u(x) = \frac{dQ}{dx} \frac{1}{\Pi m}. \quad (8)$$

Согласно исследованиям В.А. Баума [8], коэффициент диффузии ψ может быть с удовлетворительной точностью описан уравнением

$$\psi = k_{\text{Б}} u d, \quad (9)$$

где k – эмпирический коэффициент Баума, $k_{\text{Б}} = 0,01 \dots 0,03$;

u – условная скорость движения азота, м/с;

d – диаметр кусков породы в ВП, м.

Для каждой фиксированной полосы с координатой x_0 решение (5) с учетом уравнений (8) и (9) имеет вид

$$C(x_0, y, t) = \frac{y}{0,2\sqrt{\pi u(x_0)d}} \int_0^t \frac{F(x_0, t-\tau)}{\tau^{3/2}} \exp \left\{ - \left[\frac{\sqrt{u(x_0)}}{0,2} \left(\sqrt{\frac{\tau}{d}} - \frac{y}{0,2\sqrt{du(x_0)\tau}} \right) \right]^2 \right\} d\tau. \quad (10)$$

Зная расход азота $Q(x)$ вдоль откаточного штрека и определив по уравнению (7) скорость $u(x)$, по формуле (10) можно рассчитать изменение концентрации в любой точке ВП.

В работе [10] ВП вместе с примыкающими штреками представляется системой комбинированного параллельно-последовательного соединения.

Принимая закон аэродинамического сопротивления ВП квадратичным и введя функцию $R(x)$ – сопротивление полосы ВП длиной x , авторы записали следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{\sqrt{R}} - \frac{dR}{2R\sqrt{R}} = \frac{m dx}{\sqrt{lr(x)}} + \frac{1}{\sqrt{R+rdx}}, \quad (11)$$

где R – суммарное удельное сопротивление вентиляционного и откаточного штреков, Ом/м;

$r(x)$ – удельное аэродинамическое сопротивление 1 м^3 ВП, находящегося на расстоянии x от лавы, Ом/м³.

Из решения уравнения (11) при определенных приближениях вытекает простая зависимость

$$R(x) = \frac{l\sqrt{a}}{m^2 x^2}, \quad (12)$$

где $a = r(x) = \text{const}$.

Затем методом последовательных шагов рассчитывают распределение скорости азота в ВП.

В работах [8, 10] предложена следующая физическая модель накопления азота в вентиляционном штреке.

Поскольку сопротивление лавы намного меньше сопротивления ВП, то азот, движущийся через лаву, быстрее достигает вентиляционного штрека, чем азот, распространяющийся в потоке утечек через ВП. В начале запуска азота воздух, вытесняемый из ВП, будет разбавлять концентрацию азота.

Далее концентрация азота в потоке из ВП будет возрастать, что приводит к достижению концентраций азота в вентиляционном штреке стационарного (максимального) значения.

Рассмотрим изменение концентрации азота в некотором сечении вентиляционного штрека C_b (*, ϵ).

Азот поступает в вентиляционный штрек двумя путями:

- через откаточный штрек и лаву;
- в потоке утечек через ВП.

Масса азота, принесенная потоком через лаву,

$$M_1 = Q_0 c(x, t). \quad (13)$$

Масса азота, принесенная потоком из ВП,

$$M_2 = \int_0^{x_1} q(x) \left[C_1(y, t) - \int_0^y \frac{dx}{v(x)} \right] dy, \quad (14)$$

где $q(x)$ – расход азота через ВП на расстоянии y от сечения x , м³/с;

$C_1(y, t)$ – концентрация азота в потоке утечек через полосу ВП на расстоянии y от сечения x , %.

Принимаем, что в каждом сечении вентиляционного штрека потоки смешиваются мгновенно.

Тогда, учитывая, что вся масса смеси азота и воздуха, проходящая через сечение x , равна $Q(x)$, получаем изменение концентрации азота в вентиляционном штреке в следующем виде:

$$C_b(x, t) = \frac{\int_0^{x_1} q(y) C_1 \left[y, t - \int_0^y \frac{dx}{v(x)} \right] dy + Q_0 c(x, t)}{Q(x)}. \quad (15)$$

Выводы. Учет фильтрации азота через ВП при заполнении изолируемых выработок выемочного участка шахты позволяет более точно рассчитать динамику концентрации азота в вентиляционном и откаточном штреках и необходимое время работы установки азотного пожаротушения, повысить эффективность тушения с использованием газообразного азота.

Список литературы / References

1. Портола, В.А. Перспектива применения азота для борьбы с пожарами и взрывами в шахтах / В.А. Портола // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 3. – С. 57 – 59.

Portola V.A. *Perspektiva primeneniya azota dlya bor'by s pozharami i vzryvami v shakhtakh* [Prospect of nitrogen application in fighting of the fires and explosions in mines]. *Vestnik KuzGTU – Bulletin of the KuzGTU*, 2006, no. 3, pp. 57-59. (In Russian).

2. Галсанов, Н.Л. Распространение инертных составов в выработанном пространстве шахт / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С. 80 – 83.

Galsanov N.L., Portola V.A. *Rasprostranenie inertnykh sostavov v vyrobotannom prostranstve shakht* [Spreading the inert compositions in the goaf of mines]. *Vestnik KuzGTU – Bulletin of the KuzGTU*, 2013, no. 6, pp. 80-83. (In Russian).

3. Палеев, Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты / Д.Ю. Палеев // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 5. – С. 58 – 62.

Paleyev D.Yu. *Setevaya zadacha provetrivaniya gornyykh vyrabotok i vyrabotannogo prostranstva shakhty* [Network problem of ventilation of mine workings and goaf of a mine]. *Vestnik KuzGTU – Bulletin of the KuzGTU*, 2006, no. 5, pp. 58-62. (In Russian).

4. Говорухин, Ю.М. Методология моделирования фильтрации газоздушных смесей в выработанном пространстве выемочного участка / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов и др. // Вестник Науч. центра по безопасн. работ в угольной пром-сти ВостНИИ. – 2011. – № 1. – С. 72 – 76.

Govorukhin Yu.M., Domrachev A.N., Krivolapov V.G. et al. *Metodologiya modelirovaniya fil'tratsii gazovozdushnykh smesei v vyrabotannom prostranstve vyemochnogo uchastka* [Methodology of modeling the filtration of gas-air mixtures in a working area goaf]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti VostNII – Bulletin of the Scientific center on safety of works in coal industry VostNII*, 2011, no. 1, pp. 72-76. (In Russian).

5. Разработка и внедрение новых способов профилактики, локации и локализации очагов самовозгорания угля в действующих выемочных полях шахт Кузбасса / В.Г. Игишев, Л.П. Белавенцев, В.А. Портола и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 98 с.

Igishev V.G., Belaventsev L.P., Portola V.A. et al. *Razrabotka i vnedrenie novyykh sposobov profilaktiki, lokatsii i lokalizatsii ochagov samovozgoraniya uglya v deistvuyushhikh vyemochnykh polyakh shakht Kuzbassa* [Development and implementation of new methods of prevention, detection and containment of coal spontaneous ignition places in operating mine sections of Kuznetsk basin mines]. *Kemerovo, Kuzbassvuzizdat Publ.*, 2006, 98 p. (In Russian).

6. Горб, В.Ю. Исследование процесса фильтрации азота через выработанное пространство / В.Ю. Горб // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. ВНИИГД. – Донецк, 1971. – Вып. 4. – С. 102 – 103.

Gorb V.Yu. *Issledovanie protsessa fil'tratsii azota cherez vyrabotannoe prostranstvo* [Investigation of nitrogen filtration process through the goaf].

Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. VNIIGD [Mine-rescue work: collected scientific papers of the VNIIGD]. Donetsk, 1971, issue 4, pp. 102-103. (In Russian).

7. Горб, В.Ю. О влиянии выработанного пространства на динамику заполнения инертным газом изолированного участка при прямом ходе отработки лавы / В.Ю. Горб // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. ВНИИГД. – Донецк, 1971. – Вып. 3. – С. 90 – 93.

Gorb V.Yu. *O vliyanii vyrabotannogo prostranstva na dinamiku zapolneniya inertnym gazom izolirovannogo uchastka pri pryamom khode otrabotki lavy* [On influence of the goaf on the dynamics of filling the sealed area with inert gas during the longwall face advance mining]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. VNIIGD* [Mine-rescue work: collected scientific papers of the VNIIGD]. Donetsk, 1971, issue 3, pp. 90-93. (In Russian).

8. Горб, В.Ю. Динамика накопления азота на вентиляционном штреке при запуске в изолированный участок / В.Ю. Горб // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. ВНИИГД. – Донецк, 1971. – Вып. 4. – С. 104 – 107.

Gorb V.Yu. *Dinamika nakopleniya azota na ventilyatsionnom shtreke pri zapuske v izolirovannyi uchastok* [Dynamics of accumulation of nitrogen in ventilation stope during the launch into the sealed area]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. VNIIGD* [Mine-rescue work: collected scientific papers of the VNIIGD]. Donetsk, 1971, issue 4, pp. 104-107. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 28.04.2021

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-01

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

The State operation 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 (+38 062) 343-52-64

NITROGEN FILTRATION THROUGH A GOAF DURING INERTIZATION OF THE WORKING AREA UNDER INSULATING

Purpose. To determine the nitrogen filtration rate through the goaf for calculation of the all-gaseous exchange during inertization of the working area headings.

Methods. Analytical investigations and mathematical calculations of the nitrogen filtration process in the goaf.

Results. The expressions for nitrogen concentration in the gutter and bottom gangway have been obtained, the nitrogen filtration rate in the goaf has been derived.

Scientific novelty. The nitrogen filtration rate during its leakage in the goaf has been calculated.

Practical value. The conducted investigations make it possible to calculate the volume of nitrogen entering into the working area from the goaf and to factor it in the all-gaseous exchange of the mine working under insulating.

Keywords: nitrogen; area under insulating; goaf; bottom gangway; gutter; filtration; concentration.

УДК 622.822.22.: [552.574:543.632.44]

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, глав. науч. сотр.; e-mail: ober.niigd@list.ru;
Виктория Петровна Орликова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;
Виктория Викторовна Волынец, инж. I кат.; e-mail: volynetsvika@mail.ua
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52

ДВУХФАЗНОЕ КИСЛОРОДНОЕ ОКИСЛЕНИЕ УГЛЯ РАЗЛИЧНОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

Цель. Установление закономерностей изменения концентрации кислорода при низкотемпературном окислении поверхности углей различного фракционного состава.

Методы. Математическое моделирование процесса поглощения кислорода твердой фазой угля и экспериментальное исследование его концентрации с помощью хроматографического метода.

Результаты. Получены аналитические и эмпирические зависимости для определения концентрации кислорода внутри пор твердой фазы от удельной сорбционной поверхности частиц различного фракционного состава. Проведен сравнительный анализ концентрации поглощенного твердой фазой кислорода, определенной экспериментально и рассчитанной по теоретической зависимости.

Научная новизна. Подтверждена адекватность полученных результатов при теоретических и экспериментальных исследованиях по определению концентрации сорбированного кислорода внутри пор твердой фазы угля.

Практическая значимость. Установленные зависимости могут быть использованы для исследования гетерогенного окисления угля и его самовозгорания, что повысит достоверность прогноза эндогенной пожароопасности.

Ключевые слова: хемосорбция кислорода; реакционная поверхность; фракционный состав; концентрация кислорода; диффузия газа.

Постановка задачи. Окисление углерода представляет собой двухфазный гетерогенный процесс, состоящий из следующих стадий: адсорбция кислорода внешними поверхностями, диффузия окислителя к внутренним реагирующим поверхностям, химическая реакция и десорбция продуктов реакции. На ранней стадии окисления углерода (до 100 °С) особую роль играют процессы диффузии кислорода и его адсорбции на внешней и внутренней поверхностях твердых частиц адсорбента [1].

При окислении углерода твердого топлива протекают необратимые сорбционные процессы, скорость которых с течением времени замедляется, что обусловлено расходом наиболее доступной для реагирования внешней поверхности угля [2]. Многочисленными исследованиями установлена вполне определенная зависимость скорости окисления угля от степени его измельчения, которая выражается в активации сорбционного процесса при уменьшении размера частиц. Несмотря на обширные исследования низкотемпературного

окисления угля и связанного с ним самовозгорания, мнения ученых о механизме и начальной стадии процесса достаточно противоречивы. Исследователи В.С. Веселовский, В.И. Агафонов, В.Я. Альперович, П.С. Пашковский и другие считают, что низкотемпературное окисление угля происходит в диффузионной области [2]. Другие исследователи придерживаются мнения о внешней кинетической природе низкотемпературного окисления, так как интенсивность этого процесса ограничена скоростью реакции кислорода с внешней поверхностью угля [3].

Ученые доказали, что для частиц угля размером 0,5 мм и менее скорость окисления перестает зависеть от степени его измельчения. Этот факт можно объяснить диффузионными представлениями, согласно которым окисление частиц размером более 0,5 мм происходит в диффузионной области, а при окислении более мелких частиц в этом процессе участвуют и все внутренние поверхности угля, то есть диффузия перестает контролировать окисление [1].

Существует также третья точка зрения, согласно которой процесс протекает в переходной области – между внешней кинетикой и внутренней диффузией [3]. Эти представления о промежуточной области процесса низкотемпературного окисления согласуются с экспериментальными данными и объясняют характер температурной зависимости скорости окисления. Тот факт, что окисление угля происходит в среднем диапазоне, означает, что для некоторых видов углерода процесс окисления будет контролироваться, например, диффузией, а для других – с меньшей реакционной способностью и большей проницаемостью для диффузии – степенью химического взаимодействия с кислородом [3].

Таким образом, представляют интерес дальнейшие исследования диффузионных процессов низкотемпературного окисления углерода с переменной реакционной поверхностью.

Анализ новых исследований и публикаций. Исследования влияния интенсивности хемосорбции кислорода углеродом на склонность угля к самовозгоранию позволили установить зависимость скорости химических реакций от коэффициента диффузии кислорода в его порах, коэффициента массопереноса, кинетического коэффициента адсорбции, константы химической реакции [4].

В данной работе представлено численное решение задачи при теоретическом исследовании гетерогенного окисления угля и на конкретных примерах показана динамика концентрации кислорода в газовой и твердой фазах.

Частный случай математической модели при отсутствии выделения метана и постоянной поверхности реакции рассмотрен авторами работы [5], что позволило получить аналитическое решение поставленной задачи и проанализировать влияние различных факторов на динамику окислительных процессов.

Однако представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены для одной фракции угля, в то время как его фактический гранулометрический состав в шахтах при добыче, выбросах,

обвалах и геологических нарушениях различен. Кроме того, известно, что размер частиц угля влияет на скорость поглощения кислорода [2].

Учитывая вышеизложенное, при изучении низкотемпературного окисления угля целесообразно использовать модели, которые позволят исследовать параметры адсорбции частиц угля различного фракционного состава.

Цель работы – установление закономерностей изменения концентрации кислорода при низкотемпературном окислении поверхности угля различного фракционного состава.

Изложение основного материала. Для математического моделирования процессов хемосорбции кислорода на поверхности частиц угля рассмотрим предложенную выше модель [5] и предположим, что угольное скопление представляет собой рыхлую массу, состоящую из твердой и газовой фаз.

Для описания процессов, протекающих на твердой поверхности и в газовой фазе при низкотемпературном окислении самонагревающегося вещества, используем систему дифференциальных уравнений вида [4]

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_T}{\partial \tau} = \frac{S_q}{(1-\varepsilon)} [\beta C - Z_q(\beta + K)]; \\ \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{S_q}{\varepsilon V} \beta (Z_T - C), \end{cases} \quad (1)$$

где Z_T – концентрация кислорода внутри пор твердой фазы, моль/м³;

C – концентрация кислорода в газовой фазе, омывающей частицы угля, моль/м³;

τ – время, с;

S_q – суммарная площадь поверхности угля в твердой фазе, м²;

ε – порозность угольного скопления;

V – объем угольного скопления, м³;

β – коэффициент массообмена, м/с;

K – показатель скорости химической реакции, м/с;

v – скорость потока воздуха, м/с;

x – координата вдоль направления движения воздуха, м;

D – коэффициент диффузии кислорода между частицами угля в газовой фазе, м²/с.

Граничные и начальные условия для системы уравнений (1) запишем в виде

$$\begin{cases} Z_T(x, 0) = 0; & C(x, 0) = 0; \\ C(x, \tau) = C_0; & \frac{\partial C(\infty, \tau)}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация кислорода в газовой фазе, моль/м³.

Примем, что порозность угольного скопления $\varepsilon = 0,5$, и представим параметры $\tilde{\beta}$, с⁻¹, и \tilde{k} , с⁻¹, в виде

$$\tilde{\beta} = \frac{\beta \gamma S_q}{(1-\varepsilon)V}; \quad \tilde{k} = \frac{KS_q}{(1-\varepsilon)V} = k, \quad (3)$$

где S_q/V – удельная сорбционная поверхность частиц, m^{-1} , равная

$$\frac{S_q}{V} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d}, \quad (4)$$

γ – стерический множитель;

k – константа скорости химической реакции первого порядка на поверхности твердой фазы, s^{-1} ;

d – средний диаметр частиц угля анализируемой фракции, м.

С учетом выражения (3) приведем систему уравнений (1) к виду

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_T}{\partial \tau} = \tilde{\beta}(C - Z_T) - \tilde{k}Z_T; \\ \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \tilde{\beta}(Z_T - C). \end{cases} \quad (5)$$

Проинтегрируем по x второе уравнение системы (5) и, пренебрегая продольной диффузией, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Z_T' = \tilde{\beta}(C - Z_T) - \tilde{k}Z_T; \\ C' = \frac{Q(C_0 - C)}{v} + \tilde{\beta}(Z_T - C), \end{cases} \quad (6)$$

где Q – утечки воздуха через пористую среду, m^3/s .

Считая параметры уравнений константами, решим второе уравнение системы (6) относительно функции Z_T и, вычисляя ее производную по времени, подставим в первое уравнение этой системы. В результате получим одно уравнение второго порядка относительно функции кислорода C в газовой фазе при условии, что дискриминант больше нуля

$$C'' + a_1 C' + a_0 C = b, \quad (7)$$

где коэффициенты равны

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\tilde{\beta}Q}{v} + \tilde{k} \left(\tilde{\beta} + \frac{Q}{v} \right); \\ a_1 &= \frac{Q}{v} + 2\tilde{\beta} + \tilde{k}; \\ b &= (\tilde{\beta} + \tilde{k}) \frac{QC_0}{v}. \end{aligned} \quad (8)$$

Общее решение уравнения (7) имеет вид

$$C(\tau) = \frac{b}{a_0} + A_1 e^{r_1 \tau} + A_2 e^{r_2 \tau}, \quad (9)$$

где r_1 и r_2 – корни характеристического уравнения, эквивалентного однородному уравнению (7), которые равны

$$r_1 = -\frac{a_1}{2} + \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_0}; \quad r_2 = -\frac{a_1}{2} - \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_0}. \quad (10)$$

Поскольку уравнение (7) второго порядка относительно производной по времени, то для определения констант A_1 и A_2 , входящих в решение (9), используем начальные условия $C(0) = C_0$ и $Z_T(0) = 0$. В результате получим

$$C'(0) = -\tilde{\beta}C_0. \quad (11)$$

Подставляя дважды начальные условия в решение (9), найдем искомые константы A_1 и A_2 в виде

$$A_1 = [\tilde{\beta}C_0 + (C_0 - C_1)r_2] / (r_2 - \eta); \quad A_2 = C_0 - C_1 - A_1, \quad (12)$$

где $C_1 = b/a_0$ – предельная концентрация кислорода в газовой фазе, моль/м³.

Для определения вида функции Z_T используем решение (9) и его производную и, подставляя их во второе уравнение системы (6), получим

$$Z(\tau) = \frac{A_1 \{\eta + [U + \tilde{\beta}]\} \exp(\eta\tau) - UC_0}{\tilde{\beta}} + \frac{A_2 \{r_2 + [U + \tilde{\beta}]\} \exp(r_2\tau) + [U + \tilde{\beta}]b / a_0}{\tilde{\beta}}. \quad (13)$$

Решение задачи можно упростить, считая, что процессы в газовой фазе протекают значительно быстрее, чем в твердой. Это позволяет принять во втором уравнении системы (6) $C' = 0$, из которого получим

$$C(\tau) = \frac{QC_0/V + \tilde{\beta}Z_T(\tau)}{Q/V + \tilde{\beta}}. \quad (14)$$

Подставляя формулу (14) во второе уравнение системы (6), получим его решение для концентрации кислорода внутри пор твердой фазы в виде

$$Z_T = \frac{C_0}{1 + (1 + \tilde{\beta}V/Q)k/\tilde{\beta}}. \quad (15)$$

Для проверки адекватности выражения (15) воспользуемся результатами исследований хемосорбции кислорода частицами углей различного фракционного состава, которые были получены ранее и опубликованы в работе [4]. Используя выражение (15), рассчитаем концентрацию кислорода внутри пор твердой фазы каждой фракции угля размером 0,13...0,85 мм при следующих исходных параметрах: $C_0 = 9,36$ моль/м³; $k = 2,1 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; $\varepsilon = 0,5$; $v = 2 \cdot 10^{-5}$ м/с; $D = 0,2 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\gamma = 0,01$. Значения промежуточных величин и конечные результаты представлены в таблице.

Таблица

Параметры хемосорбции кислорода

Средний диаметр частиц $d \cdot 10^4$, м	1,30	2,50	3,75	4,20	6,00	8,50
Удельная сорбционная поверхность частиц $S_{\text{ч}}/V$, м ²	27692,3	14400,0	9600,0	8571,4	6000,0	4235,3
Коэффициент адсорбции $\beta \cdot 10^7$, м/с	4,61	2,40	1,60	1,43	1,00	0,71
Теоретическое значение Z_p , моль/м ³	7,42	4,85	3,06	2,62	1,51	0,82
Константа скорости реакции окисления на поверхности угля k , с ⁻¹	0,0064	0,0047	0,0039	0,0041	0,0030	0,0026
Экспериментальное значение Z_3 , моль/м ³	2,11	1,62	1,36	1,42	1,06	0,93

Расчет экспериментальных значений Z_3 основан на результатах лабораторного хроматографического исследования, проведенного при введении 0,125 см³ кислорода в колонку, заполненную анализируемым углем различного фракционного состава. Принимаем, что скорость окисления угля описывают уравнением реакции первого порядка в виде

$$-\frac{dC}{d\tau} = kC,$$

из которого получено выражение для определения текущей концентрации кислорода в экспоненциальной форме

$$C = C_0 e^{-k\tau}, \quad (16)$$

где C – концентрация кислорода на выходе потока из пористой среды, моль/м³;

τ – время удерживания кислорода, с, принятое $\tau = 35$ с.

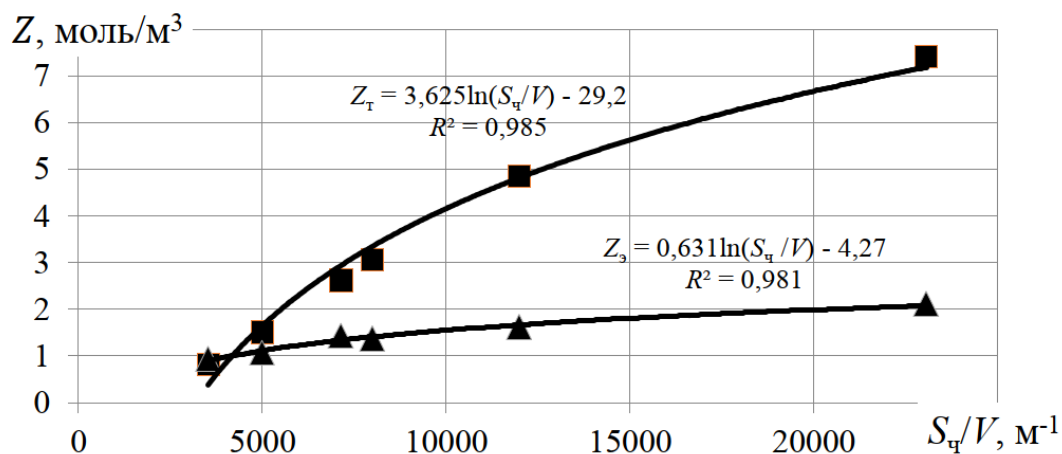
Концентрацию кислорода, поглощенного твердой фазой исследуемой пробы угля Z_3 , моль/м³, рассчитывали по разности концентраций на входе и выходе из пористой среды

$$Z_3 = C_0 - C. \quad (17)$$

На основании полученных результатов установлены зависимости концентрации поглощенного кислорода, рассчитанной по формуле (15) и в результате экспериментов Z_3 , от удельной поверхности анализируемых частиц угля, на которой протекает процесс окисления (см. рис.).

Анализ представленных данных показывает, что с уменьшением фракции угля увеличиваются значения удельной сорбционной поверхности, что способствует большему поглощению кислорода. Для наибольшего размера частиц теоретические и экспериментальные значения Z наиболее близки, однако

с уменьшением диаметра частиц разница этих величин возрастает. Отличие полученных значений может быть обусловлено влиянием коэффициента диффузии кислорода, так как перенос газа через твердую поверхность – сложный процесс, включающий разные виды диффузии, которые зависят от размера пор угольных частиц [7]. Поэтому представляют интерес дальнейшие исследования влияния коэффициента диффузии кислорода на протекание гетерогенного окисления угля.



Зависимость концентрации поглощенного кислорода от удельной сорбционной поверхности анализируемых частиц угля:

■ – значения Z_T по формуле (15); ▲ – значения $Z_с$ по формуле (17)

Кроме того, некоторое несоответствие теоретических значений обусловлено необходимостью использования стериического множителя и постоянного значения коэффициента диффузии кислорода в поры угля, а также отсутствием учета выделения метана в процессе исследований.

Выводы. Выполнены теоретические исследования хемосорбции кислорода углями различного фракционного состава, установлена зависимость концентрации кислорода внутри пор твердой фазы от удельной сорбционной поверхности. Проведен сравнительный анализ аналитической и эмпирической зависимости концентрации поглощенного кислорода, который показал влияние коэффициента диффузии на протекание сорбционного процесса в угольных частицах различной фракции.

Список литературы / References

1. Захаров, Е.И. Оценка опасности самовозгорания угля на ранней стадии процесса низкотемпературного окисления / Е.И. Захаров, Д.Д. Малахова // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2015. – Вып. 1. – С. 22 – 30.

Zakharov Ye.I., Malakhova D.D. *Otsenka opasnosti samovozgoraniya uglya na rannei stadii protsessa nizkotemperaturnogo okisleniya* [Assessment of coal

spontaneous combustion hazard at the early stage of low-temperature oxidation process]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* – Proceedings of the Tula State University. Earth sciences, 2015, issue 1, pp. 22-30. (In Russian).

2. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. – 792 с.

Pashkovskiy P.S. *Endogennye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 792 p. (In Russian).

3. Развитие процесса самонагрева в скоплениях угля под действием молекулярной диффузии кислорода / Е.П. Ютяев, В.А. Портола, А.А. Мешков и др. // Уголь. – 2018. – № 10. URL: <http://www.ugolinfo.ru/index.php?article=201810042>.

Yutyayev Ye.P., Portola V.A., Meshkov A.A., Kharitonov I.L., Zhdanov A.N. *Razvitie protsessa samonagrevaniya v skopleniyakh uglya pod deistviem molekulyarnoi diffuzii kisloroda* [Development of a spontaneous heating process in coal accumulations under the influence of oxygen molecular diffusion]. *Ugol' – Coal*, 2018 no. 10. Available at: <http://www.ugolinfo.ru/index.php?article=201810042> (In Russian).

4. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N. *Aktual'nye voprosy bor'by s samovozgoraniem uglya* [Actual problems of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p. (In Russian).

5. Определение констант скоростей химических реакций угля с кислородом на основании экспериментов в хроматографических условиях / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Б.И. Кошовский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – Вып. 19. – С. 39 – 50.

Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N., Koshovskiy B.I. *Opredelenie constant skorostei khimicheskikh reaktzii uglya s kislorodom na osnovanii eksperimentov v khromatograficheskikh usloviyakh* [Determination of rate constants of coal chemical reactions with oxygen on the basis of experiments in chromatographic conditions]. *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh i zdorovykh uslovii truda v ugol'nykh shakhtakh: sb. nauch. tr.* [Methods and means of creation of the safe and healthy working conditions in coal mines: collected scientific papers]. Makeyevka, MakNII Publ., 2007, issue 19, pp. 39-50. (In Russian).

6. Греков, С.П. Моделирование хемосорбционных процессов кислорода углями разных степеней метаморфизма при температурах 30...100 °С / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 34 – 44.

Grekov S.P., Koshovskiy B.I., Zinchenko I.N. *Modelirovanie khemosorbtsionnykh protsessov kisloroda uglyami raznykh stepenei metamorfizma pri temperaturakh 30...100 °С* [Simulation of chemisorption processes of oxygen by coal of different

metamorphic grades at the temperatures of 30...100 °C]. *Gornospasatel'noe delo: sb.nauch. tr.* / NIIGD “Respirator” [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2008, issue 45, pp. 34-44. (In Russian).

7. Греков, С.П. Сорбционные процессы в угольных скоплениях при метановыделении и испарении влаги / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. – Херсон, 2006. – Вып. 2(25). – С. 166 – 173.

Grekov S.P., Zinchenko I.N., Tynda G.B. *Sorbtsionnye protsessy v ugol'nykh skopleniyakh pri metanovydelenii i isparenii vlagi* [Sorption processes in coal accumulations during methane release and water evaporation]. *Vestnik Khersonskogo nats. tekhn. un-ta – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 2006, issue 2(25), pp. 166-173. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 15.02.2021

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Viktoriya Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate;

e-mail: orlikova.69@yandex.ua;

Viktoriya Viktorovna Volynets, engineer of the 1st category; e-mail: volynetsvika@mail.ua

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-79-07

TWO-PHASE OXYGEN OXIDATION OF COAL OF DIFFERENT FRACTIONAL COMPOSITION

Purpose. Establishment of regularities of oxygen concentration fluctuation during the low-temperature oxidation of the surface of coal of the different fractional composition.

Methods. Mathematical modeling of a process of the oxygen absorption by the solid phase of coal and experimental investigation of its concentration applying the chromatographic method.

Results. The analytical and empirical relations have been obtained for determination of the oxygen concentration inside the pores of the solid phase in dependence to specific sorptive surface of particles of the different fractional composition. The comparative analysis of the concentration of oxygen adsorbed by the solid phase has been conducted; the concentration has been determined experimentally and calculated according to the theoretical dependence.

Scientific novelty. The adequacy has been confirmed for the results of the theoretical and experimental investigations obtained for determination of the adsorbed oxygen concentration inside the pores of the coal solid phase.

Practical value. The established dependences may be used for the investigation of the coal heterogeneous oxidation and its spontaneous combustion which will improve reliability of the spontaneous fire hazard prediction.

Keywords: *oxygen chemisorption; reaction surface; fractional composition; oxygen concentration; gas diffusion.*

УДК 614.845.2:001.891.573

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, первый заместитель директора (по научной работе); e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

*Николай Александрович Галухин, ст. науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36*

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗАКАЧНЫХ ОГNETУШИТЕЛЯХ

Цель. Разработать математическую модель рабочих процессов истечения пожаротушащей жидкости для обоснования параметров закачного огнетушителя с эластичной емкостью, получить аналитические выражения для определения давления, расхода, газового объема и времени работы огнетушителя.

Методы. Теоретические исследования процесса истечения пожаротушащего вещества в закачных огнетушителях.

Результаты. Получены аналитические зависимости газодинамических параметров от конструктивных характеристик закачного огнетушителя с эластичной емкостью.

Научная новизна. Установлено, что аналитические выражения динамики объема и давления в газовой полости являются показательными функциями времени работы закачного огнетушителя с эластичной емкостью. Получены математические зависимости для определения расхода жидкости, скорости жидкости на срезе сопла и времени вытеснения пожаротушащей жидкости.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволяют установить влияние конструктивных характеристик закачного огнетушителя на параметры истекающей струи пожаротушащего вещества для обоснования выбора его оптимальной конструкции.

Ключевые слова: *закачной огнетушитель; эластичная емкость; газодинамические процессы; параметры; истечение жидкости.*

Постановка проблемы. Закачные огнетушители относятся к первичным средствам пожаротушения для ликвидации пожара в начальной стадии. Разнообразие применяемых пожаротушащих веществ (вода, порошок, углекислота, пенообразователь и др.) предопределило широкое применение закачных огнетушителей для тушения пожаров площадью 5...10 м² в различных отраслях промышленности [1 – 3]. Эффективность пожаротушения во многом определяется конструктивными параметрами огнетушителей, влияющими на газодинамические процессы истечения пожаротушащего вещества. Нахождение закономерностей изменения газового и жидкостного объемов, установление влияния конструктивных параметров на характеристики подачи огнетушащей жидкости в защищаемую зону – актуальные задачи, решение которых позволит обосновать оптимальные конструктивные параметры закачного огнетушителя.

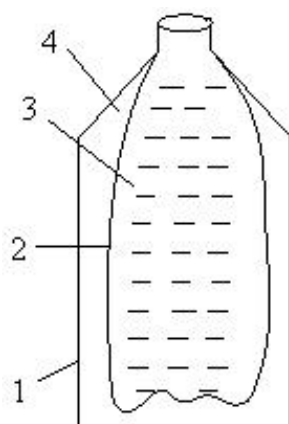
Анализ последних исследований. В работе [4] приведены результаты испытаний экспериментальных образцов огнетушителей в трех взаимно перпендикулярных направлениях: в горизонтальном и двух вертикальных

положениях, отличающихся углом поворота на 180° . Испытания подтвердили правильность конструктивного решения, при котором продолжительность подачи, длина струи и ее особенности, остаток огнетушащего вещества не зависят от пространственной ориентации переносного закачного огнетушителя.

В статье [5] рассмотрены процессы вытеснения огнетушащей жидкости из эластичной емкости закачного огнетушителя. Получены уравнения, связывающие конструктивные параметры с газодинамическими параметрами закачного огнетушителя. Из-за сложности системы уравнений не удалось получить ее аналитическое решение, а графики изменения давления и газового объема получены методом численного решения.

Цель исследования – разработка математической модели рабочих процессов истечения пожаротушащей жидкости для обоснования параметров закачного огнетушителя с эластичной емкостью, получение аналитических выражений для определения давления, расхода, газового объема и времени работы огнетушителя.

Результаты исследования. Конструктивное исполнение закачного огнетушителя определяет особенности газодинамических процессов (см. рис.).



Конструктивная схема закачного огнетушителя
с эластичной емкостью:

1 – корпус; 2 – эластичная емкость; 3 – огнетушащая жидкость; 4 – газовая полость

Выброс без остатка огнетушащей жидкости осуществляется за счет равномерного сжатия газом эластичной емкости. Процесс истечения жидкости из эластичной емкости быстротечен, поэтому теплообменом между газовой полостью и окружающими конструктивными деталями закачного огнетушителя можно пренебречь, а термодинамический процесс перехода газа из одного состояния в другое – адиабатический.

Кроме того, масса газа в газовой полости при ее расширении за счет вытеснения огнетушащей жидкости не изменяется, то есть имеем

$$m_1 = const, \quad (1)$$

где m_1 – масса газа в газовой полости, кг.

При условии выполнения равенства (1) справедлива зависимость между объемом газа и его давлением для адиабатического процесса

$$\frac{P_0}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^k, \quad (2)$$

где P_0 – давление зарядки газа, Па;

P_1 – текущее давление газа в корпусе, Па;

V_0 – начальный объем газа в огнетушителе, м³;

V_1 – текущий объем газа в огнетушителе, м³;

k – показатель адиабаты газа.

Соотношение занимаемых объемов газа и пожаротушащей жидкости выражено следующим уравнением:

$$V_1 + V_2 = V_k, \quad (3)$$

где V_2 – объем пожаротушащей жидкости, м³;

V_k – объем огнетушителя, м³.

Истечение пожаротушащей жидкости через сопло огнетушителя выражено уравнением

$$\frac{dV_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_a}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода;

τ – время работы огнетушителя, с;

S – площадь сечения сопла, м²;

ρ – плотность огнетушащей жидкости, кг/м³;

P_a – атмосферное давление, Па.

Тогда математическая модель газодинамического процесса истечения жидкости из закачного огнетушителя с эластичной емкостью описывают системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{P_0}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^k; \\ V_1 + V_2 = V_k; \\ \frac{dV_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_a}. \end{cases} \quad (5)$$

Систему уравнений (5) можно решить методом последовательной подстановки относительно переменных P_1 , V_1 , V_2 . По искомым функциям находим время истечения, расход и скорость огнетушащей струи.

$$\text{Получаем } V_2 = V_k - V_1; \quad V_1 = \frac{P_0 V_0}{P_1^{\frac{1}{k}}}; \quad V_2 = V_k - \frac{P_0 V_0}{P_1^{\frac{1}{k}}}.$$

Тогда

$$-P_0 V_0 \frac{dP_1^{-\frac{1}{k}}}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_a}. \quad (6)$$

Преобразуем уравнение (6) с учетом того, что P_1 – сложная функция:

$$\frac{P_0 V_0}{k} P_1^{-\frac{k+1}{k}} \frac{dP_1}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_a}.$$

Полученное дифференциальное уравнение решим методом разделения переменных и интегрируем обе его части

$$\int_{P_0}^{P_1} \frac{dP_1}{P_1^{\frac{k+1}{k}} \sqrt{P_1 - P_a}} = -\frac{\mu S k}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau. \quad (7)$$

Левая часть уравнения (7) – интеграл от дифференциального бинома с дробным показателем степени при P_1 , равным $\frac{k+1}{k}$, который не выражается через элементарные функции. Для аналитического решения уравнения (7) упростим подынтегральную функцию, заменив ее на $\frac{1}{P_1^{\frac{k+1}{k}} \sqrt{P_1}}$. Такая замена

допустима с учетом того, что атмосферное давление P_a существенно меньше давления P_1 в корпусе огнетушителя. Анализ результатов исследований показывает, что относительная ошибка приближения в диапазоне давлений 1,6...0,4 МПа изменяется в пределах 3,3...13,0%. Тогда в первом приближении уравнение (7) имеет вид

$$\int_{P_0}^{P_1} P_1^{-\frac{1,5k+1}{k}} dP_1 = -\frac{\mu S k}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau. \quad (8)$$

После интегрирования получаем показательное уравнение относительно P_1

$$P_1 = \left[P_0^{-\frac{0,5k+1}{k}} + \frac{\mu S (1+0,5k)}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau \right]^{-\frac{k}{0,5k+1}}. \quad (9)$$

Зависимость (9) достоверно отображает физический процесс истечения жидкости: при $\tau = 0$ давление равно давлению первоначальной зарядки огнетушителя P_0 , а при $\tau \rightarrow \infty - P_1 \rightarrow 0$, то есть огнетушитель разряжается.

Расход огнетушащей жидкости Q , м³/с, находим по формуле

$$Q = -\frac{dV_2}{d\tau} = \mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\left[P_0^{-\frac{0,5k+1}{k}} + \frac{\mu S (1+0,5k)}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau \right]^{-\frac{k}{0,5k+1}} - P_a}. \quad (10)$$

Изменение газового объема в огнетушителе определим, подставляя P_1

из выражения (9) в следующее выражение:

$$V_1 = P_0 V_0 \left[P_0^{-\frac{0,5k+1}{k}} + \frac{\mu S(1+0,5k)}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau \right]^{-\frac{1}{1+0,5k}}. \quad (11)$$

Время работы огнетушителя определим из условия, при котором сжатый газ полностью вытеснит пожаротушащую жидкость из эластичной емкости, то есть при выполнении равенства

$$V_k = P_0 V_0 \left[P_0^{-\frac{1+0,5k}{k}} + \frac{\mu S(1+0,5k)}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau \right]^{-\frac{1}{1+0,5k}},$$

решив которое, получим

$$\tau = \frac{P_0 V_0}{\mu S(1+0,5k)} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \left[\left(\frac{V_k}{P_0 V_0} \right)^{1+0,5k} - P_0^{-\frac{1+0,5k}{k}} \right]. \quad (12)$$

Скорость истечения жидкости v , м/с, на срезе сопла огнетушителя вычислим по формуле

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\left[P_0^{-\frac{0,5k+1}{k}} + \frac{\mu S(1+0,5k)}{P_0 V_0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \tau \right]^{-\frac{-k}{1+0,5k}} - P_a},$$

где φ – коэффициент скорости (безразмерная величина, характеризующая влияние сил вязкого трения на скорость истечения в сжатом сечении отверстия).

Выводы

- Математическая модель газодинамических процессов в закачном огнетушителе с эластичной емкостью разработана в виде системы уравнений и начальных условий. Получены аналитические зависимости изменения во времени давления, газового объема, объемного расхода, скорости и времени истечения жидкости.

- Результаты исследований позволяют установить влияние конструктивных параметров закачных огнетушителей на характеристики истечения пожаротушащего вещества, повысить эффективность пожаротушения за счет оптимального выбора конструкции огнетушителя.

Список литературы / References

1. Огнетушители закачного типа / Н.В. Навценя, Н.В. Исавнин, В.И. Терин, В.М. Савин // Проблемы развития пожарной техники: сб. науч. тр. М.: ВНИИПО, 1986. – С. 86 – 90.

Navtsenya N.V., Isavnin N.V., Terin V.I., Savin V.M. *Ognetushiteli zakachnogo tipa* [Rechargeable fire extinguishers]. *Problemy razvitiya pozharnoi tekhniki: sb.*

nauch. tr. [Problems of development of the fire engineering: collected scientific papers]. Moscow, VNIPO Publ., 1986, pp. 86-90. (In Russian).

2. Мамаев, В.В. Параметры газоаккумулятора автоматического порошкового огнетушителя / В.В. Мамаев, И.Ф. Дикенштейн, А.А. Пилипенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 90 – 98.

Mamayev V.V., Dikenshtein I.F., Pilipenko A.A. *Parametry gazoakkumulyatora avtomaticheskogo poroshkovogo oagnetushitelya* [Parameters of a gas accumulator of an automatic dry powder rechargeable fire extinguisher]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 90-98. (In Russian).

3. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ / А.В. Карпышев, А.Л. Душкин, Н.Н. Рязанцев и др. // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 2. – С. 69 – 74.

Karpyshev A.V., Dushkin A.L., Ryazantsev N.N. et al. *Razrabotka vysokoeffektivnogo universal'nogo oagnetushitelya na osnove generatsii strui tonkoraspylyonnykh oagnetushashhikh veshhestv* [Development of a highly effective universal fire extinguisher based on generating jets of fine-sprayed fire extinguishing agents]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69-74. (In Russian).

4. Балта, Д.Ф. Повышение эффективности переносного огнетушителя / Д.Ф. Балта // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 148 – 152.

Balta D.F. *Povyshenie effektivnosti perenosnogo oagnetushitelya* [Improvement of the portable fire extinguisher effectiveness]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": sb. nauch. tr.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": collected scientific papers]. Donetsk, 2015, issue 52, pp. 148-152. (In Russian).

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

Pashkovskiy P.S. *Sovershenstvovanie konstruksii zakachnykh ruchnykh oagnetushitelei* [Construction improvement of hand dry powder rechargeable fire extinguishers]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2018, no. 4(55), pp. 15-24. (In Russian).

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director (on science);

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, senior scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-36

GAS-DYNAMIC PROCESSES IN DRY POWDER RECHARGEABLE FIRE EXTINGUISHERS

Purpose. To develop a mathematical model of fire-extinguishing liquid outflow working processes for substantiation of parameters of a dry powder rechargeable rubbery tank fire extinguisher; to obtain analytical expressions for determination of pressure, flow rate, gas volume and operation time of the fire extinguisher.

Methods. Theoretical investigations of the process of fire extinguishing agent outflow in the dry powder rechargeable fire extinguishers.

Results. The analytical dependences of gas dynamic parameters on the design characteristics of the dry powder rechargeable rubbery tank fire extinguisher have been obtained.

Scientific novelty. It has been established that the analytical expressions of the volume dynamics and pressure in the gas chamber are the exponential functions of the operation time of the dry powder rechargeable rubbery tank fire extinguisher. The mathematical dependences for determination of the liquid flow rate, liquid velocity on the nozzle cut and discharge time of the fire-extinguishing liquid have been derived.

Practical value. The obtained results of investigations make it possible to determine the influence of the design characteristics of the dry powder rechargeable fire extinguisher on the parameters of the outflowing jet of the fire-extinguishing agent for substantiating the choice of its optimal construction.

Keywords: *dry powder rechargeable fire extinguisher; rubbery tank; gas-dynamic processes; parameters; liquid outflow.*

УДК [544.723:543.544.3]:[547.284.3 + 547.332/.3 + 547.272'92]

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

Олег Владимирович Храпоненко, науч. сотр.; e-mail: olghrap@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55*

ОБНАРУЖЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ГАЗОВОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Цель. Исследование сорбентов на основе различных инертных твердых носителей и жидких фаз для обнаружения летучих компонентов легковоспламеняющихся жидкостей и последующей их идентификации методом газовой хроматографии.

Методы. Исследования с применением метода газожидкостной хроматографии.

Результаты. Проведены сравнительные исследования сорбентов для газохроматографического разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола – компонентов легковоспламеняющихся жидкостей. В качестве инертных твердых носителей исследованы хроматон N-AW, модифицированный 5 и 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э, хроматон N-AW-DMCS, модифицированный 15 % масс. апиэзона L, инертон AW-DMCS, модифицированный 10 % масс. сквалана; инертон SUPER, модифицированный 5 % масс. OV-1 (полидиметилсилоксан). Определены основные параметры эффективности газохроматографических колонок: число теоретических тарелок, высота, эквивалентная теоретической тарелке, и критерий разделения. Показано, что лучшей разделительной способностью обладают сорбенты на основе хроматона N-AW с 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э и инертна SUPER с 5 % масс. OV-1. Рассчитан порог обнаружения для ацетона, этилацетата, бензола, толуола при индивидуальном и совместном их присутствии в пробах.

Научная новизна. Разработаны сорбенты для газохроматографического обнаружения ацетона, этилацетата, бензола и толуола во фрагментах, изъятых с места пожара.

Практическая значимость. Для разработанных сорбентов определены времена выхода ацетона, этилацетата, бензола и толуола, которые могут быть использованы в качестве критериев идентификации инициаторов горения при проведении пожарно-технического исследования фрагментов, изъятых с места пожара. Получены хроматограммы разделения компонентов на сорбентах, приготовленных на инертоне SUPER с 5 % масс. OV-1 (полидиметилсилоксан) и хроматоне N-AW с 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э.

Ключевые слова: ацетон; бензол; время удерживания; сорбент; толуол; хроматограмма; этилацетат.

Постановка проблемы. Необходимое условие установления причины пожара – достоверное решение задачи обнаружения и идентификации следовых количеств легковоспламеняющейся или горючей жидкости, находящейся в среде-носителе на месте пожара, с целью получения максимального объема информации о ее природе и составе. К наиболее распространенным средствам поджога относят светлые нефтепродукты: бензины, керосины, дизельное топливо, их смеси и др.

Также могут быть использованы в качестве инициаторов горения растворители для лакокрасочных материалов, клеи, мастики, краски, жидкости

для очистки кистей, косметические средства, изготовленные на органических растворителях, технические жидкости, представляющие собой сложные смеси органических соединений – эфиров, кетонов, спиртов, ароматических углеводородов и др.

Химический состав некоторых органических растворителей для лаков, клеев, мастик включает ацетон 3...30 %, этилацетат 5...25 %, толуол 40...50 %, бензол 10...40 % и др. [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Критический анализ последних исследований показал, что проблема обнаружения, диагностики и идентификации остатков легковоспламеняющихся нефтепродуктов широко изучена и освещена в научно-технической литературе [2 – 4]. Для решения задач, связанных с обнаружением таких компонентов легковоспламеняющихся жидкостей, как ацетон, этилацетат, бензол и толуол, сведений о приемах и способах, которые позволяют эффективно их обнаруживать в объектах после пожаров, недостаточно. Анализ состояния исследуемой проблемы обусловил выбор объекта, метода и направления дальнейших исследований.

Цель работы – исследование компонентов легковоспламеняющихся жидкостей – ацетона, этилацетата, бензола и толуола – методом газовой хроматографии.

Метод исследования. Определение компонентов смесей неизвестного состава и дальнейшую их идентификацию выполняют методом газовой хроматографии. Применение метода объясняют следующими преимуществами:

- высокой чувствительностью, позволяющей определять компонентный состав смеси с концентрацией каждого компонента до $10^{-8} \dots 10^{-9}$ мг/мл;
- высокой точностью анализа с погрешностью измерения не более 5 %;
- высокой информативностью определения типа анализируемой смеси по хроматограмме с использованием способа «отпечатков пальцев»;
- высокой селективностью, так как нет необходимости проводить предварительное разделение образца;
- малым объемом пробы для анализа (1 мкл).

Идентификация методом газовой хроматографии основана на сравнении времени удерживания или удерживаемых объемов известных соединений с соответствующими характеристиками удерживания для анализируемой смеси неизвестных веществ. Если условия разделения идентичны, то время удерживания или удерживаемый объем – характеристики компонента.

Разделяющая способность метода прежде всего определяется селективностью и эффективностью используемого сорбента, свойства которого, в свою очередь, зависят от характеристик инертного твердого носителя и неподвижной жидкой фазы. Твердый носитель должен отличаться отсутствием каталитической активности и необратимой адсорбции по отношению к разделяемым соединениям, 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 пленкой.

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

Изложение основного материала и полученных научных результатов.

В качестве объектов исследования в работе выбраны ацетон, этилацетат, бензол и толуол как основные компоненты легковоспламеняющихся жидкостей. Объекты исследования относятся к разным классам химических соединений: ацетон – насыщенный кетон, этилацетат – сложный эфир, бензол и толуол – арены (ароматические углеводороды), следовательно, свойства этих веществ отличаются друг от друга (табл. 1).

Таблица 1

Физические характеристики и значения показателей пожарной опасности

№ п/п	Название вещества	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Температурные пределы распространения пламени, °С	Минимальная энергия зажигания, мДж
1	Ацетон (C ₃ H ₆ O)	790,8	56,1	-18	535	-20...6	0,41
2	Этилацетат (C ₄ H ₈ O ₂)	881,0	77,1	2	446	-6...28	0,28
3	Бензол (C ₆ H ₆)	874,0	80,1	-11	560	-15...13	0,22
4	Толуол (C ₇ H ₈)	866,9	110,6	4	535	6...37	0,26

Выбор сорбента для эффективного хроматографического разделения смесей, состоящих из компонентов, разных по своим физическим свойствам, – сложная задача. Исходя из анализа свойств указанных химических соединений (см. табл. 1), необходимо было произвести выбор такого сорбента для насадочной колонки, который обеспечил бы эффективное разделение ацетона, этилацетата, бензола и толуола на одной колонке.

Этому требованию в определенной степени удовлетворяют инертные твердые носители – хроматон N-W, хроматон N-W-DMCS, инертон AW-DMCS, инертон SUPER, сорбционные свойства которых можно изменять в широких пределах путем модифицирования [5]. Для этой цели в качестве неподвижных жидких фаз исследованы полифениловый эфир 5ф-4э, апиэзон L, сквалан и OV-1 (полидиметилсилоксан).

Изучение возможности разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола проводилось на газовом хроматографе модели 3700 при следующих параметрах газохроматографического анализа: длина колонки – 3 м, температура термостата колонки – 140 °С, температура детектора – 190 °С, температура испарителя – 200 °С. В качестве газа-носителя использовали гелий.

Для приготовления модифицированного сорбента на хроматоне N-AW, хроматоне N-AW-DMCS и инертоне AW-DMCS отсеивали целевую фракцию размером 0,25...0,315 мм, сорбента на основе инертна SUPER – целевую фракцию размером 0,2...0,25 мм. Нанесение жидкой фазы на твердый носитель проводили методом испарения. Полифениловый эфир 5ф-4э из расчета 5 % масс. от массы хроматона N-AW растворяли в выпарительной чашке в объеме ацетона, достаточном для смачивания твердого носителя. Смесь перемешивали шпателем при комнатной температуре, затем помещали в термошкаф при температуре 60 °С на 1 ч для полного удаления ацетона. Аналогичным способом модифицировали остальные сорбенты. Приготовленный сухой сорбент загружали в колонку и после его установки в хроматограф дополнительно кондиционировали в потоке газа-носителя в течение 2 ч при температуре термостата 180 °С и в течение 2 ч при температуре 200 °С. Подготовленные колонки подвергали испытанию на газовом хроматографе, в результате чего получили значения времени удерживания компонентов исследуемой смеси (табл. 2).

Таблица 2

Время удерживания компонентов на различных колонках

Номер колонки	Сорбент	Время удерживания компонента t , мин			
		ацетон	этилацетат	бензол	толуол
1	Хроматон N-AW, модифицированный 15 % полифениловым эфиром 5ф-4э	0,667	0,817	1,133	1,767
2	Хроматон N-AW, модифицированный 5 % полифениловым эфиром 5ф-4э	0,783	0,883	1,283	1,883
3	Хроматон N-AW-DMCS, модифицированный 15 % апиезона L	0,683	0,733	0,967	1,483
4	Инертон AW-DMCS, модифицированный 10 % сквалана	0,267	0,300	0,367	0,433
5	Инертон SUPER, модифицированный 5 % OV-1	1,007	1,216	1,418	2,013

Качество разделения компонентов на различных колонках в зависимости от их времени удерживания показано на рис. 1.

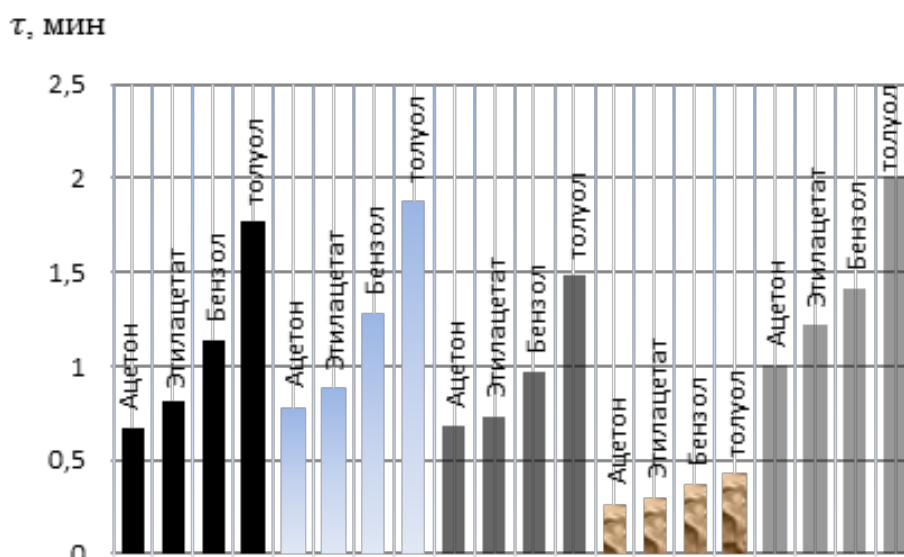


Рис. 1. Разделение компонентов на колонках (номер колонки см. в табл. 1)

Для определения эффективности газохроматографических колонок, исходя из времени удерживания, рассчитали количество теоретических тарелок n по формуле

$$n = 5,545(\tau_r/W_h)^2, \quad (1)$$

где τ_r – время удерживания компонента, мин;

W_h – ширина хроматографического пика, измеренная на половине его высоты и выраженная в единицах времени, мин.

Как видно из формулы (1), число теоретических тарелок, соответствующее данной колонке, не зависит от ее длины, поэтому является недостаточной характеристикой эффективности газохроматографического разделения.

Эффективность газохроматографической колонки наиболее точно определяется высотой, эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ), которую вычисляли по формуле

$$H = L/n, \quad (2)$$

где H – высота, эквивалентная теоретической тарелке, мм;

L – длина слоя сорбента в хроматографической колонке, мм.

Селективность колонки определяли по безразмерному критерию разделения K , значение которого рассчитывали по формуле

$$K = \frac{\Delta\tau_R}{W_{h(1)} + W_{h(2)}}, \quad (3)$$

где $\Delta\tau_R$ – разность времен удерживания разделяемых веществ 1 и 2, мин;
 $W_{h(1)}$ и $W_{h(2)}$ – ширина хроматографических пиков, измеренная на половине их высоты и выраженная в единицах времени, мин.

Результаты расчета параметров эффективности газохроматографического разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры эффективности газохроматографического разделения
 легковоспламеняющихся жидкостей

Номер колонки	Сорбент	Определяемый компонент	Число теоретических тарелок n	Высота, эквивалентная теоретической тарелке, H	Критерий разделения K
1	15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э на хроматоне N-AW	ацетон	1117	0,27	1,6
		этилацетат	1676	0,18	
		бензол	1977	0,15	
		толуол	1356	0,22	
2	5 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э на хроматоне N-AW	ацетон	531	0,56	0,6
		этилацетат	676	0,44	
		бензол	1206	0,25	
		толуол	1111	0,27	
3	15 % масс. апиезона L на хроматоне N-AW-DMCS	ацетон	259	1,16	0,3
		этилацетат	298	1,00	
		бензол	685	0,44	
		толуол	1220	0,25	
4	10 % масс. сквалана на инертоне AW-DMCS	ацетон	88	3,41	0,3
		этилацетат	312	0,96	
		бензол	266	1,13	
		толуол	289	1,04	
5	5 % масс. OV-1 на инертоне SUPER	ацетон	1417	0,21	1,7
		этилацетат	2066	0,15	
		бензол	2092	0,14	
		толуол	2598	0,12	

Разделение компонентов на инертных твердых носителях – хроматоне N-AW с 5 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э (колонка 2), хроматоне N-AW-DMCS (колонка 3) и инертоне AW-DMCS (колонка 4) – оказалось недостаточным для проведения анализа, так как критерий разделения компонентов меньше единицы. Наиболее эффективное разделение компонентов обеспечили колонка 1 с хроматоном N-AW и колонка 5 на основе инертна SUPER (рис. 2).

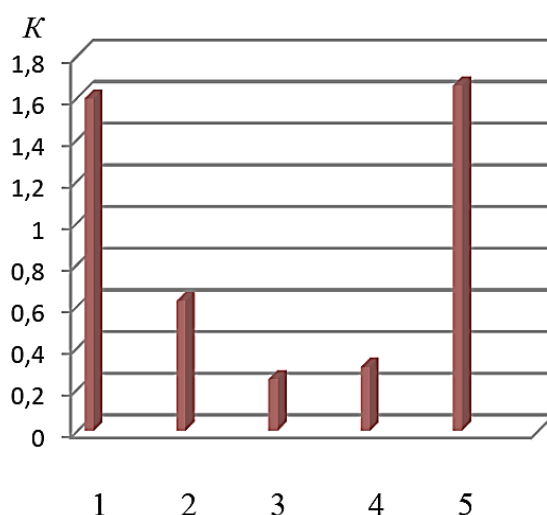


Рис. 2. Критерий разделения компонентов на колонках (номер колонки см. табл. 2)

На сорбенте с использованием хроматона N-AW и 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э получена хроматограмма разделения компонентов исследуемой смеси (рис. 3).

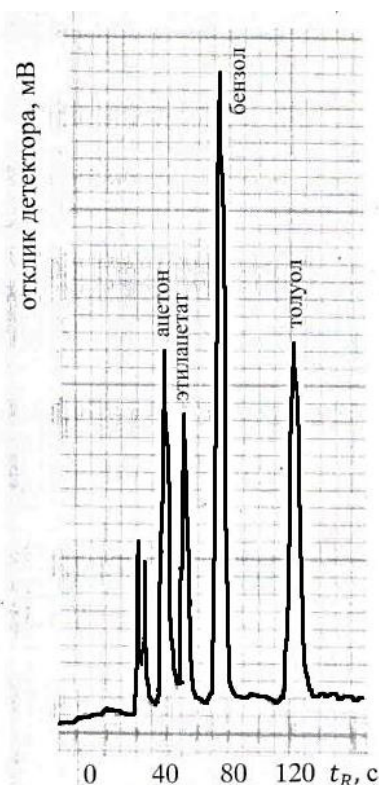


Рис. 3. Хроматограмма разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола на хроматоне N-AW и полифениловом эфире ПФЭ 5ф-4э

Так как пробы после пожара содержат следовые количества инициатора горения, был рассчитан порог обнаружения для ацетона, этилацетата, бензола, толуола при индивидуальном и совместном их присутствии в пробе (табл. 4).

Таблица 4

Порог обнаружения компонентов

Компонент	Порог обнаружения компонента, г/см ³	Относительная погрешность определения времени выхода хроматографического пика, %
Ацетон	$1,3 \cdot 10^{-10}$	1,6
Этилацетат	$9,7 \cdot 10^{-9}$	1,0
Бензол	$7,4 \cdot 10^{-10}$	1,2
Толуол	$1,7 \cdot 10^{-9}$	0,6

Выводы. Разработаны сорбенты на основе хроматона N-AW, модифицированного 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э, и инерттона SUPER, модифицированного 5 % масс. OV-1. Определены времена удерживания и записаны хроматограммы разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола. Полученные хроматографические характеристики могут быть использованы в качестве критериев идентификации инициаторов горения при проведении пожарно-технического исследования фрагментов, изъятых с места пожара.

Список литературы / References

1. 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. – 2017. – № 9. – С. 39 – 44.

Yatsenko L.A., Kopkin Ye.V., Bardulin Ye.N., Printseva M.Yu. *Izmenenie sostava letuchikh komponentov avtomobil'nykh benzinov pri isparenii i vygoranii v khode pozhara* [Changing of composition of volatile motor gasoline components during evaporation and burning out in the fire]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Life safety*, 2017, no. 9, pp. 39-44. (In Russian).

2. 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 analiticheskoi informatsii dlya ekspertno-kriminalisticheskogo issledovaniya nefteproduktov v pozharnotekhnicheskoi ekspertize* [System of preparation of analytical information for the expert and forensic investigation of oil products in fire and technical examination]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii – Bulletin of the Voronezh Institute of the State Firefighting Service of EMERCOM of Russia*, 2016, no. 4(21), pp. 95-97. (In Russian).

3. 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. *Sushhestvennyye aspekty gazozhidkostnoi i tonkosloinoi khromatografii* [Significant aspects of gas-liquid and thin-layer chromatography]. *Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti – Supervision and forensic inquiry in the security system*, 2018, no. 2, pp. 14-19. (In Russian).

4. Колесникова, Р.Д. Препаративная газовая хроматография легких углеводородов / Р.Д. Колесникова, Л.П. Егельская. – М.: Химия, 1970. – 192 с.

Kolesnikova R.D., Egel'skaya L.P. *Preparativnaya gazovaya khromatografiya lyogkikh uglevodorodov* [Preparative gas chromatography of light hydrocarbons]. Moscow, Khimiya Publ., 1970, 192 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 26.03.2021

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

Oleg Vladimirovich Khraponenko, scientific associate; e-mail: olghrap@mail.ru

*The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

DETECTION OF COMPONENTS OF HIGHLY FLAMMABLE LIQUIDS BY GAS CHROMATOGRAPHY METHOD

Purpose. Investigation of sorbents based on different inert solid carriers and liquid phases for detection of volatile components of the highly flammable liquids and their further identification by the gas chromatography method.

Methods. Investigations with application of the gas-liquid chromatography method.

Results. The comparative investigations of the sorbents for the gas-chromatographic separation of acetone, ethyl acetate, benzene and toluene, i.e. components of the highly flammable liquids, have been conducted. The following compositions have been investigated as the inert solid carriers: Chromatone N-AW modified by 5 and 15 mass percent of 5-ring Polyphenyl Ether 5P4E; Chromatone N-AW-DMCS modified by 15 mass percent of Apiezon L; Inerton AW-DMCS modified by 10 mass percent of Squalane; Inerton SUPER modified by 5 mass percent OV-1 (Polydimethylsiloxane). Based on the experimental data the main parameters of efficiency of the gas chromatography columns have been determined: the number of the theoretical plates, the length equivalent to a theoretical plate and the separation factor. It has been demonstrated that the best separation capacity belongs to the sorbents based on the Chromatone N-AW with 5 and 15 mass percent of 5-ring Polyphenyl Ether 5P4E and Inerton SUPER with 5 mass percent OV-1 (Polydimethylsiloxane). The detection response threshold has been calculated for acetone, ethyl acetate, benzene, toluene in case of their individual or joint presence in the samples.

Scientific novelty. The sorbents for the gas chromatographic detection of acetone, ethyl acetate, benzene and toluene in fragments taken from the place of fire have been developed.

Practical value. The periods of eluting for acetone, ethyl acetate, benzene and toluene have been determined using the developed sorbents that may be used as criteria of identification of the accelerants in conducting the fire and technical investigation of fragments taken from the place of fire. The chromatograms of separation of components using the sorbents made of Inerton SUPER with 5 mass percent OV-1 (Polydimethylsiloxane) and Chromatone N-AW with 15 mass percent of 5-ring Polyphenyl Ether 5P4E have been obtained.

Keywords: acetone; benzene; retention time; sorbent; toluene; chromatogram; ethyl acetate.

УДК 622.822.22:622.693.26

Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru;

Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Олег Петрович Пашковский, мл. науч. сотр.; e-mail: kingston-4@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-83*

ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ПОРОДНОГО ОТВАЛА

Цель. Определение пожаробезопасных параметров и технологии отсыпки слоя плоских породных отвалов угольных шахт в зависимости от физико-химических свойств отвальной массы.

Методы. Методы математического моделирования процессов самонагрева для определения критической температуры самовозгорания и толщины пожаробезопасного слоя при формировании плоского породного отвала с разработкой мероприятий, предотвращающих его самовозгорание.

Результаты. Установлены параметры формируемого слоя плоского породного отвала угольной шахты. Приведена технология формирования слоя и яруса породного отвала. Разработаны требования к предотвращению самовозгорания породного отвала при его эксплуатации.

Научная новизна. Установлена зависимость толщины пожаробезопасного слоя отвальной массы от начальных и граничных условий повышения температуры в породе. Определено значение критической температуры самовозгорания с учетом испарения влаги из частиц угля и физико-химических свойств отвальной массы для конкретных условий с использованием уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах.

Практическая значимость. Определены пожаробезопасные параметры формирования конкретного породного отвала в зависимости от физико-химических свойств отвальной массы для сведения к минимуму выбросов вредных веществ в атмосферу породными отвалами угольных предприятий.

Ключевые слова: *породный отвал; параметры формирования; отвальная масса; складирование породы; изоляционный слой.*

Постановка проблемы. В результате производственной деятельности угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий Донецкого угольного бассейна происходит формирование породных отвалов, представляющих собой техногенные объекты, которые обуславливают опасность возникновения техногенных катастроф. К негативным последствиям породных отвалов относят ухудшение состояния атмосферы, сокращение площади сельскохозяйственных земель, загрязнение почвенного покрова, развитие эрозионных процессов, изменение гидрологического и гидрогеологического режима района и др. [1, 2].

Самовозгорание породной массы отвалов – сложный физико-химический процесс, зависящий от размера, формы и условий теплообмена на границе газ – твердое вещество (отвальная масса), а также от дисперсности, пористости и влажности этого вещества в твердой фазе. С увеличением дисперсности и пористости породной массы отвалов резко возрастает общая поверхность частиц и, соответственно, увеличивается количество молекул, реагирующих с кислородом в слое дисперсного вещества. При этом возрастает количество

выделяемой теплоты в единице объема, что способствует возникновению самовозгорания при более низких температурах окружающей среды. Кроме того, важную роль в процессе самонагревания и самовозгорания веществ органического и неорганического происхождения играет влага, которая содержится в самом веществе и окружающей атмосфере. В общем случае влияние влаги на критические условия самовозгорания зависит от температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха и условий массопереноса паров влаги в окружающем пространстве. Так как в породной массе отвалов содержатся горючие вещества в виде угля, сростков породы с углем, углистых сланцев, аргиллитов, соединений серы (в основном в виде пирита), древесины, вышеуказанные факторы способствуют протеканию химических реакций низкотемпературного окисления, что приводит к самонагреванию и, как следствие, к самовозгоранию породных отвалов.

Анализ последних исследований. Горение породных отвалов отрицательно сказывается на экологии близлежащих городов и поселков. Несмотря на наличие методик расчетов концентраций вредных веществ в воздухе, определения поля температур тепловизионной техникой, а также достаточное количество работ по изучению условий самонагревания и самовозгорания горных пород [3, 4], требуется глубокое изучение тепло-, массообменных процессов в очагах горения породных отвалов для обоснования пожаробезопасных параметров их формирования.

В работах [4, 5] описана математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы, которая позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского породного отвала. Получена аналитическая зависимость температуры от массы содержащегося в породном отвале сгораемого твёрдого вещества при термодеструкции и фиксированном времени полураспада. Из анализа полученной зависимости следует, что при температуре до 200 °С термодеструкция практически отсутствует, а при температуре 600 °С и более всё твёрдое вещество разлагается и постепенно переходит в газообразное состояние.

При этом не учитывали условия повышения температуры и физико-химические свойства отвальной массы. Таким образом, потребовалось определить граничные условия процесса самонагревания в теле породного отвала.

Цель работы – определить пожаробезопасные параметры и технологию отсыпки слоя породы плоских породных отвалов угольных шахт в зависимости от физико-химических свойств отвальной массы.

Результаты исследований. Для описания процессов самонагревания в породном отвале с учётом начальных и граничных условий повышения температуры, испарения влаги из частиц угля и физико-химических свойств отвальной массы используем уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах [5]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{q_1 k_1 Z}{\rho_y c_y} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) - \frac{q_2 k_2 U}{\rho_y c_y} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (1)$$

где T – температура внутри породного отвала, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

τ – время с момента начала процесса, с;

r – радиус с центром на оси цилиндра, м;

y – координата по высоте породного отвала, отсчитываемая от основания, м;

a – коэффициент температуропроводности угля, м²/с;

q_1 – теплота реакции окисления пирита и угля, Дж/моль;

q_2 – теплота испарения влаги, Дж/моль;

ρ_y – плотность пирита и угля, кг/м³;

c_y – удельная теплоёмкость пирита и угля, Дж/(кг·К);

U – концентрация влаги в угле, моль/м³;

k_1 – константа скорости химической реакции при начальной температуре T_0 , с⁻¹;

k_2 – константа скорости испарения влаги при начальной температуре T_0 , с⁻¹;

E_1 – энергия активации при химической реакции, Дж/моль;

E_2 – энергия активации при испарении влаги, Дж/моль;

R – газовая постоянная, Дж/(К·моль);

Z – концентрация кислорода в отвале, моль/м³.

Упростим вид уравнения (1), введя в рассмотрение безразмерную температуру $\bar{T} = T/T_0$, и получим

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}), \quad (2)$$

где A_1 – относительная теплота реакции окисления пирита и угля, с⁻¹;

$$A_1 = \frac{q_1 k_1 Z_0}{\rho_y c_y T_0}, \quad (3)$$

Z_0 – начальная концентрация кислорода, моль/м³;

\bar{Z} – концентрация кислорода, %;

$$\bar{Z} = \frac{Z}{Z_0}, \quad (4)$$

\bar{E}_1 – энергия активации при химической реакции, Дж/моль;

$$\bar{E}_1 = \frac{E_1}{RT_0}, \quad (5)$$

A_2 – относительная теплота испарения влаги с поверхности частиц угля, с⁻¹;

$$A_2 = \frac{q_2 k_2 U_0}{\rho_y c_y T_0}, \quad (6)$$

U_0 – начальное содержание влаги, моль/м³;

\bar{U} – содержание влаги, г/м³;

$$\bar{U} = \frac{U}{U_0}, \quad (7)$$

\bar{E}_2 – энергия активации при испарении влаги, Дж/моль;

$$\bar{E}_2 = \frac{E_2}{RT_0}. \quad (8)$$

Рассмотрим установившийся процесс горения на породном отвале [5]. Уравнение (2) при условии теплообмена по высоте породного отвала, с учетом радиуса площади поверхности отвала, примет вид

$$a \left(\frac{d^2 \bar{T}}{dy^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp \left(\frac{-\bar{E}_1}{\bar{T}} \right) - A_2 \bar{U} \exp \left(\frac{-\bar{E}_2}{\bar{T}} \right) = 0. \quad (9)$$

Решив уравнение (9) относительно производной по высоте породного отвала и принимая, что при горении температура в породном отвале достигает нескольких сотен градусов, а экспоненты по влажности и кислороду близки к единице, получим

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = -\frac{1}{a} (A_1 - A_2). \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (10) по y , с учетом начальных и граничных условий повышения температуры, условий теплообмена, и принимая, что при интенсивном теплообмене с внешней средой ($a \rightarrow \infty$), получим

$$T(y) = \frac{1}{2a} (A_1 - A_2) y(h - y) + T_0. \quad (11)$$

В этом случае максимальная температура будет равна

$$T_m = \frac{1}{8a} (A_1 - A_2) h^2 + T_0. \quad (12)$$

Это позволяет, задав максимальное (критическое) значение температуры самовозгорания отвальной массы, определять толщину пожаробезопасного слоя отсыпаемой отвальной массы h , м, по формуле

$$h = \sqrt{\frac{8a(T_m - T_0)}{A_1 - A_2}}. \quad (13)$$

Формирование плоских породных отвалов осуществляется одним из двух способов: фронтальным (отдельными заходками) или периферийным.

Наиболее прогрессивным считается периферийный способ формирования новых породных отвалов, так как развитие отвала производится от его границ к центру. При периферийном способе формирования отвалов изоляцию и

озеленение поверхности откосов выполняют с начала сооружения отвала, соблюдая технологию формирования породного отвала и проводя мероприятия, предотвращающие самовозгорание отвальной массы.

По границе породного отвала производят отсыпку отвальной массы в сооружаемую насыпь высотой не более толщины пожаробезопасного слоя h . Ширина насыпи должна обеспечивать возможность производить на ней маневры применяемой автомобильной техники, ее разворот и ссыпание породы под откос в первый пожаробезопасный слой. С целью дополнительного уплотнения отвальной массы отсыпaeмый пожаробезопасный слой (в зависимости от его высоты) рекомендуется формировать в несколько этапов. В этом случае отсыпку насыпи отвальной массы производят равными частями до достижения высоты пожаробезопасного слоя (см. схему).

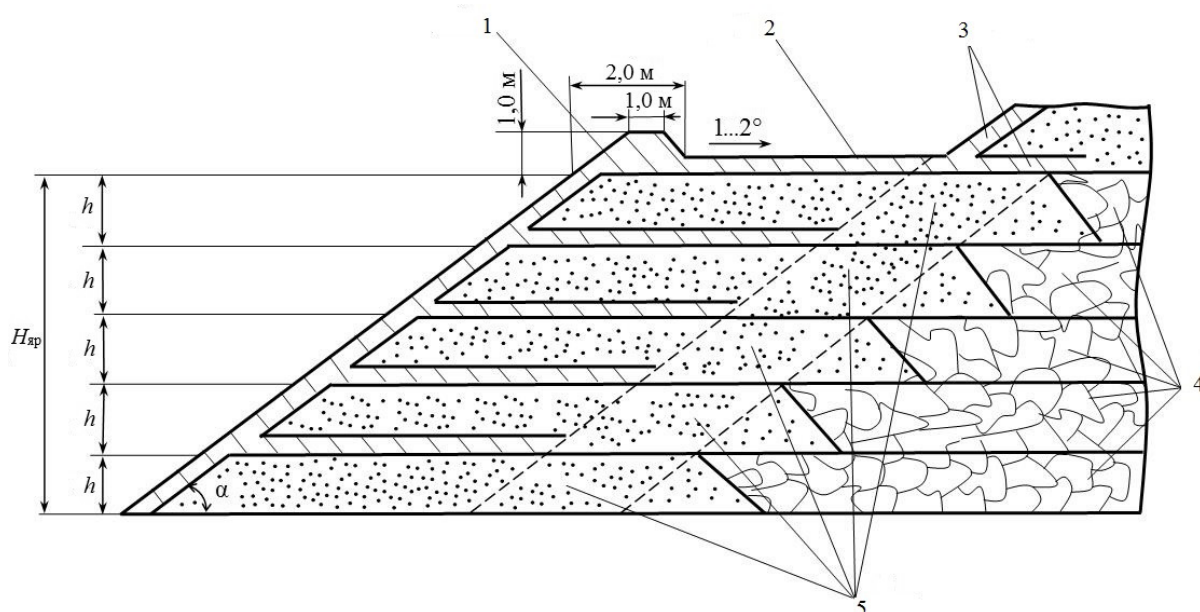


Схема формирования яруса плоского породного отвала с пожаробезопасными слоями отвальной массы:

- 1 – ограждающая призма; 2 – берма; 3 – изолирующее покрытие (инертный материал);
4 – пожаробезопасные слои отвальной массы; 5 – уплотненные слои отвальной массы;

$H_{яp}$ – высота яруса породного отвала, м; h – толщина пожаробезопасного слоя отсыпаемой отвальной массы, м

Отсыпанную отвальную массу планируют на высоту принятого пожаробезопасного слоя, после чего уплотняют прицепным катком массой 5...25 т. По одному следу каток совершает 4...8 проходов. Каждый последующий проход катка должен перекрывать след предыдущего на 0,1...0,2 м. Глубина уплотнения отвальной массы – не менее 0,25...0,4 м. Таким образом формируют уплотненный откос первого воздухонепроницаемого пожаробезопасного слоя.

Доставляют инертный материал (глину, суглинок, перегоревшую породу и др.) на поверхность откоса и воздухонепроницаемой полосы первого пожаробезопасного слоя яруса отвала. Планируют изоляционный материал до достижения рекомендуемой толщины слоя не менее 0,3 м на поверхности и 0,4 м на откосе отвала после уплотнения катками. Таким способом создают

изолирующее покрытие, предотвращающее поступление воздуха внутрь пожаробезопасного слоя. Изолировать поверхность откосов необходимо после окончания формирования первого пожаробезопасного слоя и не позднее критического времени самонагрева отвальной массы. Одновременно ведут работы по отсыпке отвальной массы до полного завершения формирования первого пожаробезопасного слоя.

Работы по отсыпке породы во второй и последующие пожаробезопасные слои начинают с аналогичной подачи отвальной массы на поверхность первого пожаробезопасного слоя. Ширина формируемой насыпи также должна позволять автотранспорту выполнять маневры по развороту и ссыпанию отвальной массы под откос во второй пожаробезопасный слой.

Одновременно с формированием второго и последующих пожаробезопасных слоев доставляют изолирующий материал на поверхность первого слоя откоса и воздухонепроницаемой полосы пожаробезопасных слоев.

В итоге ярус породного отвала состоит из нескольких пожаробезопасных слоёв отвальной массы общей высотой $H_{\text{яп}}$. Далее по краю откоса формируют ярус ограждающей призмы с размерами: по высоте – не менее 1,0 м, по ширине основания – не менее 2,0 м и по ширине верха – не менее 1,0 м.

Затем, отступая от края откоса на расстояние, равное $(0,4-0,8)H_{\text{яп}}$, начинают отсыпку отвальной массы в первый пожаробезопасный слой второго яруса. Работы ведут аналогично созданию первого яруса. Берму сформированного яруса рекомендуется спланировать с уклоном $1...2^\circ$ по отношению к вышележащему ярусу отвала, изолировать инертным материалом и уплотнить. Ширина бермы должна позволять перемещаться автотранспорту для выполнения работ по формированию породного отвала.

После окончания формирования последнего (верхнего) яруса на поверхность его откоса и бермы завозят суглинок или плодородный слой земли.

По окончании отсыпки отвальной массы верхнего яруса породного отвала его плато выравнивают по горизонтали либо с уклоном $1...2^\circ$ к центру. Затем по контуру плато формируют ограждающую призму высотой 1,0 м и шириной по основанию не менее 2,0 м. Выполняют работы по озеленению откосов последнего (верхнего) яруса и поверхности плато породного отвала.

На действующих плоских породных отвалах озеленение должно осуществляться с отставанием не более чем на один ярус. После оформления каждого из ярусов весной на поверхности их откосов следует высевать многолетние травы, а на поверхностях бермы – высаживать саженцы деревьев.

По окончании работ по формированию и озеленению породного отвала въездную дорогу на него перекрывают для предотвращения складирования на его поверхности коммунальных, строительных и других видов отходов. По периметру основания отвала устанавливают знаки, запрещающие его самовольную разборку и складирование отходов.

Для защиты прилегающей к породному отвалу территории от ливневых потоков, стекающих с откосов, у его основания оборудуют водоотводную канаву для стока атмосферных осадков.

Выводы. Предупреждение самовозгорания отвальной массы достигают за счет снижения воздухопроницаемости породных отвалов вследствие ее послойного складирования, уплотнения, покрытия откосов и горизонтальной поверхности изолирующими материалами. Формирование новых плоских породных отвалов целесообразно вести периферийным способом с соблюдением пожаробезопасных параметров, включающих определение толщины пожаробезопасного слоя, высоты яруса, толщины изолирующего покрытия, ширины изолирующего покрытия на горизонтальной поверхности пожаробезопасного слоя, ширины зоны интенсивного самонагревания отвальной массы, ширины уплотнения отвальной массы, времени изоляции боковых откосов.

Установление пожаробезопасных параметров формирования конкретного породного отвала в зависимости от физико-химических свойств отвальной массы, а также соблюдение требований технологии его формирования позволит свести к минимуму выбросы вредных веществ в атмосферу породными отвалами угольных предприятий.

Список литературы / References

1. Корчагина, Т.В. Совершенствование методики оценки воздействия подземной добычи коксующихся углей на окружающую среду: дис. ... канд. техн. наук / Т.В. Корчагина. – Тула, 2008. – 154 с.

Korchagina T.V. *Sovershenstvovanie metodiki otsenki vozdeistviya podzemnoi dobychi koksuyushhikh uglei na okruzhayushhuyu sredu: dis. ... kand. tekhn. nauk / T.V. Korchagina* [Improvement of the evaluation methodology of how deep winning of coke coal affects the environment: diss. ... Cand. Sci. (Tech.) / T.V. Korchagina]. Tula, 2008, 154 p. (In Russian).

2. Васильева, И.В. Актуальные вопросы мониторинга породных отвалов угольных шахт и охраны окружающей среды / И.В. Васильева // Минеральные ресурсы Украины. – 2015. – № 3. – С. 39 – 45.

Vasil'eva I.V. *Aktual'nye voprosy monitoringa porodnykh otvalov ugol'nykh shakht i okhrany okruzhayushhei sredy* [Actual problems of monitoring of overburden dumps of coal mines and environmental protection]. *Mineral'nye resursy Ukrainy – Mineral resources of Ukraine*, 2015, no. 3, pp. 39-45. (In Russian).

3. Панов, Б.С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б.С. Панов, Ю.А. Проскурня // Геология угольных месторождений: межвуз. науч. тематич. сб. – Екатеринбург, 2002. – С. 274 – 281.

Panov B.S., Proskurnya Yu.A. *Model' samovozgoraniya porodnykh otvalov ugol'nykh shakht Donbassa* [Model of spontaneous combustion of overburden dumps of coal mines of Donbass]. *Geologiya ugol'nykh mestorozhdenii: mezhvuz. nauch.-tematich. sb.* [Geology of coal deposits: interuniversity scientific and topical collected articles]. Yekaterinburg, 2002, pp. 274-281. (In Russian).

4. Зинченко, И.Н. Связь между температурой породного отвала и количеством выделяемых вредных веществ / И.Н. Зинченко, О.П. Пашковский,

В.В. Волынец // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 4(56). – С. 89 – 94.

Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P., Volynets V.V. *Svyaz' mezhduraznitsy temperatury porodnogo otvala i kolichestvom vydelyaemykh vrednykh veshchestv* [Relation between the overburden dump temperature and the amount of emitted noxious substances]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific and technical journal]. Donetsk, 2019, no. 4(56), pp. 89-94. (In Russian).

5. Зинченко, И.Н. Установившийся процесс горения на породном отвале / И.Н. Зинченко, О.П. Пашковский, В.В. Волынец // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 2(57). – С. 90 – 95.

Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P., Volynets V.V. *Ustanovivshisya protsess goreniya na porodnom otvale* [Steady-state combustion process at a waste rock pile]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific and technical journal]. Donetsk, 2020, no. 2(57), pp. 90-95. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 15.03.2021

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru;

Dmitry Ivanovich Momot, scientific associate; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Oleg Petrovich Pashkovskiy, junior scientific associate; e-mail: kingston-4@mail.ru

The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-83

FIRE-SAFE PARAMETERS FOR FORMATION OF A FLAT OVERBURDEN DUMP

Purpose. Determination of the fire-safe parameters and technology of dumping a layer of flat mine overburden dumps in dependence to the physicochemical properties of the overburden mass.

Methods. Methods of mathematical modeling of the spontaneous heating processes for determination of the critical temperature of spontaneous combustion and the fire-safe layer thickness during formation of the flat overburden dump with elaboration of measures for prevention of its spontaneous combustion.

Results. The parameters of the layer under formation of the flat overburden dump of a coal mine have been established. The technology of formation of the overburden dump layer and sub-panel has been presented. The requirements for prevention of the spontaneous combustion of the overburden dump during its maintenance have been developed.

Scientific novelty. The dependence of the thickness of the overburden mass fire-safe layer on the initial and end conditions of the temperature elevation in rock has been established. The critical temperature value of the spontaneous combustion has been determined taking into account the moisture evaporation from coal particles and the physicochemical properties of the overburden mass for the specific conditions applying the heat conduction equation in cylindrical coordinates.

Practical value. The fire-safe parameters of the specific overburden dump formation have been determined in dependence to the physicochemical properties of the overburden mass in order to minimize the emissions of noxious substances in the environment by the overburden dumps of coal enterprises.

Keywords: *overburden dump; formation parameters; overburden mass; rock mass storing; insulation layer.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [544.723.21:547.532]:001.891.5

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55*

РАЗРАБОТКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОРБЕНТОВ СИМПЛЕКС-РЕШЕТЧАТЫМ МЕТОДОМ

Цель. Исследование сорбционных свойств многокомпонентных составов на основе каменного угля, котельного шлака и древесных опилок для применения их при ликвидации последствий аварийных проливов химически опасных веществ в качестве сорбентов.

Методы. Определение сорбционной емкости материалов весовым методом в статических условиях эксперимента. Симплекс-решетчатый метод математического планирования эксперимента для оптимизации состава сорбентов, статистический метод анализа и обработки экспериментальных данных, графический метод построения треугольной диаграммы «состав-свойство».

Результаты. Определена сорбционная емкость по бензолу котельного шлака, длиннопламенного газового угля и древесных опилок, их двух- и трехкомпонентных смесей в статических условиях эксперимента. Для описания аналитической зависимости «состав-свойство» многокомпонентных сорбентов выбрана модель полинома неполного третьего порядка. На основании экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты приведенного полинома и получена модель аналитического описания зависимости «состав-свойство». С помощью критерия Стьюдента проверена и подтверждена адекватность полученной полиномиальной модели. Построена треугольная диаграмма «состав-свойство» для исследуемых сорбционных составов по 69 координатам точек, соответствующим расчетным значениям сорбционной емкости.

Научная новизна. Впервые исследована сорбционная емкость по бензолу многокомпонентных сорбентов на основе длиннопламенного газового угля и промышленных отходов: котельного шлака, древесных опилок. Получена и апробирована полиномиальная модель зависимости «состав-свойство» для расчета оптимального компонентного состава сорбента и построения треугольной диаграммы «состав-свойство».

Практическая значимость. Показана возможность выбора оптимального состава природного сорбента с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента. Построенная треугольная диаграмма «состав-свойство» позволяет оперативно провести поиск областей с оптимальными составами сорбентов с учетом стоимости исходных материалов и возможностей сырьевой базы региона. При этом сохраняется возможность графической интерпретации результатов без проведения длительных и затратных экспериментов и последующей обработки данных.

Ключевые слова: матрица планирования; метод симплекс-решетчатого планирования; многокомпонентный сорбент; полином; сорбционная емкость; треугольная диаграмма «состав-свойство».

Постановка проблемы. Наметившаяся за последние годы тенденция использования в технологических процессах все большего количества химически опасных веществ потенциально увеличивает возможность их аварийных проливов в окружающую среду. Результативность мероприятий

по ликвидации аварийных проливов токсичных веществ во многом определяется применением эффективных сорбентов, обеспечивающих локализацию зоны пролива и поглощение опасных веществ. Главный критерий поглощающей способности материалов – сорбционная емкость. Применение дорогостоящих синтетических полимерных сорбентов и активированных углей, обладающих высокой поглощающей способностью, нерентабельно для локализации масштабных проливов токсичных веществ. Поэтому разработка природных сорбентов на основе доступного сырья, обладающих достаточной сорбционной емкостью и составляющих альтернативу дорогим активированным углям и полимерным сорбентам, – своевременная и актуальная проблема.

Один из способов разработки сорбентов заключается в составлении многокомпонентных сорбционных смесей из доступных материалов. Оптимальный состав сорбента более точно можно установить путем использования методов прикладной математики, в том числе методов планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Анализ последних исследований. Анализ применения математических методов описания зависимостей «состав-свойство» многокомпонентных систем приведен в публикациях [1 – 3]. Для описания свойств многокомпонентных систем широко применяют метод симплексных решеток и полиномы различного порядка, разработанные Г. Шеффе [1]. Критический анализ результатов научных исследований показал, что оптимизации рецептур сорбционных составов на основе каменных углей и промышленных отходов отводится незначительное внимание исследователей. Поэтому изучение влияния компонентного состава на свойства сорбента и выбор оптимальных сорбционных составов с использованием метода математического планирования эксперимента – актуальная научная проблема.

Цель и задачи исследований – изучить сорбционные свойства двух- и трехкомпонентных составов на основе каменного угля, котельного шлака и древесных опилок в качестве сырья для получения природных сорбентов.

В задачи исследования входят:

- выбор полиномиальной модели и составление матрицы плана эксперимента;
- приготовление модельных смесей и проведение экспериментов;
- расчет коэффициентов полинома для получения полиномиальной модели эксперимента;
- проверка и оценка адекватности полученной полиномиальной модели;
- построение треугольной диаграммы «состав-свойство».

Изложение основного материала. Последовательность решения поставленных задач исследований следующая.

1. Выбор полиномиальной модели и составление матрицы плана эксперимента.

Выбор полиномиальной модели был основан на критическом анализе применения математических методов описания зависимостей «состав-

свойство» многокомпонентных систем [4, 5] и сводится к установлению числа варьируемых компонентов смеси, заданию степени приведенного полинома, описывающего функцию отклика – выходного фактора. Чем выше степень приведенного полинома, тем выше точность описания модели и больше экспериментов требуется для определения коэффициентов полинома и построения диаграммы «состав-свойство».

Для построения аналитической зависимости «состав-свойство» модели представляют в виде полиномов n степеней, область применения которых ограничена ближайшей окрестностью рабочих точек, в которых проводят эксперименты. В общем случае для q компонентов модели приведенных полиномов выглядят следующим образом [5]:

- модель приведенного полинома второго порядка

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j; \quad (1)$$

- модель приведенного полинома неполного третьего порядка

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq p} \beta_{ijk} x_i x_j x_k; \quad (2)$$

- модель приведенного полинома третьего порядка

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \gamma_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \\ & + \sum_{1 \leq i < j < k \leq p} \beta_{ijk} x_i x_j x_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ijk}$ – коэффициенты приведенного полинома;

\hat{y} – расчетное значение выходного фактора.

Для проведения экспериментов и построения полиномиальной модели аналитической зависимости «состав-свойство» многокомпонентных природных сорбентов использовали модель приведенного полинома неполного третьего порядка (2). С помощью модели (2) можно достаточно точно описать функцию зависимости между наблюдаемыми входными и выходными факторами, а в случае ее неадекватности перейти к модели полинома более высокого порядка (3).

После выбора модели полинома определяли составы, экспериментальное исследование которых позволило бы рассчитать коэффициенты модели, затем составляли матрицу симплекс-решетчатого плана эксперимента. Для этого выбирали тип плана (матрицы), который адекватно отражает эмпирическую зависимость между наблюдаемыми входными и выходными факторами [5]. В качестве входных факторов приняты компонентные составы сорбентов с различным массовым содержанием и соотношением компонентов: чистые вещества, а также их двух- и трехкомпонентные смесевые системы (x_1, x_2, x_3).

В качестве выходного фактора взято свойство составов – среднее арифметическое значение сорбционной емкости трех параллельных опытов

каждого i -го опыта \bar{y}_i , г/г. В теории планирования эксперимента выходной фактор, или функция отклика, зависит от влияющих факторов, или входных факторов, – содержания компонентов смеси: x_1, x_2, x_3 (рис. 1).

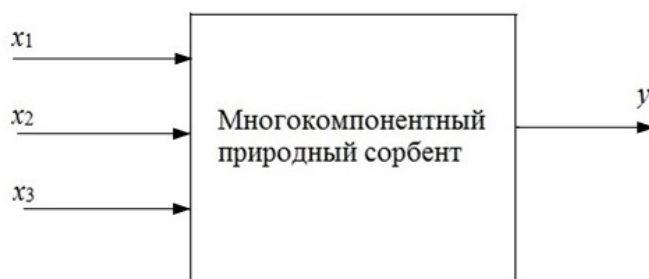


Рис. 1. Схема влияния входных факторов на выходной фактор

Содержание исходных компонентов в смеси выражали массовыми долями, так как это удобно в плане дозирования компонентов и соответствует реальной технологии приготовления природных сорбентов [1].

Для описания аналитической зависимости «состав-свойство» использована симплексная решетка неполного третьего порядка типа $\{q, n\}$,

где $q = 3$ – число компонентов смеси;

$n = 3$ – степень полинома.

Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Входной фактор			Выходной фактор – сорбционная емкость			
	Компонентный состав сорбента, массовая доля			Значение сорбционной емкости для каждого параллельного опыта y_{ij} , г/г			Среднее арифметическое значение сорбционной емкости параллельных опытов i -го опыта \bar{y}_i , г/г
				x_1	x_2	x_3	
1	1	0	0	1,06	1,10	1,09	1,08
2	0	1	0	0,71	0,74	0,72	0,72
3	0	0	1	6,70	6,48	6,67	6,62
4	1/2	1/2	0	0,97	0,98	0,90	0,95
5	1/2	0	1/2	3,37	3,68	3,98	3,68
6	0	1/2	1/2	3,61	3,24	3,09	3,31
7	1/3	1/3	1/3	2,99	2,88	2,87	2,91

2. Приготовление модельных смесей и проведение эксперимента.

Модельные смеси готовили на основе образцов каменного угля марки ДГ (длиннопламенный газовый), котельного шлака фракции 0,315...0,5 мм

и древесных опилок фракции 1...2 мм – материалов с наибольшими значениями сорбционной емкости по бензолу в статических и динамических условиях эксперимента [6 – 8]. Перед исследованиями образцы материалов измельчали и просеивали через лабораторные сита для получения целевых фракций. Модельные смеси готовили таким образом, чтобы выполнялось условие

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \quad (4)$$

где x_1 – содержание шлака в смеси, массовая доля;

x_2 – содержание угля в смеси, массовая доля;

x_3 – содержание опилок в смеси, массовая доля.

Исследования проводили по бензолу, пары которого используют в качестве стандартного вещества при изучении свойств углеродных сорбентов.

Сорбционную емкость по бензолу исходных материалов и приготовленных на их основе модельных смесей определяли ускоренным весовым методом, суть которого заключается в прямом измерении увеличения массы пробы сорбента в процессе насыщения бензолом в течение 15 мин.

3. Расчет коэффициентов полинома для получения полиномиальной модели эксперимента.

Используя экспериментальные значения выходного фактора (см. табл.), методом подстановки рассчитаны коэффициенты уравнения полинома неполного третьего порядка

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5)$$

по следующим формулам [5]:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= y_1 = 1,08; \\ \beta_2 &= y_2 = 0,72; \\ \beta_3 &= y_3 = 6,62; \\ \beta_{12} &= 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 = 0,2; \\ \beta_{13} &= 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = -0,68; \\ \beta_{23} &= 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = -1,44; \\ \beta_{123} &= 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3) = 8,55. \end{aligned}$$

Математическую обработку данных и расчет коэффициентов полиномиальной модели (5) производили с помощью табличного процессора Microsoft Excel. После подстановки вычисленных коэффициентов в уравнение (5) получена полиномиальная модель зависимости сорбционной емкости от состава смеси: шлак (x_1) – уголь (x_2) – опилки (x_3), описываемая уравнением полинома неполного третьего порядка

$$\hat{y} = 1,08x_1 + 0,72x_2 + 6,62x_3 + 0,2x_1x_2 - 0,68x_1x_3 - 1,44x_2x_3 + 8,55x_1x_2x_3. \quad (6)$$

4. Проверка и оценка адекватности полученной полиномиальной модели.

Проверку адекватности полиномиальной модели (6) проводили на четырех дополнительных контрольных составах с соотношением исходных компонентов, отличающимся от их соотношения для смесей, представленных в таблице. Исходя из уравнения (6), для каждого дополнительного контрольного состава рассчитаны значения сорбционной емкости по бензолу.

Оценку адекватности полиномиальной модели (6) выполняли с помощью критерия Стьюдента t_p , используя формулу

$$t_p = \frac{\Delta y \sqrt{m}}{S_0 \sqrt{1 + \xi}}, \quad (7)$$

где t_p – расчетное значение критерия Стьюдента;

$\Delta y = (y_s - y_p)$ – разность экспериментального и рассчитанного по уравнению (6) значения сорбционной емкости сорбента, г/г;

m – число параллельных опытов в каждой точке эксперимента;

S_0 – дисперсия воспроизводимости эксперимента;

ξ – параметр, связанный с коэффициентами полинома, значение которого для каждого контрольного состава графически снято с контурных линий треугольника изолиний полинома неполного третьего порядка [5].

Дисперсию воспроизводимости эксперимента S_0 для семи сорбционных составов (см. табл.) рассчитывали по формуле

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{0i}^2, \quad (8)$$

где S_0^2 – построчная дисперсия;

N – число экспериментов.

При уровне значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 10$ табличное значение критерия Стьюдента ($t_{\text{табл.}}$) равно 2,23. Для всех контрольных составов соблюдается неравенство $t_p \leq t_{\text{табл.}}$

Таким образом, полученная полиномиальная модель (6) оказалась адекватной эксперименту для описания аналитической зависимости сорбционной емкости от компонентного состава сорбентов.

5. Построение треугольной диаграммы «состав-свойство».

Представление зависимости «состав-свойство» многокомпонентных смесей в виде диаграммы наиболее наглядно. При изучении сорбционных свойств трехкомпонентных смесей факторное пространство представляет собой правильный симплекс в виде равностороннего треугольника.

Используя полученную полиномиальную модель (6), по 69 координатам точек, соответствующим расчетным значениям сорбционной емкости, построена диаграмма «состав-свойство» в виде треугольника (рис. 2).

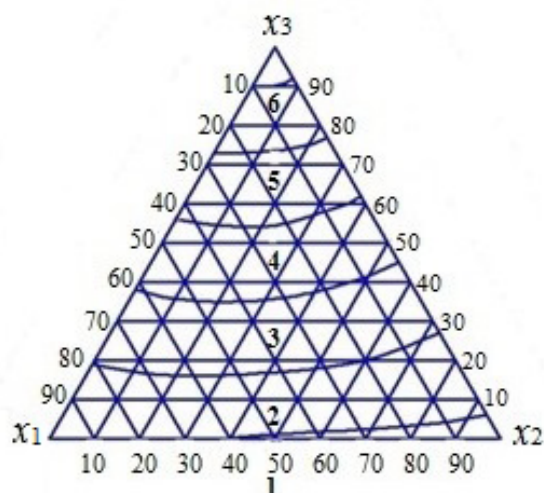


Рис. 2. Треугольная диаграмма «состав-свойство» и проекции линий равного уровня для сорбционной емкости исследуемых сорбционных составов

Контурные изолинии на диаграмме 1...6 (рис. 2) соответствуют компонентным составам сорбентов, характеризующихся одинаковой сорбционной емкостью. Из диаграммы видно, что росту сорбционной емкости составов способствует увеличение содержания опилок. Максимальная сорбционная емкость (6,62 г/г) получена для состава, содержащего 100 % опилок.

Выводы. Экспериментально исследована сорбционная емкость по бензолу двух- и трехкомпонентных сорбентов с различным массовым соотношением каменного угля марки ДГ, котельного шлака и древесных опилок с использованием экспериментального и симплекс-решетчатого методов планирования эксперимента. Разработана и апробирована полиномиальная модель неполного третьего порядка для расчета и установления оптимального компонентного состава сорбентов для ликвидации последствий масштабных аварийных проливов химически опасных веществ на промышленных объектах и транспорте. Построена треугольная диаграмма «состав-свойство», с помощью которой можно прогнозировать области сорбента с оптимальными значениями сорбционной емкости. При этом сохраняется возможность графической интерпретации результатов без проведения многочисленных экспериментов и последующей обработки данных.

Список литературы / References

1. Ахмадиев, Ф.Г. Математическое моделирование и оптимизация «состав-свойство» многокомпонентных смесей / Ф.Г. Ахмадиев, Р.М. Гильфанов // Известия КГАСУ. – 2012. – № 2(20). – С. 289 – 297.

Akhmadiev F.G., Gil'fanov R.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya "sostav-svoistvo" mnogokomponentnykh smesei* [Mathematical modeling and

optimization of the “composition-property” of multicomponent mixtures]. *Izvestiya KGASU – News of the KSUAE*, 2012, no. 2(20), pp. 289-297. (In Russian).

2. Джусупкалиева, Р.И. Исследования сорбентов, используемых для очистки нефтезагрязненных территорий / Р.И. Джусупкалиева, А.У. Таубаева // Технические науки в России и за рубежом: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2017 г.). – М.: Буки-Веди, 2017. – С. 182 – 184. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/286/12431> (дата обращения: 25.01.2021).

Dzhusupkalieva R.I., Taubaeva A.U. *Issledovaniya sorbentov, ispol'zuyemykh dlya ochistki neftezagryaznyonnykh territorii* [Investigations of sorbents used for cleaning the oil-contaminated territories]. *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. (Moskva, noyabr' 2017 g.)* [Technical sciences in Russia and abroad: materials of the 7th International scientific conference (Moscow, November 2017)]. Moscow, Buki-Vedi Publ., 2017, pp. 182-184. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/286/12431> (accessed 25.01.2021). (In Russian).

3. Прилепская, Л.Л. Оптимизация состава угольных шихт с использованием методов прикладной математики / Л.Л. Прилепская, В.С. Швед // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-sostava-ugolnyh-shiht-s-ispolzovaniem-metodov-prikladnoy-matematiki> (дата обращения: 25.01.2021).

Prilepskaya L.L., Shved V.S. *Optimizatsiya sostava ugol'nykh shikht s ispol'zovaniem metodov prikladnoy matematiki* [Optimization of coal furnace charge composition using applied mathematics methods]. *Vestnik KuzGTU – Bulletin of the KuzGTU*, 2010, no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-sostava-ugolnyh-shiht-s-ispolzovaniem-metodov-prikladnoy-matematiki> (accessed on 11.06.2019). (In Russian).

4. Исследование пористой структуры активного угля из рисовой шелухи / Тху Аунг Си, Вин Мьинт Со, В.Н. Клушин, А.В. Нистратов и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 102 – 109.

Thu Aung Si, Win Myint Saw, Klushin V.N., Nistratov A.V. et al. *Issledovanie poristoi struktury aktivnogo uglya iz risovoi shelukhi* [Investigation of the porous structure of activated carbon from rice husks]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 102-109. (In Russian).

5. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.

Akhazarova S.L., Kafarov V.V. *Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Optimization of experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 319 p. (In Russian).

6. Способность пористых материалов поглощать аварийно химически опасные вещества / Ан.В. Агарков, А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, О.Н. Щербаклова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 1(56). – С. 94 – 99.

Agarkov An.V., Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N. *Sposobnost' poristyykh materialov pogloshhat' avariino khimicheski opasnye veshhestva* [Capacity

of porous materials to absorb chemically hazardous substances liable for emergencies]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 94-99. (In Russian).

7. Сорбционная способность промышленных отходов и каменных углей / Ан.В. Агарков, А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, О.Н. Щербакова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 3(56). – С. 46 – 54.

Agarkov An.V., Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N. *Sorbtsionnaya sposobnost' promyshlennykh otkhodov i kamennykh ugley* [Sorptions capacity of industrial waste and black coal]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 3(56), pp. 46-54. (In Russian).

8. Эффективность сорбции аварийно химически опасных веществ каменными углями Донецкого региона / Ан.В. Агарков, А.А. Козлитин, В.В. Лебедева // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк, 2019. – № 3(4). – С. 10 – 15.

Agarkov An.V., Kozlitin A.A., Lebedeva V.V. *Effektivnost' sorbtsii avariino khimicheskii opasnykh veshchestv kamennymi uglyami Donetskogo regiona* [Effectiveness of the Donetsk regional black coal for sorption of chemically hazardous substances liable for emergencies]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 3(4), pp. 10-15. (In Russian).

9. Компьютерное моделирование методом симплексных решеток плотности и вязкости многокомпонентных смесей непредельных углеводородов в широком диапазоне изменения параметров состояния / Д.И. Сагдеев, А.А. Хубатхузин, М.Г. Фомина и др. // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. – 2002. – № 10. – С. 50 – 54.

Sagdeev D.I., Khubatkuzin A.A., Fomina M.G. et al. *Komp'yuternoe modelirovanie simpleksnykh reshyotok plotnosti i vyazkosti mnogokomponentnykh smesei nepredel'nykh uglevodorodov v shirokom diapazone izmeneniya parametrov sostoyaniya* [Computerized modeling of simplex lattices for density and viscosity of multicomponent mixtures of unsaturated hydrocarbons within the wide range of changing parameters of state]. *Khimiya i komp'yuternoe modelirovanie. Butlerovskie soobshheniya – Chemistry and computerized modeling. Butlerov communications*, 2002, no. 10, pp. 50-54. (In Russian).

Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;
Oksana Nikolayevna Shcherbakova, advanced engineer; e-mail: astra-jasmin@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

DEVELOPMENT OF MULTICOMPONENT SORBENTS BY THE SIMPLEX-LATTICE METHOD

Purpose. Investigation of sorption characteristics of the multicomponent compositions based on black coal, boiler slag and sawdust for utilizing them as sorbents in the elimination of consequences of emergency spillages of chemically hazardous substances.

Methods. Determination of the sorption capacity of materials by the gravimetric method in static conditions of the experiment. The simplex-lattice method of mathematical planning of the experiment for optimization of the composition of sorbents, the statistical method of analysis and processing of the experimental data, the graphic method of construction of the “composition-characteristic” triangle diagram.

Results. The benzene sorption capacity of boiler slag, long-flame gas coal and sawdust and their two- and three-component mixtures in the static conditions of the experiment has been determined. The non-complete tertiary polynomial model has been chosen for description of the “composition-characteristic” analytical dependence of the multicomponent sorbents. Based on the experimental data the coefficients of the given polynomial have been derived, and the model of the analytical description of the “composition-characteristic” dependence has been obtained. The adequacy of the obtained polynomial model has been tested and confirmed by Student’s *t*-test. The “composition-characteristic” triangle diagram has been plotted for the investigated sorption compositions according to 69 point positions that correspond to the calculated values of the sorption capacity.

Scientific novelty. The benzene sorption capacity of the multicomponent sorbents based on long-flame gas coal and industrial wastes, i.e. boiler slag and sawdust, has been investigated for the first time. The polynomial model of the “composition-characteristic” dependence has been obtained and tested for calculation of the optimal component composition of a sorbent and for the construction of the “composition-characteristic” triangle diagram.

Practical value. The opportunity to select the optimal composition of the natural sorbent applying the simplex-lattice method of the experiment planning has been demonstrated. The plotted “composition-characteristic” triangle diagram allows promptly conducting a search for fields with the optimal compositions of sorbents taking into account the cost of the original materials and possibilities of the regional raw material base. In addition the opportunity of the graphic interpretation of results is preserved without the extensive and expensive experiments and the following data processing.

Keywords: *planning matrix; simplex-lattice planning method; multicomponent sorbent; polynomial; sorption capacity; “composition-characteristic” triangle diagram.*

УДК 661.183"ХП-И":620.163.4

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: oszd_niigd_1@mail.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
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-47

**ЗАВИСИМОСТИ МАССООБМЕНА
ОТ СХЕМ ИСПЫТАНИЙ СОРБЕНТОВ**

Цель. Исследование процессов массообмена в сорбентах диоксида углерода при их испытаниях в условном патроне и дыхательном аппарате.

Методы. Аналитические методы исследования процессов массообмена при разных режимах экспериментальных испытаний сорбентов.

Результаты. Определены особенности испытаний сорбентов в условном патроне и дыхательном аппарате.

Научная новизна. Установлены зависимости массообмена от схем испытаний сорбентов. Определены относительные погрешности при расчетах сорбционной емкости сорбентов.

Практическая значимость. Повышена достоверность оценки результатов исследований хемосорбента, которая позволяет усовершенствовать методику его испытаний.

Ключевые слова: сорбент; хемосорбент; диоксид углерода; дыхательный аппарат; респиратор; регенеративный патрон; химический известковый поглотитель диоксида углерода; гранулированный кислородсодержащий продукт; сорбционная емкость.

Постановка проблемы. Защитные свойства дыхательного аппарата и условия дыхания в нем существенно зависят от параметров работы регенеративного патрона и используемого в нем сорбента. В связи с этим к сорбенту и регенеративному патрону аппарата предъявляют высокие требования по обеспечению необходимого времени защитного действия, сорбционной емкости сорбента на единицу массы, степени очистки воздуха, тепловлажностным параметрам выходящего из патрона воздуха, сопротивлению потоку воздуха. Точность этих параметров в значительной степени зависит от методов их определения. Так, например, испытания хемосорбента, предназначенного для анестезиологии, проводят в картриджах или патронах при скорости газовой смеси 1...6 дм³/мин. Критерий завершения работы хемосорбента – увеличение концентрации диоксида углерода CO₂ во вдыхаемой смеси до 0,2 % [1].

Известны методы, при использовании которых образцы хемосорбентов помещают в динамическую трубку. Испытания хемосорбента в таком случае проводят при достижении объемной доли диоксида углерода CO₂, равной 2,0 %, в газовой смеси за слоем хемосорбента.

При исследовании сорбционных характеристик [2] гранулы сорбента – поглотителя CO₂ размещали в адсорбере, в который подавали поток воздуха

влажностью 90 % с объемным расходом газовой смеси 3,4 дм³/мин; при этом объемная доля CO₂ в газовой смеси составляла 4,0 %. Исследования проводили при достижении объемной доли CO₂ за слоем химического поглотителя на выходе из адсорбера 2,0 %.

Следует отметить, что применяемые в настоящее время методы оценки качества сорбентов были разработаны для хемосорбентов в форме гранул, зерен или таблеток. Попытки использовать какой-либо из этих методов для листового поглотителя оказались проблематичными из-за низкой сходимости результатов эксперимента. Химический эластичный листовый поглотитель ХЭЛП-ИК для испытаний сворачивали в виде рулона и загружали в динамическую трубку. Конечный результат опыта зависел от способа укладки продукта: при плотной укладке возрастало сопротивление газовой смеси, при слабой – регистрировали проскок CO₂ за слоем хемосорбента в первые минуты эксперимента, что свидетельствовало о случайном направлении газового потока в различных опытах. Поэтому актуален выбор правильного критерия качества сорбента и методики его определения.

Анализ последних исследований. Метод оценки защитной способности химического известкового поглотителя диоксида углерода (ХП-И) согласно ГОСТ 6755-88, когда регистрируют значения проскоковой доли диоксида углерода на 40-й и 120-й мин, не позволяет определить истинное значение сорбционной емкости – наиболее важного параметра любого сорбента. Критерием исчерпания защитной способности поглотителя служит содержание диоксида углерода в воздухе на выходе из слоя сорбента. Допустимое содержание диоксида углерода зависит от назначения аппарата. Для основного респиратора его величина равна 1,5 %. Значение сорбционной емкости необходимо как при разработке респиратора для определения требуемого заряда поглотителя в регенеративном патроне, так и при испытании регенеративного патрона респиратора, а также при испытании самого дыхательного аппарата – респиратора – с целью определения времени его защитного действия. Определение сорбционной емкости поглотителя проводят до полного расхода (исчерпания) его защитной способности, а не ограничивают заданной продолжительностью эксперимента, как это предусматривает ГОСТ 6755-88. Так, например, зарубежные производители в своих документах указывают в качестве основного показателя качества продукции сорбционную ёмкость (см. табл.) [3, 4].

Методика испытаний изолирующих респираторов (ГОСТ Р 12.4.253-2011) не предусматривает испытаний поглотителя диоксида углерода, которым снаряжен регенеративный патрон респиратора. Поэтому параметры его работы в различных испытаниях могут быть неодинаковы, а степень различия будет зависеть от качества ХП-И. Для устранения этого недостатка следует предусмотреть этап исследований сорбента, предназначенного для снаряжения регенеративного патрона, предшествующий испытаниям самого патрона. Это позволит дифференцированно оценивать работу регенеративного патрона, сорбента и их влияние на параметры респиратора в целом.

Таблица

Сорбционная емкость известковых поглотителей
зарубежных производителей

Наименование производителя	Armstrong	Dräger	Dräger	GE Healthcare	WR Grace	Inter-surgical	Inter-surgical I	Inter-surgical I
Наименование поглотителя	AMSORB® Plus	Dräger-sorb Free	Dräger-sorb 800+	Medisorb	Soda-sorb	Intersorb Plus	LoFloSorb	Sphera-sorb
Сорбционная емкость, дм ³ /кг	205 (155 *)	217 (186 *)	146	107	121	126	73	133

* По данным других исследователей.

Параметры работы сорбента и регенеративного патрона взаимосвязаны и взаимообусловлены, что усложняет методику их дифференцированного определения и анализа. Параметры работы одного и того же сорбента в разных регенеративных патронах неоднозначны. Поэтому данные, полученные при исследовании одного конкретного патрона, следует считать условными. Проведенные исследования показали, что влияние конструкции патрона и его размеров на параметры работы сорбента весьма существенно. На наш взгляд, оценка различных партий сорбента должна проводиться в одном и том же условном патроне. В то же время при определении защитных свойств сорбента, используемого в конкретном дыхательном аппарате, при изучении его влияния на параметры аппарата следует использовать регенеративный патрон данного аппарата или другой, близкий к нему по габаритам и конструкции. Это положение указывает на необходимость различать методику оценки защитных свойств сорбентов от методики испытаний регенеративных патронов. Обе методики имеют много общего, но в то же время отличаются конечной целью испытаний.

Цель работы – исследование процессов массообмена в сорбентах диоксида углерода при их испытаниях в условном патроне и дыхательном аппарате.

Результаты исследований. Задачи исследований сорбента – оценка его параметров и выявление их отклонений в различных партиях при идентичных условиях работы. Поэтому для испытаний следует использовать условный патрон, специально разработанный для многократного применения (снаряжения сорбентом и испытания). Размеры и вид патрона зависят от типа и вида сорбента, его особенностей, специфики применения. Для каждого сорбента необходимо унифицировать дыхательную нагрузку при испытаниях. В методике испытаний сорбентов, разработанной НИИГД «Респиратор», установлены следующие параметры условных патронов. Для испытаний ХП-И по ГОСТ 6755-88 предусмотрен патрон круглого сечения с внутренним

диаметром 110 мм и площадью 95 см², камерой для снаряжения сорбентом высотой 190 мм и массой заряда ХП-И 1,6 кг.

Для гранулированного кислородсодержащего продукта типа ОКЧ-2 используют патрон круглого сечения с внутренним диаметром 108 мм и площадью сечения 93 см², камерой для снаряжения сорбентом высотой 110 мм и массой заряда 0,9 кг. Внутри патрона находится 6-секционный теплогазораспределитель.

Оба патрона снабжены съемной крышкой и пружиной, уплотняющей слой сорбента.

Каждый сорбент необходимо испытывать только при одной дыхательной нагрузке, обусловленной особенностями его использования.

Поскольку динамические параметры сорбентов определяют при работе в условных патронах, полученные результаты в известной мере условны, то есть их можно корректировать в зависимости от конструкции реального патрона. Однако эти результаты следует использовать при предварительных расчетах конструкции регенеративного патрона вновь разрабатываемого респиратора. Кроме того, они позволяют произвести сравнительную оценку различных партий сорбента и определить их соответствие требованиям технической документации.

Для определения параметров работы сорбента в реальном патроне изолирующего респиратора его испытания необходимо проводить только в этом патроне или близком к нему по конструкции и габаритам. В дыхательном аппарате регенеративный патрон и сорбент находятся под воздействием различных дыхательных нагрузок (легочная вентиляция в пределах 12...85 дм³/мин), величина которых оказывает существенное влияние на их работу. Так, с увеличением нагрузки сорбционная емкость сорбента, как правило, снижается, что приводит к уменьшению времени защитного действия аппарата, обусловленному непропорционально возросшей нагрузкой. Поскольку регенеративный патрон должен обеспечивать работу аппарата во всем диапазоне дыхательных нагрузок, его испытания предусматривается проводить при средней и тяжелой дыхательных нагрузках. Испытания регенеративного патрона только при одной средней дыхательной нагрузке не позволят верно оценить его защитные свойства, и при работе в режиме тяжелой нагрузки существует вероятность, что патрон фактически может не удовлетворять предъявляемым к нему требованиям.

Важное значение при проведении экспериментальных исследований имеет правильный выбор методики. Согласно ГОСТ 6755-88, испытания сорбентов следует проводить при открытой схеме циркуляции воздуха, предусматривающей удаление выходящего из патрона воздуха в атмосферу. В то же время работа патрона в респираторе происходит по закрытой схеме: воздух, выходящий из патрона, вновь поступает в дыхательный цикл. За счет этого диоксид углерода, содержащийся в воздухе, при следующем цикле дыхания поступает в регенеративный патрон. Таким образом, нагрузка на регенеративный патрон при закрытой схеме циркуляции воздуха выше,

чем при открытой, что уменьшает время защитного действия патрона и сорбционную емкость продукта. Поэтому испытания патрона при открытой схеме циркуляции воздуха дают более благоприятные результаты, чем это имеет место на практике. Результаты испытаний по закрытой схеме более приближены к реальным условиям.

Испытания по закрытой схеме обеспечивают также бóльшую точность определения сорбционной емкости сорбента, что объясняется особенностями расчета этого параметра. При испытаниях по закрытой схеме величину сорбционной емкости сорбента q_{CO_2} , $\text{дм}^3/\text{кг}$, вычисляют по формуле

$$q_{\text{CO}_2} = a\tau / G, \quad (1)$$

где a – удельный расход (подача) диоксида углерода, $\text{дм}^3/\text{мин}$;

τ – время защитного действия патрона, мин;

G – масса сорбента в патроне, кг.

При испытаниях по открытой схеме величину сорбционной емкости находят по формуле

$$q_{\text{CO}_2} = \frac{a\tau - Cw\tau}{G}, \quad (2)$$

где C – средний проскок диоксида углерода за время защитного действия патрона;

w – легочная вентиляция при испытаниях, $\text{дм}^3/\text{мин}$.

Ошибку косвенного измерения сорбционной емкости сорбента следует вычислять с учетом погрешностей определения каждого параметра формул (1), (2) и формулы

$$\Delta y = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (3)$$

где f – функция: сорбционная емкость сорбента;

x_i – переменная: параметры сорбента формул (1) и (2).

Анализ определения сорбционной емкости показал, что при закрытой схеме циркуляции воздуха эта ошибка составляет 1,5...2,0 %, а при открытой – 4,5...5,0 %. Следовательно, испытания при закрытой схеме позволяют обеспечить большую точность. Исходя из этого для определения сорбционной емкости целесообразно применение закрытой схемы циркуляции воздуха.

Выводы. Для повышения объективности оценки качества сорбентов необходимо проведение их испытаний:

- в условных патронах и в составе дыхательных аппаратов;
- при двух дыхательных нагрузках;
- при открытой или закрытой схеме циркуляции воздуха.

Список литературы / References

1. Известковые поглотители нового поколения / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, Б.В. Путин, С.Б. Путин. – М.: Спектр, 2012. – 136 с.

Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Putin B.V., Putin S.B. *Izvestkovye poglotiteli novogo pokoleniya* [Lime absorbers of new generation]. Moscow, Izdatel'skiy dom "Spektr" Publ., 2012, 136 p. (In Russian).

2. Суворова, Ю.А. Влияние состава известкового химического поглотителя на его сорбционные и прочностные характеристики / Ю.А. Суворова, А.А. Тарова, И.В. Рязанов // Вестник ТГТУ. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 318 – 325.

Suvorova Yu.A., Tarova A.A., Ryazanov I.V. *Vliyanie sostava izvestkovogo khimicheskogo poglotitelya na ego sorbtsionnye i prochnostnye kharakteristiki* [Influence of chemical lime absorber composition on its sorption and strength properties]. *Vestnik TGTU – Bulletin of the TGTU*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 318-325. (In Russian).

3. Amsorb Plus. For GE equipment [Электронный ресурс]. URL: <https://nda.ru/images/catalog/ge%20healthcare/AMSORB%20PLUS.pdf> (дата обращения: 01.04.2021).

4. Carbon Dioxide Absorbents. The complete choice [Электронный ресурс]. URL: http://unimedi.ge/images/stories/pdf/intersujical/ABSORB_CAT_2_UK_low-res.pdf (дата обращения: 01.04.2021).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 14.04.2021

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: oszd_niigd_1@mail.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
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-45

DEPENDENCES OF MASS EXCHANGE ON TEST PATTERNS OF SORBENTS

Purpose. Investigation of mass exchange processes in carbon dioxide sorbents during their testing in a conventional cartridge and a breathing apparatus.

Methods. Analytical methods of investigation of the mass exchange processes under the different experimental test modes of the sorbents.

Results. The specifics of the sorbent tests in the conventional cartridge and breathing apparatus have been determined.

Scientific novelty. The dependences of the mass exchange on the sorbent test patterns have been established. The relative errors in calculations of the sorption capacity of the sorbents have been determined.

Practical value. The trustworthiness of estimating the results of investigations of the chemisorbent has been improved which makes it possible to perfect its test methodology.

Keywords: *sorbent; chemisorbent; carbon dioxide; breathing apparatus; respirator; regenerative cartridge; carbon dioxide chemical lime absorber; granulated oxygen containing product; sorption capacity.*

УДК [612.821:614.84-051]:331.46

*Наталья Александровна Тохташ, инж.; e-mail: kalinichenko_080597@mail.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-40*

ВЛИЯНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ НА СНИЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА СПАСАТЕЛЕЙ

Цель. Выявить роль психологических аспектов в снижении производственного травматизма, в том числе со смертельным исходом.

Методы. Информационно-аналитические исследования проблемных психологических аспектов в работе спасателя.

Результаты. Обоснована необходимость разработки методов оценивания профессиональной подготовки личного состава аварийно-спасательных служб МЧС.

Научная новизна. Впервые предложен способ комплексной оценки профессиональных качеств спасателя.

Практическая значимость. Обоснование параметров оценки психофизиологических факторов, влияющих на вероятность травмирования спасателей, позволит при приеме на работу в спасательные службы выявлять и отклонять таких кандидатов.

Ключевые слова: спасатель; профпригодность; травматизм; аварийно-спасательные операции; смертельный исход; человеческий фактор; психофизиологические аспекты.

Постановка задачи. В современном высоко индустриализированном мире наблюдается устойчивый рост материальных потерь от крупнейших аварий и катастроф техногенного и природного характера. Это создает вполне реальную угрозу для социально-экономической сферы и окружающей среды не только отдельных регионов, но и всей планеты в целом. Катастрофические последствия воздействия поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) – одна из глобальных проблем, стоящих перед человечеством.

Анализ крупных аварий техногенного характера последних лет показывает, что в 22 % случаев непосредственные причины их возникновения вызваны человеческим фактором (далее – ЧФ) [1]. Согласно статистике Ростехнадзора, 45 % аварий на атомных станциях, 60 % авиакатастроф, 80 % катастроф на воде и 90 % автокатастроф происходят по вине обслуживающего персонала. Установлено, что оператор совершает примерно 1...2 ошибки на каждые 100 операций даже в оптимальных условиях работы. Ежегодный ущерб от техногенных аварий по Российской Федерации (далее – РФ) составляет 2 млрд долларов США [2].

По данным Роструда, каждый год в РФ в результате этих аварий травмы различной степени тяжести получают более 28 тыс. человек, причем в 75 % несчастных случаев они обусловлены причинами организационного и психологического характера, а также человеческим фактором [3].

Международная статистика свидетельствует о том, что причины производственного травматизма лишь в 14 % случаев – опасные условия труда, а в 86 % случаев – опасные действия персонала, то есть ЧФ.

В настоящее время психологические причины травматизма поддаются изучению. Разобравшись в их природе, возможно выявить перспективы и пути организации безопасной работы в «рискованных профессиях» и дать эффективные практические рекомендации.

Еще в 1931 г. немецкий исследователь Г.В. Хайнрих предложил теорию «домино» (теорию возникновения несчастного случая), в которой каждый фактор приводит в действие последующий, подобно тому, как падают поставленные в ряд костяшки домино:

- 1) происхождение и социальные условия;
- 2) ошибка рабочего;
- 3) неправильные действия в совокупности с механической и физической опасностью;
- 4) несчастный случай;
- 5) повреждения или травмы.

В соответствии с этим он предположил, что как удаление одной костяшки домино из ряда может остановить их падение, так и исключение одного из факторов может предотвратить случай травматизма. При этом ключевой фактор данной последовательности – фактор 3.

Г.В. Хайнрих считал, что 88 % несчастных случаев вызваны неправильными действиями персонала, 10 % – ненадежностью оборудования и 2 % – форс-мажорными обстоятельствами.

На современном этапе исследователи все более склоняются к мысли, что безопасность труда в значительной мере объясняется психологическими аспектами. Их усилия направлены на разработку теории этиологии производственного травматизма, которая позволит выявить, а затем изолировать и устранить из производственного процесса факторы, способствующие возникновению несчастных случаев или являющиеся их непосредственной причиной.

Таким образом, учет ЧФ и его психологических аспектов – важное условие разработки мероприятий по снижению травматизма, в том числе приводящего к смертельному исходу в производственной сфере. В первую очередь это касается потенциально опасных профессий, к которым относится работа спасателей.

Анализ последних публикаций. В работе [4] изложен подход к разработке метода оценивания профессиональной пригодности персонала спасательных служб с целью снижения производственного травматизма. В работе [5] приведена оценка индивидуально-психологических особенностей спасателей при ведении аварийно-спасательных работ. В статье [6] исследованы психологические аспекты ЧФ при гибели и травмировании личного состава спасательных служб.

Проблемы профессиональной психологической адаптации пожарных-спасателей и концепция их психофизиологического профотбора рассмотрены

в работах [7, 8]. Вопрос поставлен в общем виде; особенности этапов психолого-профессиональной (которая начинается на ранних стадиях профессионального ориентирования личности) и учебно-практической подготовки не раскрыты.

О роли психологических факторов в профессиональной подготовке спасателей различных ведомств идет речь в работах [9 – 11]. Исследовав указанные литературные источники, можно прийти к выводу о необходимости комплексного подхода к решению проблемы использования методик психологической оценки спасателей. В большинстве исследований не в полной мере проводят анализ социально-психологических факторов, приведших к травмированию.

Важнейшая роль в структуре мероприятий по обеспечению безопасной работы спасателей отведена психологии безопасности труда.

Цель исследования – выявить влияние психологических аспектов на травмирование спасателей.

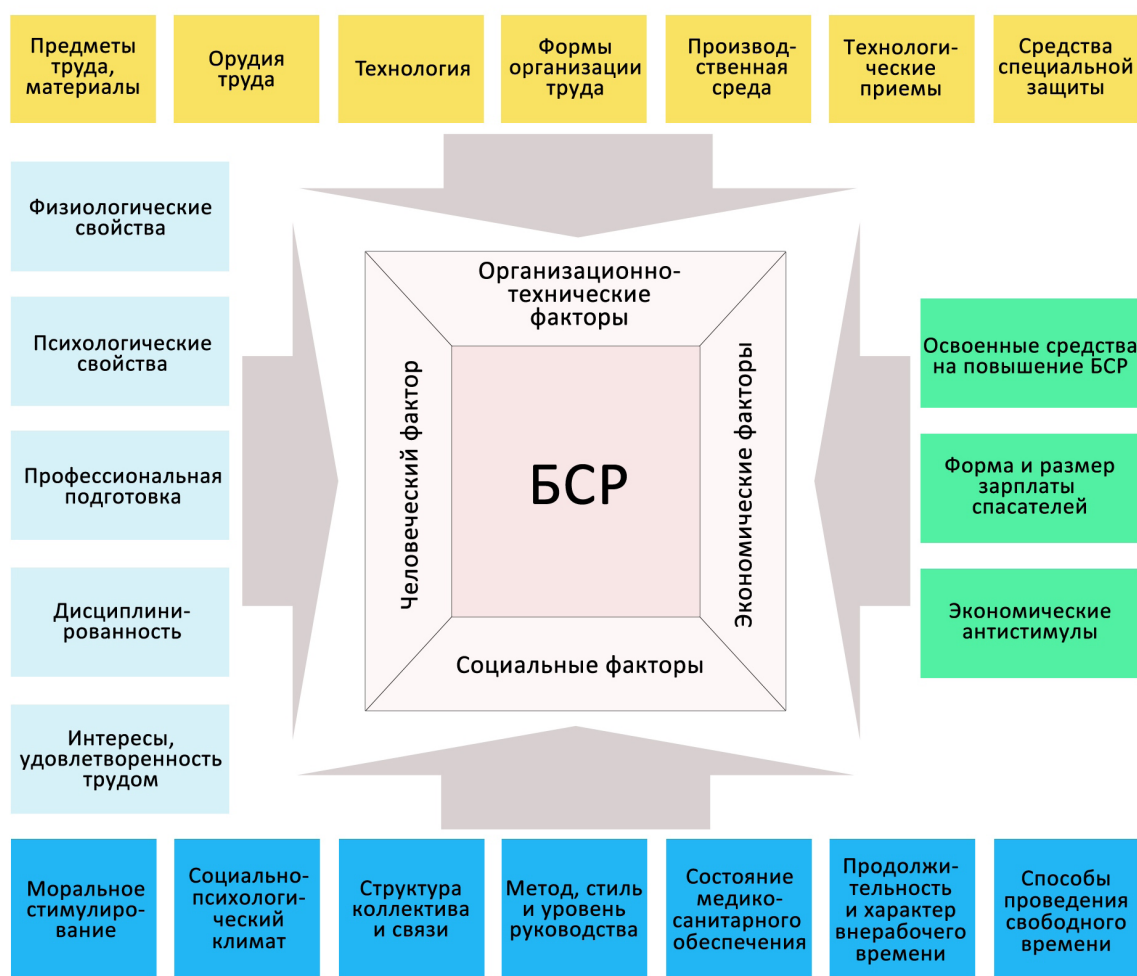
Изложение основного материала. Уже в 1888 г. в Бельгии был принят законодательный акт «О вредных и опасных предприятиях». В этом документе различные типы производств были классифицированы по двум категориям в зависимости от степени их потенциальной опасности. Поэтому все профессии условно можно разделить на две категории:

- профессии, предусматривающие жесткие требования к определенным психофизиологическим качествам личности;
- профессии, не предусматривающие таких требований.

Профессия спасателей относится к первой категории. Эффективность и надежность работы спасателей основаны на их профессиональной пригодности и оперативной готовности. Под пригодностью подразумевается соответствие физических, психофизиологических и психологических качеств человека требованиям, обусловленным экстремальным характером их труда, необходимостью оперативного принятия сложных и нестандартных решений, ориентации в пространстве в условиях ЧС, что предусматривает высокую ответственность спасателя [11, 12] (см. рис.).

В процессе решения поставленной профессиональной задачи спасатели подвергаются воздействию стрессов, в числе которых:

- угрозы жизни и здоровью, которые могут быть вызваны обрушением зданий и сооружений, взрывами, выбросом пламени, радиационным и химическим воздействием, возможностью поражения электрическим током и др.;
- необходимость оперативного принятия решений в постоянно меняющейся обстановке и высокая ответственность за их правильность;
- экстремально высокие физические нагрузки, работа без полноценного отдыха, необходимость работы в средствах индивидуальной защиты, шум и т.д.;
- эмоциональный стресс от увиденного: вид погибших людей или животных, разрушенных зданий и сооружений и др.



Факторы, влияющие на безопасность спасательных работ (БСР)

Стрессогенные факторы ЧС могут вызывать у спасателей острые реакции на стрессовую ситуацию, способные в дальнейшем формировать посттравматические психические расстройства, требующие медико-психологической помощи.

Так, после участия в ноябре 2009 г. в ликвидации последствий крушения поезда «Невский экспресс» у 36 % спасателей отмечались признаки острых стрессовых реакций, у более чем 20 % – признаки субдепрессивного фона настроения, что проявлялось в виде вторгающихся помимо воли человека навязчивых воспоминаний о трагических событиях, агрессивных реакций и подавленного настроения, избегания их упоминания [5].

Американский психиатр Р.К. Кесслер сообщает о возникновении в 10 % случаев посттравматических стрессовых расстройств у спасателей или полицейских, ставших свидетелями несчастного случая с жертвами или оказывавших помощь жертве [13].

Таким образом, необходимы проведение комплексного научного анализа причин психологического травмирования личного состава спасательных служб, всестороннее исследование психологических закономерностей и условий получения ими травм и увечий в процессе профессиональной деятельности,

принятие конкретных мер, направленных на минимизацию травматизма и смертности.

При анализе морально-психологической подготовки личного состава аварийно-спасательных формирований следует учитывать тот факт, что, по данным Государственного центра социальной и судебной психиатрии, в РФ 5 % населения страдает психическими расстройствами и нуждается в помощи психиатра. У обратившихся за помощью в поликлиники и амбулатории в 25...30 % случаев наблюдается нарушение психики, и это необходимо учитывать при приеме на работу [9].

К основным психологическим причинам травмирования спасателей, в том числе со смертельным исходом, относят:

- индивидуально-психологическую неустойчивость к стрессовым ситуациям;
- психологические особенности реагирования спасателей на различные стресс-факторы;
- социально-психологические трудности и проблемы эффективной межличностной и профессиональной коммуникации и адаптации;
- недостатки тактико-психологической подготовки сотрудников;
- недостатки профессиональных знаний, умений, качеств.

Основные психологические направления, ведущие к снижению уровня риска травмирования спасателя, следующие:

- развитие у работников эмоциональной и психологической устойчивости к различным стресс-факторам, возникающим при ликвидации ЧС;
- формирование психологической устойчивости к действиям в аварийных опасных ситуациях;
- систематическая научно обоснованная профессионально-психологическая подготовка личного состава аварийно-спасательных формирований.

В настоящее время практического внедрения этих направлений в подготовку личного состава спасательных служб недостаточно.

Типичные формы психологического поведения спасателей, получивших травмы при ликвидации аварийных ситуаций, в том числе повлекшие за собой смертельный исход, имеют психологическую детерминированность.

Психофизиологическую обусловленность, влияющую на вероятность травмирования спасателя, делят на личностную, временную и ситуативную. Личностная психофизиологическая обусловленность определяется психологической направленностью личности и характеризуется такими чертами характера [14], как:

- агрессивность;
- чрезмерная самоуверенность;
- нерешительность.

Возможно, эти черты характера влияют на вероятность наступления несчастного случая, но не объясняют это явление с психофизиологической стороны.

Временная обусловленность приводит к травмированию и может объясняться недостаточной профессиональной подготовкой, небольшим

опытом участия в спасательных операциях. Неопытность приводит к повышению вероятности принятия ошибочных действий, что может повлечь несчастные случаи, в том числе с фатальным исходом. Нервное напряжение, возникшее вследствие неуверенности в правильности своих действий, приводит к быстрому утомлению и появлению новых ошибок.

Ситуативная обусловленность к возникновению травмирования определяется следующими состояниями:

- функциональным (усталость, утомление, состояние тревоги);
- эмоциональным (склонность к риску, отсутствие ответственности);
- мотивационным (переоценка ценности, потеря индивидом смысла жизни, незаинтересованность и неудовлетворенность своей работой).

Если временная и ситуативная психофизиологическая обусловленность может быть с большим или меньшим успехом нивелирована психологическим путем, то личностная не может быть устранена, по крайней мере в настоящее время. Задача штатных клинических психологов спасательных служб – выявить подобных индивидов и не допустить их приема на работу.

При приеме на работу в систему МЧС или спасательные службы других министерств и ведомств надежность и валидность прогноза кадровой службы и врачей Врачебной экспертной комиссии (ВЭК) сопряжена со следующими проблемами:

- зачастую отсутствие объективных и полных сведений о кандидате;
- однократность и кратковременность проведения экстренного медицинского обследования;
- диссимуляция кандидатов, которые всячески стремятся скрыть от членов ВЭК свои личностные и физические недостатки ввиду заинтересованности в трудоустройстве;
- отсутствие индивидуально-ориентированного перечня психофизиологических и психологических требований к той или иной профессии (см. [8]).

Поэтому разработка критериев оценки индивидуальных черт будущих спасателей для выявления их предрасположенности к риску – актуальная задача при приеме на работу.

Эти критерии могут быть использованы при разработке методики определения профессиональной пригодности спасателей.

В настоящее время для определения пригодности к работе спасателя выделены три наиболее профессионально важных качества, необходимых для предупреждения производственного травматизма: эмоциональная устойчивость, склонность к оправданному риску, интеллект (табл. 1).

Личностный опросник Г.Ю. Айзенка предназначен для исследования экстраверсии – интраверсии и нейротизма, он предлагает ситуации, позволяющие проявить испытуемому те или иные личностные качества. Опросник содержит шкалу «лжи», которая позволяет выявить тенденцию испытуемого представить себя в неоправданно хорошем свете.

Таблица 1

Методики для оценки профессионально важных качеств

№ п/п	Профессионально важное качество	Исследуемое свойство	Методика для оценки профессионально важных качеств
1.	Эмоциональная устойчивость	Экстраверсия Нейротизм	Опросник Г.Ю. Айзенка
2.	Склонность к оправданному риску	<ul style="list-style-type: none"> ● Готовность к риску ● Импульсивность 	<ul style="list-style-type: none"> ● Тест-опросник А.М. Шуберта ● Тест-опросник В.А. Лосенкова
3.	Интеллект	Уровень интеллекта	Краткий ориентировочный тест В.Н. Бузина, Э.Ф. Вандерлика

Опросник готовности к риску А.М. Шуберта позволяет оценить особенности поведенческих реакций человека в ситуациях, сопряженных с неопределенностью, опасностью для жизни, требующих нарушения установленных норм, правил.

Опросник В.А. Лосенкова ориентирован на оценку импульсивности, что позволяет определить уровень самоконтроля персонала, настойчивость в достижении поставленных целей, наличие ценностных ориентиров.

Краткий ориентировочный тест В.Н. Бузина, Э.Ф. Вандерлика предназначен для определения интегрального показателя общих способностей (в том числе способности к обучению).

В данных тестах отсутствуют объективно правильные или неправильные ответы, но ответ на каждый пункт опросника позволит определить степень выраженности той или иной черты. Опросники подобраны таким образом, чтобы на основании ответов можно было получить информацию о склонностях индивида, особенностях поведения и реагирования в различных ситуациях.

Полученные по результатам расчета по формуле данные – исходные для установления зависимости показателей склонности персонала к риску и уровней профессионально важных качеств (далее – ПВК). Валидность набора тестов для прогнозирования профессиональной пригодности оценена методами регрессионного анализа с помощью табличного процессора Microsoft Excel. Было принято следующее уравнение множественной регрессии, позволяющее рассчитать степень предрасположенности индивида к риску на основе показателей его тестов:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i,$$

где y – обобщенная оценка предрасположенности индивида к риску;

a_0, a_i – коэффициенты регрессионного уравнения;

x_i – факторы, влияющие на степень предрасположенности к риску;

n – число принятых факторов.

Коэффициенты регрессионной кривой составили $a_0 = 0,09$; $a_1 = 0,13$; $a_2 = 0,11$; $a_3 = 0,16$; $a_4 = 0,13$; $a_5 = 0,19$.

Так, для горноспасателей были отобраны следующие факторы:

x_1 – экстраверсия (свойство личности, выражающееся в эмоциональном отклике на внешние явления);

x_2 – нейротизм (черта личности, характеризующаяся эмоциональной неустойчивостью);

x_3 – готовность к риску (готовность к действию, совершаемому в условиях неопределенности);

x_4 – импульсивность (склонность действовать без достаточного анализа ситуации);

x_5 – уровень интеллекта (использование своих знаний для принятия решений в конкретных аварийных ситуациях).

Коэффициент множественной регрессии R_{risk} равен 0,95. Это означает, что на основе полученной оценки функции регрессии 95 % общей дисперсии объясняется зависимостью общего показателя склонности к риску работника от степени выраженности у него таких свойств личности, как экстраверсия, нейротизм, готовность к риску, импульсивность, уровень интеллекта. Таким образом, данная регрессионная зависимость хорошо согласуется с эмпирическими данными, и лишь 5 % общей дисперсии приходится на влияние прочих, не учтенных в регрессии, факторов-переменных.

Проверка уравнения на сходимость подтвердила взаимосвязь между переменными: $F_{расч} = 43,5$, что намного больше $F_{кр} (0,05; 5,6) = 4,39$. Поэтому проведенные расчеты можно признать корректными и с высокой степенью статистической достоверности можно считать доказанным влияние рассматриваемых психологических качеств работника на предрасположенность его к риску и, как следствие, к вероятному травмированию.

В табл. 2 представлены ПВК спасателей, оцененные по шкале от 1 до 5 баллов (см.: [8]).

Таблица 2

Профессионально важные качества спасателей (от 1 до 5 баллов)

Классы и группы профессионально важных качеств (ПВК)	Специальность		
	Спасатель	Командир	Связист
Моторные (уровень организма)			
1. Локомоторные (максимальная мышечная масса, физическая выносливость, статическая выносливость, гибкость, ловкость)	4,47 ±0,65	2,58±0,54	1,92±0,52
2. Нейродинамические (сила нервной системы, уравновешенность нервной системы, скорость реакции)	4,30 ±0,69	3,72±0,68	3,15±0,63
3. Психомоторные (сложная координация движений, точность, темпоритм движений)	3,98 ±0,65	3,04±0,72	3,57±0,71

Окончание табл. 2

Средняя арифметическая оценка моторных ПВК	4,24	3,11	2,88
Рецептивные (уровень индивида)			
4. Сенсорные (зрение, хороший слух, вестибулярная устойчивость)	3,85±0,66	3,22±0,71	3,88±0,62
5. Перцептивные (целостность восприятия, восприятие пространства)	4,17±0,64	3,41±0,68	4,03±0,50
6. Attentionные (устойчивость и концентрация, объем и распределение)	4,09±0,75	4,08±0,61	4,23±0,73
Средняя арифметическая оценка рецептивных ПВК	4,04	3,56	4,05
Когнитивные (уровень субъекта)			
7. Мнемические (кратковременная, зрительная и слуховая память)	3,53±0,61	4,18±0,64	4,12±0,56
8. Имажинитивные (продуктивное, конкретное мышление)	4,10±0,84	4,42±0,63	3,66±0,82
9. Интеллектуальные (оперативное, абстрактное мышление)	3,66±0,59	4,23±0,61	3,43±0,75
Средняя арифметическая оценка когнитивных ПВК	3,76	4,28	3,73
Характерологические (уровень личности)			
10. Эмоциональные (эмоциональный тон и настроение, настойчивость и упорство)	4,32±0,70	4,08±0,74	3,50±0,73
11. Личностные (аккуратность, педантизм, доминирующая мотивация)	4,57±0,65	4,02±0,76	3,52±0,65
12. Коммуникативные (лидерские, организаторские качества, стиль руководства)	3,61±0,7	4,24±0,74	3,96±0,62
Средняя арифметическая оценка характерологических ПВК	4,16	4,11	3,66
Средняя арифметическая оценка по специальности	4,04	3,76	3,57

Как видно из табл. 2, особые требования предъявляются к локомоторным, нейродинамическим и эмоционально-волевым качествам пожарного – более 4,3 балла. Немаловажную роль играют такие рецептивные качества, как репродуктивное восприятие и сукцессивное внимание. Профессия пожарного боевого расчета предъявляет высокие требования к таким качествам человека, как:

- физическая сила (особенно при взрывных, пиковых нагрузках);
- высокая скорость дизъюнктивной реакции;
- вестибулярная устойчивость;
- ориентация в пространстве;

- способность принимать быстрые и верные решения в экстремальных условиях.

Высокая средняя арифметическая оценка всех классов ПВК и их специфическое сочетание свидетельствуют о необходимых требованиях, предъявляемых к профессии спасателя. Более строгие требования, предъявляемые к командно-начальствующему составу, выражены лишь в отношении когнитивных (память, представление, мышление) и коммуникативных качеств, связанных с их управленческими, лидерскими и воспитательными функциями.

Для обеспечения практической реализации метода оценки профессиональной пригодности спасателей исследуемые качества распределили по группам с учетом психологических предпосылок:

- «успешно» пригодные – достаточный уровень развития ПВК; по данным обследования, противопоказаний к работе нет;

- «условно» пригодные – отдельные неблагоприятные признаки, свидетельствующие о затруднении в профессиональной адаптации; имеются предпосылки для развития осложнения в профессиональной деятельности, особенно во внестатных аварийных ситуациях;

- «непригодные» – выраженные неблагоприятные показатели; имеются существенные противопоказания к работе.

Разработанный метод оценки профессиональной пригодности позволяет сократить время и затраты на профессиональное обучение, повысить его эффективность, снизить текучесть кадров, производственный травматизм, повысить качество и эффективность работы. Предложенный подход позволяет проводить оценку пригодности к деятельности групп профессий, объединенных по принципу общности основных характеристик деятельности и, соответственно, профессионально важных качеств личности.

Практическая ценность показателя «склонность к риску» определяется удобством его применения для получения расчетного показателя профессионального риска с целью выбора наиболее рациональных решений в разработке мероприятий по охране труда и принятия управленческих решений.

В настоящее время, по данным психофизиологического профотбора, выделены 4 вида заключений.

Первая группа профпригодности – лица, профессионально пригодные в первую очередь (безусловно пригодные). К ним относятся работники, которые способны успешно овладеть данной специальностью в установленные сроки и успешно выполнять предписанные обязанности. У этих лиц имеется полное соответствие психофизиологических свойств и возможностей требованиям, предъявляемым к ним соответствующей профессией.

Вторая группа профпригодности – работники, профессионально пригодные во вторую очередь. Лица, входящие в эту группу, в процессе работы по специальности могут допускать незначительные ошибки, не оказывающие существенного влияния на эффективность и безопасность аварийно-спасательных работ. Эти ошибки в основном могут быть связаны с изменением условий деятельности, появлением не предписанных ранее функций,

усложнением обстановки. Для таких специалистов характерно некоторое снижение резервных возможностей организма.

Третья группа профпригодности – лица с неопределенным прогнозом профессиональной пригодности (условно пригодные). Для представителей этой группы необходимо увеличение сроков подготовки и обучения новой специальности. Назначение таких людей на соответствующие должности в спасательных службах сопряжено с повышенной вероятностью совершения ими ошибок в процессе работы и допускается только при дефиците человеческих ресурсов с осуществлением повторного психофизиологического контроля через год.

Четвертая группа профпригодности – профессионально непригодные лица. К ним относятся кандидаты, имеющие полное несоответствие психофизиологических характеристик требованиям данной профессии. Их обучение малопродуктивно даже при увеличении сроков подготовки.

Выводы

- Человеческий фактор и психологические особенности личности оказывают существенное влияние на уровень травматизма, в том числе приводящего к смертельному исходу спасателей при ведении аварийно-спасательных работ.

- Для снижения этого негативного влияния необходимы всесторонние исследования психологических особенностей спасателей при проведении аварийно-спасательных работ.

- Предлагается разработать методику выявления индивидов, имеющих психофизиологическую обусловленность, влияющую на вероятность травмирования, при приеме на работу в спасательные службы.

- Обоснована необходимость разработки методов оценки профессиональной подготовки личного состава аварийно-спасательных служб в целях снижения производственного травматизма.

Список литературы / References

1. Gertman, D.I., Blackman, H.S. Human reliability and safety analysis data handbook, New York, 1995, 448 p. (In English).

2. Тихонов, М.Н. Человеческий фактор в условиях чрезвычайных ситуаций и аварий на атомных станциях / М.Н. Тихонов, О.Э. Муратов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010. – № 5. – С.14 – 20.

Tikhonov M.N., Muratov O.E. *Chelovecheskii faktor v usloviyakh chrezvychainykh situatsii i avarii na atomnykh stantsiyakh* [Human factor in conditions of emergencies and accidents at nuclear power stations]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya – Energy: economics, technology, ecology*, 2010, no. 5, pp. 14-20. (In Russian).

3. Сычев, Я.В. Опасности техногенных катастроф современности / Я.В. Сычев // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 1(41). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-1/05-01-12.ttb.pdf> (дата обращения: 06.07.2017).

Sychyov Ya.V. *Opasnosti tekhnogennykh katastrof sovremennosti* [Hazards of modern man-made disasters]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti – Technologies*

of technogenic safety, 2012, no. 1(41). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-1/05-01-12.ttb.pdf> (accessed 06.07.2017). (In Russian).

4. Гарт, В.А. Подход к разработке метода оценки профессиональной пригодности персонала с целью снижения производственного травматизма / В.А. Гарт, Е.П. Потоцкий // VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей»: сб. тезисов. – М., 2016. – С. 43 – 48.

Gart V.A., Pototskiy Ye.P. *Podkhod k razrabotke metoda otsenki professional'noi prigodnosti personala s tsel'yu snizheniya proizvodstvennogo travmatizma* [Approach to development of a method for evaluation of the professional suitability of personnel with a purpose of reduction of the occupational injury rate]. *VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Energoeffektivnyye i resursosberegayushhie tekhnologii v promyshlennosti. 100 let otechestvennogo proektirovaniya metallurgicheskikh pechei"*: sb. nauch. tr. [The 8th International scientific and practical conference "Energy-efficient and resource-saving technologies in industry. 100 years of domestic design of metallurgical furnaces": collected scientific papers]. Moscow, NITU "MISiS" Press, 2016, pp. 43-48. (In Russian).

5. Скороход, А.С. Изучение индивидуально-психологических особенностей психологов на различных этапах участия в аварийно-спасательных и других неотложных работах / А.С. Скороход, В.О. Солнцев, Д.Н. Церфус // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России: науч.-аналит. журн. – 2014. – № 3. – С. 125 – 131.

Skorokhod A.S., Solntsev V.O., Tserfus D.N. *Izuchenie individual'no-psikhologicheskikh osobennostei psikhologov na razlichnykh etapakh uchastiya v avariino-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabotakh* [Study of individual-psychological characteristics of psychologists at the different stages of participation in emergency-rescue and other urgent operations]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii: nauch.-analit. zhurn.* [Bulletin of the Sankt-Petersburg university of the State firefighting service of EMERCOM of Russia: scientific and analytical journal]. 2014, no. 3, pp. 125-131. (In Russian).

6. Хмыров, И.М. Психологические факторы гибели и травмирования личного состава спасательных служб / И.М. Хмыров, А.А. Яценко, Ю.С. Чапля // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: науч. журн. – 2014. – № 1(5). – С. 159 – 161.

Khmyrov I.M., Yashhenko A.A., Chaplya Yu.S. *Psikhologicheskie faktory gibeli i travmirovaniya lichnogo sostava spasatel'nykh sluzhb* [Psychological factors of fatalities and injuries of the personnel of the rescue services]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy: nauch. zhurn.* [Fire safety: problems and prospects: scientific journal]. 2014, no. 1(5), pp. 159-161. (In Russian).

7. Марков, А.В. Проблема профессиональной психологической адаптации пожарных и спасателей // *Техногенная и природная безопасность: сб.*

мат-лов IV Всерос. науч.-практ. конф. (Саратов, 19–21 апреля 2017 г.). – Саратов, 2017. – С. 279 – 281.

Markov A.V. *Problema professional'noi psikhologicheskoi adaptatsii pozharnykh i spasatelei* [Problem of the professional psychological adaptation of firefighters and rescuers]. *Tekhnogennaya i prirodnyaya bezopasnost': sb. mat-lov IV Vseros. nauch.-prakt. konf. (Saratov, 19-21 aprelya 2017 g.)* [Technogenic and environmental safety: collection of materials of the 4th All-Russian scientific and practical conference (Saratov, April 19-21, 2017)]. Saratov, 2017, pp. 279-281. (In Russian).

8. Псядло, Э.М. Концепция психофизиологического профотбора пожарных-спасателей / Э.М. Псядло // Актуальные проблемы транспортной медицины: науч. журн. – 2006. – № 4(6). – С. 85 – 92.

Psyadlo E.M. *Kontseptsiya psikhofiziologicheskogo profotbora pozharnykh-spasatelei* [Concept of psychophysiological vocational selection of firefighters-rescuers]. *Aktual'nye problemy transportnoi meditsiny: nauch. zhurn.* [Actual problems of transport medicine: scientific journal]. Odessa, 2006, no. 4(6), pp. 85-92. (In Russian).

9. Таха, М.Х. Роль человеческого фактора в техногенной и социальной безопасности / М.Х. Таха, О.С. Булычева, Д.Ю. Садака // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 6. – С. 94.

Takha M.Kh., Bulychyova O.S., Sadaka D.Yu. *Rol' chelovecheskogo faktora v tekhnogennoi i sotsial'noi bezopasnosti* [Role of human factor in technogenic and social safety]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya – Achievements of the modern natural science*, 2014, no. 6, p. 94. (In Russian).

10. Лоскутова, Е.Е. О роли психологических факторов в профессиональной подготовке экипажей пожарных и спасательных судов / Е.Е. Лоскутова, И.В. Трифонов, Е.В. Любимов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2012. – № 1/2. – С. 75 – 78.

Loskutova Ye.Ye., Trifonov I.V., Lyubimov Ye.O. *O roli psikhologicheskikh faktorov v professional'noi podgotovke ekipazhei pozharnykh i spasatel'nykh sudov* [On role of psychological factors in professional training of crews of firefighting and rescue vessels]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu – Problems of military engineering. Series 16: Counter-terrorism technical means*, 2012, no. 1/2, pp. 75-78. (In Russian).

11. Калиниченко, Н.А. Человеческий фактор гибели и травматизма спасателей / Н.А. Калиниченко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – № 3(7). – С. 190 – 194.

Kalinichenko N.A. *Chelovecheskii faktor gibeli i travmatizma spasatelei* [Human factor of fatality and injury rate of rescuers]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya – Fire and technogenic safety: problems and methods of improvement*, 2020, no. 3(7), pp. 190 – 194. (In Russian).

12. Овечкин, А.Н. Морально-психологическая подготовка спасателей / А.Н. Овечкин, В.Ю. Рядоуцкий, Д.Е. Егоров. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – 7 с.

Ovechkin A.N., Ryadoutskii V.Yu., Egorov D.Ye. *Moral'no-psikhologicheskaya podgotovka spasatelei* [Moral and psychological training of rescuers]. Belgorod, BGTU im. V.G. Shukhova Press, 2013, 7 p. (In Russian).

13. Васина, Е.В. Психофизиологические аспекты профессиональной ориентации обучающихся / Е.В. Васина // Образование. Карьера. Общество. – 2013. – № 2(38). – С. 52 – 54.

Vasina Ye.V. *Psikhofiziologicheskie aspekty professional'noi orientatsii obuchayushhikhsya* [Psychophysiological aspects of occupational orientation of trainees]. *Obrazovanie. Kar'era. Obshhestvo – Education. Career. Society*, 2013, no. 2(38), pp. 52-54. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 17.03.2021

Natalya Aleksandrovna Tokhtash, engineer; e-mail: kalinichenko_080597@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-40

INFLUENCE OF PSYCHOLOGICAL ASPECTS ON REDUCTION OF OCCUPATIONAL INJURY RATE OF RESCUERS

Purpose. To find out the role of psychological aspects in reduction of the rescuers' occupational injury rate, the one with fatalities included.

Methods. Information and analytical investigations of the problematic psychological aspects in the rescuer's performance.

Results. The necessity of development of the methods for evaluation of the professional training of the emergency rescue service personnel of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters has been substantiated.

Scientific novelty. For the first time the method of comprehensive evaluation of the indices of a rescuer's professional qualities has been proposed.

Practical value. Substantiation of parameters for the evaluation of the psychophysiological factors affecting the rescuers' chances of getting injured will make it possible to detect and to turn down such candidates at the stage of enrollment to the rescue services.

Keywords: *rescuer; professional suitability; injury rate; emergency rescue operations; fatality; human factor; psychophysiological aspects.*

УДК 621.311.1.019.3

*Александр Петрович Ковалев, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: AbrecAP@mail.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-46*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ СЛОЖНОЙ ПО СТРУКТУРЕ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ДВУХ ВИДОВ НЕСОВМЕСТИМЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Цель. Совершенствование инженерного метода расчета надежности восстанавливаемых структурно-сложных систем электроснабжения, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Методы. Для получения инженерных формул в статье использовалась теория марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

Результаты. Для сложной по структуре восстанавливаемой системы электроснабжения определены основные характеристики надежности ее узлов нагрузки, что позволяет выбирать оптимальную схему сети.

Научная новизна. Получены формулы, использование которых позволило оценить надежность электроснабжения узлов нагрузки для случая, когда элементы схемы замещения сети могут находиться в трех несовместных состояниях.

Практическая значимость. Получен новый инженерный метод оценки надежности электроснабжения узлов нагрузки с учетом восстановления элементов и двух видов несовместных отказов электрооборудования: отказа типа «обрыв цепи» и отказа типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании системы защиты), что позволяет учитывать влияние организационных и технических мероприятий на обеспечение надежности узлов нагрузки.

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

Постановка проблемы. При оценке надежности сложных по структуре восстанавливаемых схем систем электроснабжения современные методы расчетов не учитывают отказы в срабатывании системы защиты коммутационных аппаратов, то есть отказы типа «короткое замыкание», а это, в свою очередь, влияет на точность результатов расчетов. Не учитываются случаи возгорания изоляции электрооборудования из-за появления коротких замыканий (КЗ) в элементе сети и отказ в срабатывании защитного коммутационного аппарата, ближайшего к месту повреждения, через который прошел сквозной аварийный ток. Поэтому задача по разработке и уточнению инженерных методов расчетов надежности восстанавливаемых в процессе эксплуатации сетей с учетом двух несовместных видов отказов «обрыв цепи» и «короткое замыкание» – актуальна.

Анализ последних публикаций. Впервые теория импульсных случайных потоков была использована для оценки надежности восстанавливаемых в процессе эксплуатации судовых электроэнергетических систем (далее – СЭС) [2].

Используя результаты работ [1, 2], в энергетике был предложен ряд методов расчета надежности восстанавливаемых СЭС, элементы которых в процессе эксплуатации случайно выходили из строя (отказ «обрыв цепи»), затем обнаруживалось их поврежденное состояние, они восстанавливались (заменялись новыми) за случайный интервал времени [1 – 8].

Предположим, что каждый элемент схемы замещения СЭС может отказывать независимо друг от друга. Каждый элемент схемы замещения СЭС может находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособных – отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание». Поток отказов и восстановлений элементов простейшие; пропускная способность элементов не ограничена, и после выхода из строя элемента СЭС он обнаруживается и восстанавливается (заменяется новым) за конечный интервал времени. Предполагается, что после обнаружения и восстановления вышедшего из строя элемента СЭС его характеристики надёжности остаются такими же, какими они были до его повреждения.

Для схемы замещения СЭС, которая состоит из i ($i = 1, n$) логически последовательно соединенных элементов, отказ – «обрыв цепи» любого из них приводит к разрыву связи между входным и выходным ее узлами.

Если известны интенсивности отказов λ_{oi} и восстановлений μ_{oi} элементов схемы замещения такой СЭС, то эквивалентные интенсивности ее отказов λ_{ov} и восстановлений μ_{ov} (v – номер эквивалентного элемента) находят с помощью аналогичных формул, приведенных в работе [7]

$$\lambda_{ov} = \sum_{i=1}^n \lambda_{oi}; \quad (1)$$

$$\mu_{ov} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{oi}}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{oi}}{\mu_{oi}}}. \quad (2)$$

Для простой схемы замещения СЭС, которая состоит из j ($j = \overline{1, m}$) логически параллельно соединенных элементов, отказ типа «обрыв цепи» каждого из них приводит к разрыву связи между входным и выходным узлами.

Если заданы интенсивность отказов λ_{oj} и восстановлений μ_{oj} элементов схемы замещения СЭС, то эквивалентные им интенсивности отказов λ_{or} и восстановлений μ_{or} (r – номер эквивалентного элемента) определим, используя формулу из работы [7]

$$\lambda_{or} = \frac{\prod_{j=1}^m \lambda_{oj} \left(\sum_{j=1}^m \mu_{oj} \right)}{\prod_{j=1}^m \mu_{oj}}; \quad (3)$$

$$\mu_{or} = \sum_{j=1}^m \mu_{oj} . \quad (4)$$

Формулы (1) – (4) справедливы только при выполнении условия

$$\lambda_{oi} \leq 0,01 \cdot \mu_{oi} . \quad (5)$$

Индекс «о» указывает на то, что повреждения элементов сети приводят к отказам электрооборудования типа «обрыв цепи».

Сложную по структуре схему замещения СЭС, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособных – отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание», приводят к схеме «минимальных сечений», состоящей из параллельно-последовательного соединения элементов [7]. Используя формулы (1) – (5) и полученную схему замещения «минимальных сечений» СЭС, находим эквивалентную интенсивность ее отказов λ_o и интенсивность восстановлений μ_o .

Цель исследования. Разработать новый простой в использовании метод оценки надежности восстанавливаемых в процессе эксплуатации элементов систем электроснабжения с учетом двух несовместных типов отказов электрооборудования: отказа «обрыв цепи» и отказа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании средств защиты).

Основной материал исследования. Предполагаемый метод расчета показателей надежности восстанавливаемых в процессе эксплуатации СЭС отличается от существующих тем, что кроме отказов ее элементов типа «обрыв цепи» учитывается и другой несовместный вид – отказ типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании средств защиты).

Под восстанавливаемой системой электроснабжения потребителей электрической энергии будем понимать совокупность взаимосвязанных конструктивно независимых изделий, которые с течением времени могут находиться в трех несовместных состояниях и обладают свойством перестраивать структуру сети в результате случайного повреждения некоторых ее элементов, их обнаружения, восстановления (замены) без нарушения (частичного нарушения) выполнения поставленной задачи.

Под простой по структуре схемой замещения СЭС будем понимать такую, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, причем они соединяются между собой в последовательные, параллельные, последовательно-параллельные или параллельно-последовательные цепи.

Под сложной по структуре схемой замещения СЭС, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, будем понимать такую, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, соединенных в виде логической «звезды» или «треугольника».

Аналогом элемента с тремя несовместными состояниями: работоспособным, неработоспособными – отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании средств защиты), в СЭС может быть рассмотрен защитный коммутационный аппарат.

Например, если при КЗ в элементе СЭС, который находится в зоне действия токовой защиты (реле защиты (далее – РЗ)) i -го защитного коммутационного аппарата, происходит его отключение от источника электроснабжения, то такое повреждение в сети будем относить к отказам «обрыв цепи».

Ложное, излишнее срабатывание РЗ, а также ошибки обслуживающего и эксплуатирующего персонала, при которых отключается i -й защитный коммутационный аппарат, что происходит автоматически или с помощью человека, также следует относить к отказам «обрыв цепи».

К отказам «короткое замыкание» будем относить такие повреждения (КЗ в элементе сети), при которых через защитный коммутационный аппарат, ближайший к месту КЗ, проходит сквозной аварийный ток, а система его защиты не срабатывает.

Под узлом схемы замещения СЭС понимают физические пункты, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, то есть это обычно сборные шины или секции распределительных пунктов [4].

Используя принципиальную схему системы электроснабжения, составляют схему замещения для оценки надежности потребителей, которые получают энергию от рассматриваемого узла нагрузки.

Все независимые источники СЭС объединяют в один узел, который считают «абсолютно» надежным. Это вход для схемы замещения системы. Все повреждения в схеме СЭС выше выбранного входного узла в расчетах надежности не учитывают.

Выходной узел схемы замещения СЭС – это сборные шины, от которых получают электроэнергию потребители.

Если отказ i -го элемента (отказ типа «обрыв цепи») не влияет на работоспособность граничных ему узлов, то расчетная схема замещения СЭС совпадает с электрической [5].

Предположим, что элементы, из которых состоит схема замещения СЭС, могут отказывать независимо друг от друга, причем каждый элемент схемы замещения СЭС может находиться в двух несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании системы защиты). Потоки отказов и восстановлений элементов, подверженных отказам типа «короткое замыкание», простейшие. После выхода из строя элемент СЭС обнаруживают и восстанавливают (заменяют новым) за конечный интервал времени. Следовательно, после обнаружения и восстановления вышедшего из строя элемента СЭС его характеристики надежности остаются такими же, какими они были до повреждения.

В случае, если у каждого из i логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ типа «короткое замыкание», это событие приведет к тому, что между входным и выходным узлами расчетной схемы замещения СЭС пройдет неотключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток, который будет существовать до тех пор, пока не отгорят силовые проводники в месте появления КЗ.

Если задана интенсивность отказов и восстановлений элементов схемы замещения СЭС, то есть λ_{si} и μ_{si} , эквивалентную ей интенсивность отказов λ_{sv} и восстановлений μ_{sv} (v – номер эквивалентного элемента) определим с помощью формул

$$\lambda_{sv} = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_{si} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \mu_{si} \right)}{\prod_{i=1}^n \mu_{si}}; \quad (6)$$

$$\mu_{sv} = \sum_{i=1}^n \mu_{si}. \quad (7)$$

Если в схеме замещения системы, которая состоит из m логически параллельно соединенных элементов, произойдет отказ типа «короткое замыкание», то это событие приведет к тому, что между входным и выходным узлами расчетной схемы замещения пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ. Время существования КЗ будет зависеть от времени перегорания силовых проводников в месте его появления.

Если заданы λ_{sj} и μ_{sj} элементов схемы замещения СЭС, то интенсивность отказов λ_{sr} и восстановлений μ_{sr} эквивалентного ей элемента под номером r определим с помощью формул

$$\lambda_{sr} = \sum_{j=1}^m \lambda_{sj}; \quad (8)$$

$$\mu_{sr} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_{sj}}{\sum_{j=1}^m \frac{\lambda_{sj}}{\mu_{sj}}}. \quad (9)$$

Формулы (6) – (9) справедливы при выполнении условия

$$\lambda_{si} \leq 0,01 \cdot \mu_{si}. \quad (10)$$

Индекс «s» указывает на то, что учитываются повреждения элементов сети, которые приводят к отказам в срабатывании системы защиты элемента СЭС.

Сложную по структуре схему замещения СЭС, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособное и неработоспособные – отказ типа «короткое замыкание» и отказ типа «обрыв цепи» (отказ в срабатывании средств защиты), приводят к схеме «минимальных сечений», которая состоит из последовательно-параллельного соединения элементов [10]. Используя формулы (6) – (10) и полученную расчетную схему замещения «минимальных сечений» СЭС, находят эквивалентные ей интенсивности отказов λ_s и интенсивности восстановлений μ_s .

Постановка задачи. Пусть задана сложная по структуре схема замещения системы электроснабжения потребителей электроэнергией.

Предположим, что каждый элемент схемы замещения СЭС характеризуется четырьмя параметрами надежности: λ_{oj} – интенсивность появления отказов типа «обрыв цепи» в i -м элементе схемы замещения СЭС; μ_{oj} – интенсивность обнаружения поврежденного элемента, его восстановление и включение i -го защитного коммутационного аппарата в работу; λ_{sj} – интенсивность появления отказов типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании системы защиты) в i -м элементе схемы замещения СЭС; μ_{sj} – интенсивность выявления и ликвидация повреждений в системе автоматического отключения i -го защитного коммутационного аппарата.

Определить: $P(t)$ – вероятность того, что в течение времени t не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ между входным и выходным узлами расчетной схемы замещения при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

$q_o(t)$ – вероятность того, что в течение времени t произойдет разрыв связи между входным и выходным узлами расчетной схемы замещения СЭС при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

$q_s(t)$ – вероятность того, что в течение времени t пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ между входным и выходным узлами схемы замещения СЭС, если в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

$q(t)$ – вероятность того, что в течение времени t произойдет разрыв связи или пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ между входным и выходным узлами схемы замещения СЭС, если в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

$A(\infty)$ – доля времени, в течение которого узел нагрузки СЭС будет бесперебойно получать электроэнергию (коэффициент готовности).

Решение поставленной задачи.

Схему замещения восстанавливаемой СЭС следует представить в виде двух расчетных схем «минимальных сечений». В первой расчетной схеме «минимальных сечений» учитываются повреждения элементов – отказ типа «обрыв цепи», что приводит к разрыву связи между входным и выходным узлами схемы замещения.

Во второй схеме «минимальных сечений» учитываются повреждения элементов – отказ типа «короткое замыкание», что приводит к тому, что между входным и выходным узлами схемы замещения системы пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ.

Если известны: λ_{oi} , μ_{oi} , λ_{si} , μ_{si} ($i, j = \overline{1, n}$, где n – число элементов в схеме замещения системы), тогда, используя формулы (1) – (10), находим следующие величины:

λ_o – эквивалентная интенсивность того, что в сети произойдет событие, в результате которого будет прервана связь между входным и выходным узлами схемы замещения СЭС;

μ_o – эквивалентная интенсивность обнаружения поврежденного элемента СЭС (отказ типа «обрыв цепи»), его восстановление и возобновление электроснабжения потребителей;

λ_s – эквивалентная интенсивность того, что в СЭС произойдет событие, в результате которого между входным и выходным узлами схемы ее замещения пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ;

μ_s – эквивалентная интенсивность обнаружения и восстановления поврежденных элементов в автоматической системе отключения защитных коммутационных аппаратов.

Под вероятностью безотказной работы $P(t)$ восстанавливаемой СЭС, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях (работоспособное, неработоспособное – отказ типа «обрыв цепи», неработоспособное – отказ типа «короткое замыкание»), будем понимать меру надежности, которая характеризуется вероятностью того, что в течение заданного интервала времени не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ между входным и выходным узлами расчетной схемы замещения при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии. Вероятность $P(t)$ возможно оценить с помощью формулы (11).

$$P(t) = \frac{\mu_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\frac{(s_1 + \mu_o)(s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{(s_2 + \mu_o)(s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right], \quad (11)$$

где

$$s_1 = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + \left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2} \right\};$$

$$s_2 = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) - \left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2} \right\}.$$

Вероятность $q_o(t)$ находят с помощью формулы

$$q_o(t) = \frac{\lambda_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\frac{\lambda_o (s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_o (s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right]. \quad (12)$$

Вероятность $q_s(t)$ определяют следующим образом:

$$q_s(t) = \frac{\lambda_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{s_1 - s_2} \left[\frac{\lambda_s (s_1 + \mu_o)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_s (s_2 + \mu_o)}{s_2} e^{s_2 t} \right]. \quad (13)$$

Вероятность $q(t)$ находим из выражения

$$q(t) = q_o(t) + q_s(t). \quad (14)$$

Коэффициент готовности $A(\infty)$ находим с помощью формулы

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \frac{\mu_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o}. \quad (15)$$

Используя формулы (11) – (15), представляется возможность оценить надежность электроснабжения узлов нагрузки рассматриваемой СЭС с течением времени t .

Пример. Задана схема замещения СЭС (рис. 1).

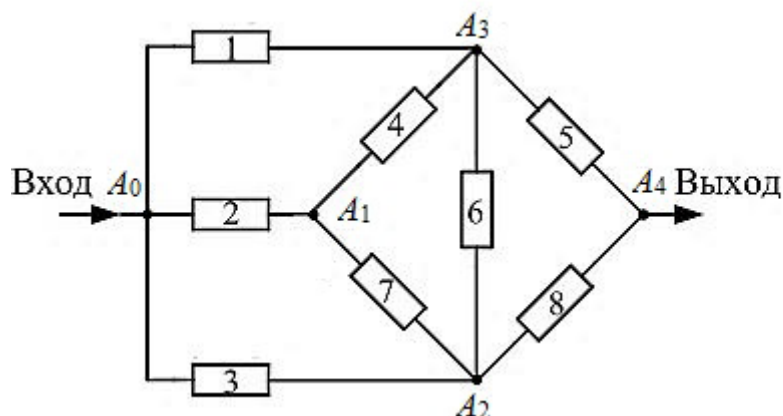


Рис. 1. Схема замещения СЭС для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки A_4

В таблице приведены исходные данные надежности элементов схемы замещения СЭС.

Таблица

Параметры надежности: λ_{oi} , μ_{oi} , λ_{si} , μ_{si} элементов схемы замещения СЭС

i	λ_{oi} , ч ⁻¹	μ_{oi} , ч ⁻¹	λ_{si} , ч ⁻¹	μ_{si} , ч ⁻¹
1	0,0000856	0,56	0,0000380	0,48
2	0,0000476	0,43	0,0000285	0,56
3	0,0000571	0,91	0,0000285	0,43
4	0,0000666	0,45	0,0000285	0,40
5	0,0000950	0,38	0,0000380	0,32
6	0,0000761	0,59	0,0000476	0,45
7	0,0001	0,67	0,0000571	0,59
8	0,0000476	0,88	0,0000381	0,67

Определить вероятность $P(t)$ того, что в течение времени t не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или пройдет сквозной неотключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ между входным (A_0) и выходным (A_4) узлами схемы замещения при условии, что в начальный момент времени все элементы СЭС находились в работоспособном состоянии, а также: $q_o(t)$, $q_s(t)$, $q(t)$ при $t = 1$ ч и $A(\infty)$.

Используя методику составления расчетных схем замещения «минимальных сечений» СЭС [10], схему замещения (см. рис. 1) представим в виде двух простых (рис. 2).

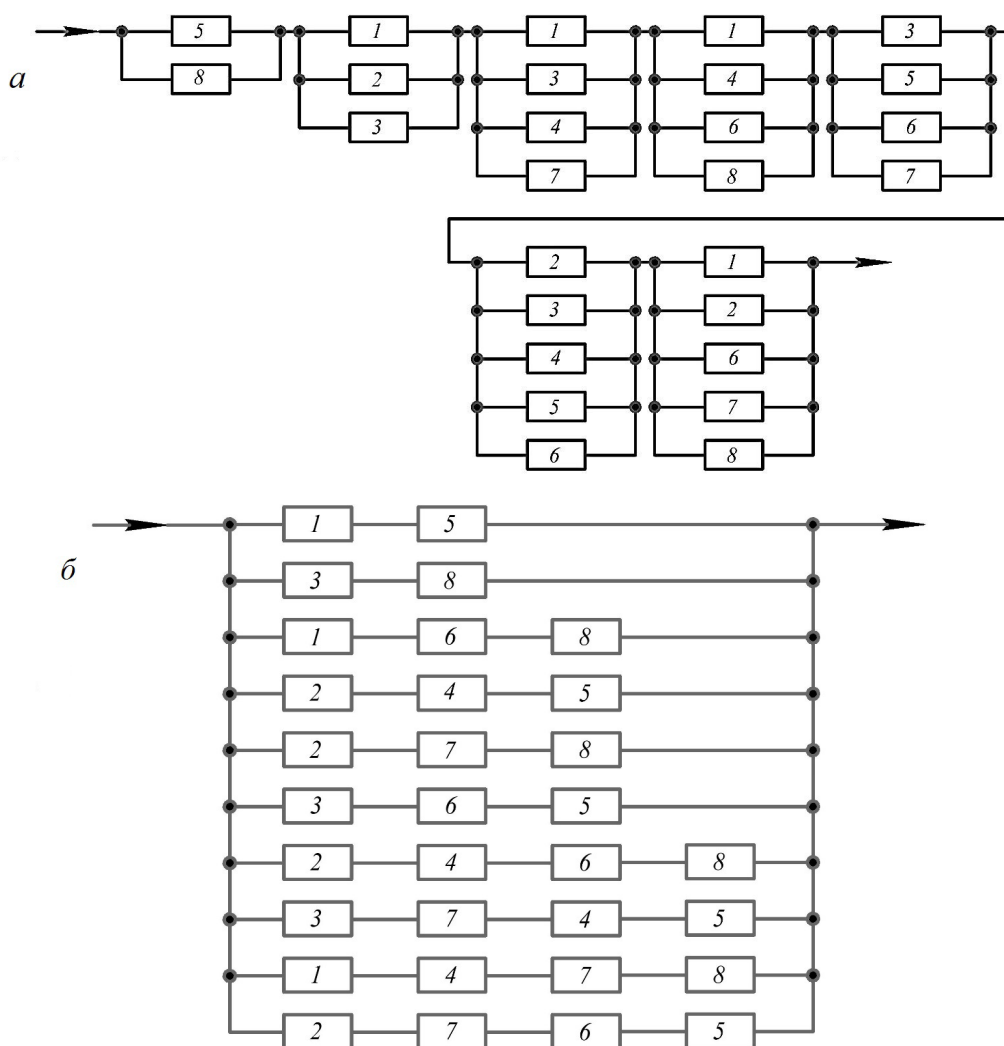


Рис. 2. Расчетные схемы замещения («минимальных сечений») СЭС для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки A_4 :
 а – учитываются отказы элементов схемы замещения СЭС типа «обрыв цепи»;
 б – учитываются отказы элементов схемы замещения СЭС типа «короткое замыкание» (отказ в срабатывании системы защиты)

Используя расчетную схему замещения СЭС (см. рис. 2а), формулы (1) – (5), исходные данные примера (таблица, столбцы 2 и 3), находим: $\lambda_o = 1,73 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ и $\mu_o = 1,22 \text{ ч}^{-1}$.

Используя расчетную схему замещения СЭС (рис. 2б), формулы (6) – (10), исходные данные примера (таблица, столбцы 4 и 5), находим: $\lambda_s = 1,16 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ и $\mu_s = 0,905 \text{ ч}^{-1}$.

Полученные значения $\lambda_o = 1,73 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_o = 1,22 \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_s = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_s = 0,885 \text{ ч}^{-1}$ и формулы (11) – (15) позволили определить: $P(1) = 0,999999981$, $q_o(1) = 1,0 \cdot 10^{-8}$, $q_s(1) = 0,9 \cdot 10^{-8}$, $q(1) = 1,9 \cdot 10^{-8}$ и $A(\infty) = 0,999999972$.

Вывод. Разработан новый, простой в использовании метод оценки надежности структурно-сложных восстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях. Метод отличается от известных тем, что кроме отказов элемента СЭС типа «обрыв цепи»

учитывается и другой несовместный вид отказов средств защиты – отказ типа «короткое замыкание», что в значительной мере влияет на точность расчетов.

Список литературы / References

1. Grigsby L. *Power systems. Electric Power Engineering Handbook: second edition.* – CRC Press, 2007.

2. Рябинин, И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – Л.: Судостроение, 1971. – 456 с.

Ryabinin I.A. *Osnovy teorii i raschyota nadyozhnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem* [The principals of theory and calculation of reliability of shipboard electric energy systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1971, 456 p. (In Russian).

3. Обоскалов, В.П. Расчёт показателей структурной надёжности энергосистем / В.П. Обоскалов. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1989. – 92 с.

Oboskalov V.P. *Raschyot pokazatelei strukturnoi nadyozhnosti energosistem* [Calculation of structural reliability indices of electric energy systems]. Sverdlovsk, Izd-vo UPI Publ., 1989, 92 p. (In Russian).

4. Руденко, Ю.Н. Надёжность систем энергетики / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние РАН, 1989. – 328 с.

Rudenko Yu.N., Ushakov I.A. *Nadyozhnost' sistem energetiki* [Reliability of electric energy systems]. Novosibirsk, Sib. otd-nie RAN Publ., 1989, 328 p. (In Russian).

5. Фокин, Ю.А. Методы расчёта показателей надёжности сложных электроэнергетических систем, основанные на структурно-функциональных характеристиках / Ю.А. Фокин, Я.Н. Осипов // *Электричество.* – 2010. – № 5. – С. 7 – 13.

Fokin Yu.A., Osipov Ya.N. *Metody raschyota pokazatelei nadyozhnosti slozhnykh elektroenergeticheskikh sistem, osnovannye na strukturno-funktsional'nykh kharakteristikakh* [Methods of calculations of reliability indices of complex electric energy systems based on structural and functional characteristics]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2010, no. 5, pp. 7-13. (In Russian).

6. Фокин, Ю.А. Исследование динамической надёжности коммутационной аппаратуры в сложных электроэнергетических системах / Ю.А. Фокин, А.Е. Туманин, Ю.А. Дементьев // *Надёжность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы.* – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние РАН, 1998.

Fokin Yu.A., Tumanin A.E., Dement'ev Yu.A. *Issledovanie dinamicheskoi nadyozhnosti kommutatsionnoi apparatury v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh* [Investigation of dynamic reliability of switchgear in the complex electric energy systems]. *Nadyozhnost' sistem energetiki: dostizheniya, problemy, perspektivy* [Reliability of electric energy systems: achievements, problems, prospects]. Novosibirsk, Nauka, Sib. otd-nie RAN Publ., 1998. (In Russian).

7. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надёжности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

Dillon B., Singkh Ch. *Inzhenernye metody obespecheniya nadyozhnosti sistem* [Engineering methods of ensuring the reliability of systems]. Moscow, Mir Publ., 1984, 318 p. (In Russian).

8. Эндрени, Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах / Дж. Эндрени; пер. с англ.; под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

Endreni Dzh. *Modelirovanie pri raschyotakh nadyozhnosti v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Modeling in calculations of reliability in the electric energy systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1983, 336 p. (In Russian).

9. Ковалев, А.П. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. – 1985. – № 10. – С. 52–53.

Kovalyov A.P., Serdyuk L.I. *Metod raschyota nadyozhnosti slozhnykh skhem sistem elektrosnabzheniya s uchyotom vosstanovleniya* [Method of calculation of reliability of the complex electric energy systems with the allowance for repair]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1985, no. 10, pp. 52-53. (In Russian).

10. Ковалев, А.П. О расчете надежности невосстанавливаемых структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях / А.П. Ковалев, И.И. Москвина, А.А. Павлович // Промышленная энергетика. – 2018. – № 12. – С. 9 – 15.

Kovalyov A.P., Moskvina I.I., Pavlovich A.A. *O raschyote nadyozhnosti nevosstanavlivaemykh strukturno-slozhnykh sistem, elementy kotorykh mogut nakhodit'sya v tryokh nesovmetnykh sostoyaniyakh* [On calculations of reliability of non-recoverable structurally complex systems elements of which may exist in three exclusive/incompatible states]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2018, no. 12, pp. 9-15. (In Russian).

11. Ковалев, А.П. О надежности защитных коммутационных аппаратов, которые эксплуатируются в системах электроснабжения 10 – 0,4 кВ промышленных предприятий / А.П. Ковалев, И.И. Москвина, А.А. Сорочка // Промышленная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 32 – 37.

Kovalyov A.P., Moskvina I.I., Sorochka A.A. *O nadyozhnosti zashhitnykh apparatov, kotorye ekspluatiruyutsya v sistemakh elektrosnabzheniya 10-0,4 kV promyshlennykh predpriyatii* [On reliability of protective apparatuses installed in systems of 10-0.4 kV electric power supply systems of industrial enterprises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2019, no. 3, pp. 32-37. (In Russian).

*Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: AbrecAP@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-46*

ESTIMATION OF RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SUPPLY OF LOAD NODES OF STRUCTURALLY COMPLEX RECOVERABLE SYSTEM FACTORING IN TWO TYPES OF INCOMPATIBLE ELECTRICAL EQUIPMENT FAILURES

Purpose. Improvement of an engineering method of calculating the reliability of structurally complex recoverable systems of electric power supply which elements may exist in two exclusive states.

Method. The theory of the Markovian random processes with the digital number of states and continuous time has been used in the article to obtain the engineering formulae.

Results. The main characteristics of the reliability of its load nodes have been determined for the structurally complex recoverable system of the electric power supply which allow selecting an optimal network map.

Scientific novelty. The formulae have been obtained that allows estimating the electric power supply reliability of the load nodes in case when the elements of the network equivalent circuit may exist in three incompatible states.

Practical value. The new engineering method for estimating the electric power supply reliability of the load nodes has been obtained factoring in the recovery of the elements and two types of the incompatible failures of electrical equipment: an “open-circuit” failure and a “short-circuit” failure (protection system discharge failure) which allows factoring in the influence of organizational and technical measures on ensuring the reliability of the load nodes.

Keywords: *structurally complex equivalent circuit; reliability; “open-circuit” failure; “short-circuit” failure; failure to operate.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [622.868:622.411.3]:[62-543.27.05]-519

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, первый заместитель директора (по научной работе); e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;
Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34

СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРОВ В ШАХТАХ

Цель. Анализ результатов исследований по разработке систем дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров в шахтах.

Методы. Использованы аналитический метод исследования, включающий анализ и обработку специальных литературных источников, научной и технической литературы, и метод компьютерного моделирования принципиальных пневматических схем в программе FluidSIM-5.

Результаты. Представлены перспективные направления по созданию новых систем дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и ведении горноспасательных работ в угольных шахтах.

Научная новизна. Предложены принципиальная пневматическая схема и рабочий комплект системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха с вакуумным насосом на съемных аккумуляторах в качестве побудителя расхода. Работоспособность предложенной системы мониторинга шахтной среды дистанционным способом подтверждена путем моделирования ее работы в программе FluidSIM-5.

Практическая значимость. Результаты проведенного исследования служат основой для разработки технических заданий, конструкторской документации и опытных образцов систем дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров в угольных шахтах подразделениями горноспасательной службы.

Ключевые слова: угольная шахта; горноспасательная служба; аварийный участок; подземный пожар; ведение аварийно-спасательных работ; дистанционный контроль газовой обстановки; пробы шахтного воздуха; дистанционный отбор и газовый анализ.

Постановка проблемы. Интенсивная и слаженная работа угольной отрасли – одно из приоритетных направлений социального и экономического развития многих горнодобывающих стран и государств мира [1]. Однако значительное препятствие на пути к достижению высоких показателей добычи угля представляют собой подземные пожары, при ликвидации которых возникают условия, опасные для жизни и здоровья горноспасателей [2].

Особо опасны пожары в газообильных угольных шахтах, так как их ликвидация постоянно сопряжена с вероятностью взрыва газозадушенной смеси. Поэтому с целью обеспечения безопасности горноспасателей применяют дистанционный контроль газовой обстановки путем отбора проб шахтного

воздуха по заранее проложенному трубопроводу с последующим их анализом в специализированной газоаналитической лаборатории, в том числе аварийной, или непосредственно в шахте с помощью специальных газоаналитических приборов во взрывобезопасном исполнении.

Помимо активного тушения подземных пожаров дистанционный отбор и газовый анализ проб шахтного воздуха в большинстве случаев применяют при ликвидации пожаров пассивным способом, предполагающим изоляцию аварийного участка, а также комбинированным, при котором после изоляции аварийный участок заполняют инертными газами.

Основные данные, по которым можно судить о состоянии пожара (степени его развития или затухания), вероятности взрыва газовой смеси, оценке эффективности принятых мер по инертзации аварийного участка, – результаты анализа проб шахтного воздуха путем определения концентраций оксида и диоксида углерода (CO и CO_2), метана (CH_4), кислорода (O_2), водорода (H_2), а при необходимости – других газов.

Однако используемое в настоящее время подразделениями горноспасательной службы оборудование для дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров в угольных шахтах имеет ряд существенных недостатков, приведенных в работе [3]. Эти недостатки проявляются в невысокой достоверности отбираемых проб шахтного воздуха, так как в практике ликвидации пожаров и других аварий имеют место случаи взрывов газовой смеси, в то время как по результатам газового анализа дистанционно отобранных проб смесь была невзрывчатой или, наоборот, по результатам дистанционного контроля газовой обстановки аварийного участка наблюдалась взрывоопасная ситуация, а взрывов не было.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработке технических средств дистанционного контроля газовой обстановки при ведении аварийно-спасательных работ в шахте посвящены научные труды ведущих ученых и инженеров: С.П. Грекова, И.Н. Зинченко, В.И. Ковальчука, А.Л. Романчука, В.С. Сергеева, Б.А. Сурначева, А.П. Федоровича, D. Adler, F. Burns, D. Chapman, B. Cierpiela, C. Fauconnier, Z. Fink, T. Golisz, A. Kukuczka, W. Marchewka, D. Mitchell, R. Morris, R. Zipf. В 2020 г. НИИГД «Респиратор» разработана усовершенствованная система дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ, которая позволяет осуществлять достоверный контроль газовой обстановки в изолированных и неизолированных аварийных участках угольных шахт.

Цель настоящей статьи – анализ результатов проведенных исследований по разработке усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха (далее – УСДОП), а также разработка перспективных направлений по созданию новых систем дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и ведении аварийно-спасательных работ в угольных шахтах.

Материалы и результаты исследований. С целью повышения достоверности мониторинга шахтной среды дистанционным способом при

ведении горноспасательных работ была разработана, изготовлена, испытана и поставлена на подконтрольную эксплуатацию в подразделение МЧС ДНР УСДОП (см. рис. 1) с питанием от шахтной пневмосети или от баллона со сжатым воздухом, которая позволяет осуществлять отбор проб шахтного воздуха по сечению горной выработки аварийного участка, имеет в комплекте фильтрующие элементы, значительно снижающие содержание влаги в пробоотборном трубопроводе, а также осушающие откачиваемый шахтный воздух перед его попаданием в емкость для отбора проб или непосредственно в газоаналитический прибор в рудничном взрывобезопасном исполнении, предназначенный для экспресс-анализа проб воздуха в шахте.

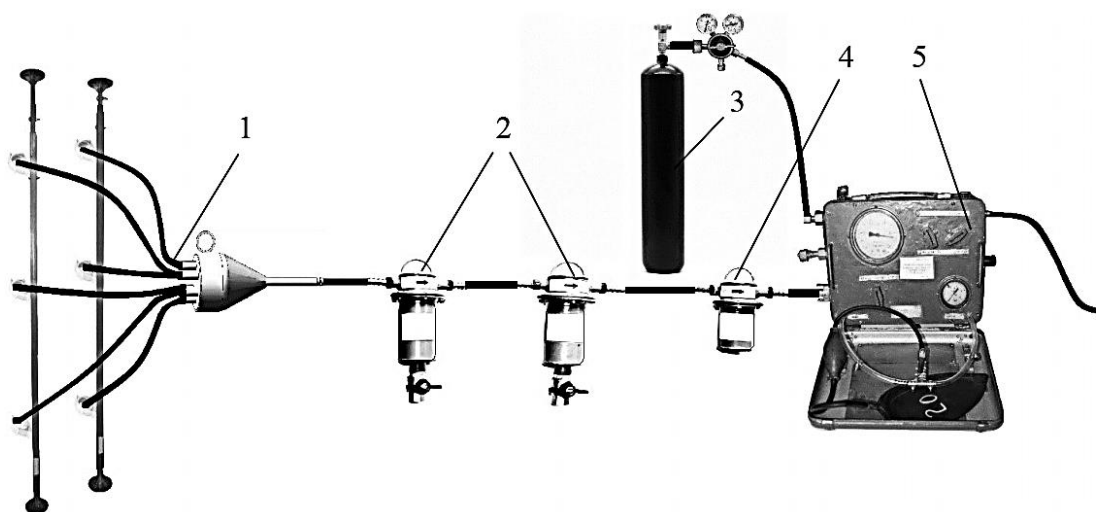


Рис. 1. Рабочий комплект УСДОП (в упрощенном виде):

1 – многоточечный пробоотборник; 2 – фильтры-влажнотделители; 3 – баллон (с редуктором) со сжатым воздухом; 4 – фильтр-осушитель; 5 – установка эжекторная УЭ-1М с приспособлением для отбора проб шахтного воздуха в камеру и отводным шлангом

Комплект составных и запасных частей УСДОП, ее технические характеристики (по результатам проведения предварительных и приемочных испытаний) и конструктивные особенности представлены в работе [4]. Основная особенность разработанного изделия – наличие многоточечного пробоотборника, предназначенного для отбора проб шахтного воздуха из шести точек, расположенных по высоте и сечению горной выработки. Состоит данное приспособление из коллектора с шестью выходами (штуцерами) для трубок из непластифицированного поливинилхлорида длиной 3 м с наружным номинальным диаметром 16 мм и одним выходом (штуцером) на общую магистраль пробоотборного трубопровода. Оно также включает две стойки, телескопический распор (рабочая высота раздвижки) которых составляет 1,50...3,58 м, соединительные элементы (хомуты), крепежные элементы (винты, гайки, шайбы) и держатели с защелками для трубок. С целью надежного крепления трубок на стойках с держателями используют кабельные нейлоновые

стяжки. При необходимости могут быть изготовлены телескопические стойки других типоразмеров.

Многоточечный пробоотборник монтируют следующим образом: коллектор прикрепляют к элементам крепи горной выработки (как правило, к хомуту) мягкой проволокой, к коллектору присоединяют трубки с помощью соединительных элементов (хомутов) и фиксируют в держателях для трубок на стойках. Для более надежной фиксации используют кабельные нейлоновые стяжки. Две стойки с держателями для трубок устанавливают путем телескопического распора между кровлей и почвой горной выработки, используя крепежные материалы (болты, гайки, шайбы) и ключ для вращения нижнего длинноходового винта. Приспособление надежно монтируют в горной выработке независимо от вида крепи, угла наклона выработки, ее состояния и прочих факторов. При этом каждая телескопическая стойка имеет нижний длинноходовой винт для надежной фиксации.

Поскольку в качестве побудителя расхода в УСДОП использована эжекторная установка УЭ-1М, позволяющая осуществлять продувку пробоотборного трубопровода общей длиной 1000 м за 15 мин, время работы побудителя расхода (τ , мин) рассчитали при использовании фильтров-влагоотделителей (основного и дополнительного), а также фильтра-осушителя по формуле

$$\tau = \frac{V}{KQ}, \quad (1)$$

где V – суммарный полезный объем фильтров-влагоотделителей (основного и дополнительного) и фильтра-осушителя, г;

K – максимальное содержание влаги в единице объема воздуха ($K = 9,4 \cdot 10^{-3}$ г/л);

Q – расход отбираемой пробы шахтного воздуха, л/мин.

Расчетами установлено, что эжекторная установка УЭ-1М может работать в самых неблагоприятных условиях дистанционного отбора проб шахтного воздуха с расходом по трубопроводу 10 л/мин в течение 127255 мин (2121 ч, или 88 сут).

Годовой экономический эффект от внедрения УСДОП рассчитывают согласно работе [5] по формуле

$$\Delta = \left[(C_1 + E_n K_1) B_2 / B_1 \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} + \frac{(U_1 - U_2) - E_n (K_2' - K_1')}{P_2 + E_n} - (C_2 + E_n K_2) A_2 \right], \quad (2)$$

где C_1, C_2 – себестоимость единицы продукции, выпускаемой в базовом и новом вариантах соответственно, руб.;

K_1, K_2 – удельные капитальные вложения, необходимые для изготовления единицы выпускаемой продукции, руб.;

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности, равный 0,15;

- B_2/B_1 – коэффициент учета изменения производительности нового средства по сравнению с базовым;
- $(P_1 + E_n) / (P_2 + E_n)$ – коэффициент учета изменения срока службы нового средства защиты по сравнению с базовым;
- P_1, P_2 – доля отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базового и нового вариантов средств защиты, соответственно, рассчитывается как величина, обратная сроку службы средств;
- U_1, U_2 – годовые эксплуатационные расходы потребителя при использовании единицы средств в расчете на объем работ, выполненные с помощью нового средства;
- K_1', K_2' – сопутствующие капитальные вложения потребителя, необходимые для обеспечения нормальной работы единицы базового и нового вариантов средств (без стоимости самого средства), в расчете на объем работ, выполненных с помощью единицы нового средства, руб.;
- A_2 – годовой объем выпуска в расчетном году новых средств в натуральных единицах.

Максимальная себестоимость единицы продукции, выпускаемой по базовому варианту – 3,5 тыс. руб., а по новому варианту (УСДОП) – 7 тыс. руб. (цена изделия определена на стадии изготовления опытного образца). Исходя из выпуска нового средства для четырех подразделений горноспасательной службы МЧС ДНР и 14 подразделений МЧС России из расчета по три изделия УСДОП в первый расчетный год – 54 ед., годовой экономический эффект составил 378 тыс. руб.

Газовый анализ проб шахтного воздуха, отбираемых в сосуды (бюретки) или камеры, осуществляют в лабораториях с использованием газоанализаторов типа «Сигма», объемно-оптических газоанализаторов «ООГ-2», газовых хроматографов «Хроматэк-Кристалл 5000» и других лабораторных приборов.

С целью значительного сокращения времени газовый анализ проб шахтного воздуха экспресс-методом возможно проводить непосредственно в шахте с использованием интерферометров шахтных типа ШИ, хроматографов портативных горноспасательных ПОИСК-2, многоканальных газоанализаторов Dräger X-am 8000 (со специальным адаптером и шлангом), газоанализаторов МХ-2100 и М-02 (со специальными насадками со штуцерами) и других газоаналитических приборов в рудничном взрывобезопасном исполнении.

После газового анализа отобранных проб шахтного воздуха с целью оперативного расчета треугольника взрываемости смеси горючих газов рекомендуют использовать программные системы и комплексы: РЕВОД («Расчет естественного воздухораспределения и обработка депрессионной съемки»), «Вентиляция шахт». Также можно использовать УАСПР («Программный

комплекс для решения на ПЭВМ задач по управлению аварийно-спасательными работами)), разработанный НИИГД «Респиратор» в 2019 г.

Отбор проб на непредельные углеводороды можно осуществлять приспособлением, которое состоит из Т-образного соединительного тройника, ручного насоса (резиновой груши) и трубок-концентраторов.

Согласно научно-техническому анализу перспективные направления дальнейших исследований и опытно-конструкторских работ в рамках настоящей тематики следующие:

- разработка систем дистанционного отбора проб шахтного воздуха с питанием от электросети (при использовании в качестве побудителя расхода высокопроизводительных вакуумных насосов, выпускаемых в настоящее время в рудничном взрывобезопасном исполнении) с целью сокращения времени на отбор проб шахтного воздуха дистанционным способом (см. рис. 2);

- исследование возможности дистанционного отбора проб шахтного воздуха с использованием в качестве побудителя расхода малогабаритного вакуумного насоса на съемных аккумуляторах, что позволит обеспечить автономный отбор проб шахтного воздуха дистанционным способом без подключения к электро- и пневмосети шахты, а также баллонов со сжатым воздухом (см. рис. 3);

- разработка новых вакуумных насосов ручного и ножного типа с целью оперативного дистанционного отбора проб шахтного воздуха по пробоотборному трубопроводу небольшой длины (например, из-за изолирующих сооружений);

- разработка и эффективное использование новых малогабаритных газоаналитических приборов (хроматографов) в рудничном взрывобезопасном исполнении с целью экспресс-анализа отобранных проб шахтного воздуха непосредственно в шахте (вблизи места установки побудителя расхода);

- исследование возможности разработки единой системы дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха;

- разработка системы мониторинга и контроля шахтной среды в аварийных участках, в том числе в изолированных пожарных, в режиме «on-line» с применением многофункциональных электронных датчиков с проводными и беспроводными средствами передачи данных на значительные расстояния за счет непрерывного измерения концентрации газов, контроля давления и температуры окружающей среды, записи и хранения в энергонезависимой памяти результатов измерения с привязкой по времени и передачи информации по каналам цифровой связи стационарных информационных систем.

При этом следует иметь в виду, что все составные части систем дистанционного контроля газовой обстановки, с целью удобства пользования горноспасателями, должны быть соединены быстроразъемными герметичными соединениями.

Достоверность функционирования системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха с вакуумным насосом в качестве побудителя расхода, согласно принципиальной пневматической схеме (рис. 2), была проверена и подтверждена путем моделирования ее работы в программе FluidSIM-5 [6].

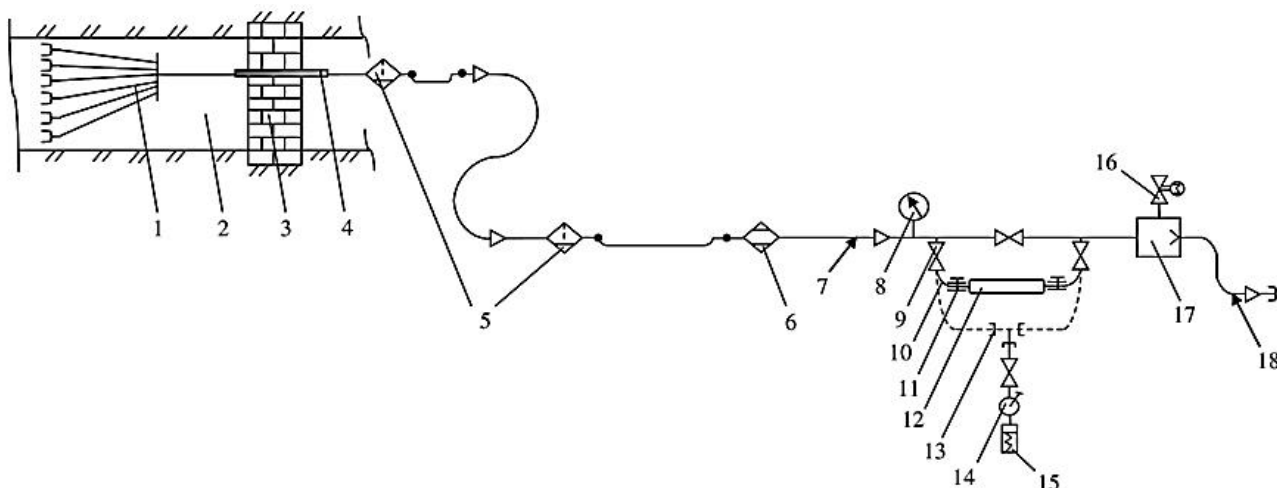


Рис. 2. Принципиальная пневматическая схема системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха с вакуумным насосом в качестве побудителя расхода (в упрощенном виде):

1 – многоточечный пробоотборник; 2 – изолированное пространство аварийного участка; 3 – изолирующее сооружение; 4 – труба, монтируемая в изолирующее сооружение при его возведении; 5 – фильтры-влагоотделители; 6 – фильтр-осушитель; 7 – пробоотборный трубопровод; 8 – вакуумметр; 9 – кран шаровой; 10 – соединительная трубка; 11 – зажим Мора; 12 – сосуд для отбора проб шахтного воздуха (бюретка); 13 – Т-образный соединительный тройник; 14 – груша резиновая от шахтного интерферометра типа ШИ (ручной насос); 15 – камера для отбора проб шахтного воздуха; 16 – электропривод; 17 – вакуумный насос; 18 – отводной трубопровод для сброса воздуха в окружающую среду

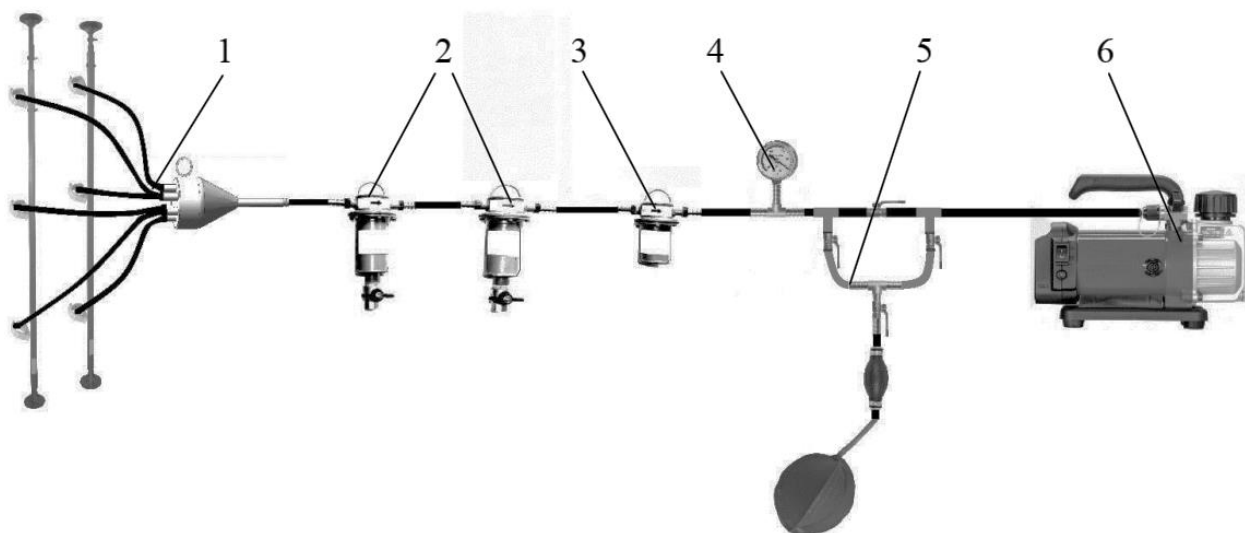


Рис. 3. Рабочий комплект системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха с вакуумным насосом на съемных аккумуляторах в качестве побудителя расхода:

1 – многоточечный пробоотборник; 2 – фильтры-влагоотделители; 3 – фильтр-осушитель; 4 – вакуумметр; 5 – приспособление для отбора проб шахтного воздуха в камеру; 6 – вакуумный насос (со съемным аккумулятором)

Выводы. В работе выполнен анализ результатов проведенных исследований по разработке УСДОП и представлены перспективные направления по созданию новых систем дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и ведении горноспасательных работ в угольных шахтах.

Разработка и использование нового оборудования позволят повысить достоверность контроля газовой обстановки аварийных участков дистанционным способом за короткий интервал времени, оперативно принимать рациональные решения по ликвидации аварий и их последствий, создать безопасные условия труда горноспасателей в шахтах, повысить уровень эффективности ведения аварийно-спасательных работ.

Список литературы / References

1. Плакиткина, Л.С. Анализ и перспективы развития угольной промышленности основных стран мира, бывшего СССР и России в период до 2030 г.: монография / Л. С. Плакиткина. – М.: Горная промышленность, 2013. – 416 с.

Plakitkina L.S. *Analiz i perspektivy razvitiya ugol'noi promyshlennosti osnovnykh stran mira, byvshego SSSR i Rossii v period do 2030 g.: monografiya* [Analysis and prospects of coal industry development in main countries of the world, the former USSR and Russia up to the year of 2030: monograph]. Moscow, Gornaya promyshlennost' Publ., 2013, 416 p. (In Russian).

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

Fedorenko Ye.I., Kobylkin S.S. *Problema podzemnykh pozharov i ikh tushenie na bol'shikh glubinakh v ugol'nykh shakhtakh* [Problem with the underground fires and extinguishing them at the deep depths in coal mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – Mining information and analytical bulletin: scientific-technical journal, 2011, no. 8, pp. 197-207. (In Russian).

3. Мамаев, В.В. Способы и технические средства дистанционного контроля шахтной среды при ведении аварийно-спасательных работ / В.В. Мамаев, Ал.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк, 2019. – № 3(4). – С. 109 – 119.

Mamayev V.V., Agarkov Al.V. *Sposoby i tekhnicheskie sredstva distantsionnogo kontrolya shakhtnoi sredy pri vedenii avariino-spasatel'nykh rabot* [Methods and technical means of the remote monitoring of mine environment during carrying-out the emergency rescue operations]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 3(4), pp. 109-119. (In Russian).

4. Система дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ / В.В. Мамаев, А.М. Симонов, Ал.В. Агарков, В.Г. Турчанин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 3(57). – С. 54 – 63.

Mamayev V.V., Simonov A.M., Agarkov Al.V., Turchanin V.G. *Sistema distantsionnogo otbora prob shakhtnogo vozdukha pri vedenii avariino-spasatel'nykh rabot* [System of remote collection of mine air samples during carrying-out of the emergency rescue operations]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 3(57), pp. 54-63. (In Russian).

5. Агарков, Ал.В. Оценка эффективности внедрения усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха в подразделениях горноспасательной службы / Ал.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк, 2021. – № 4(8). – С. 14 – 22.

Agarkov Al.V. *Otsenka effektivnosti vnedreniya usovershenstvovannoi sistemy distantsionnogo otbora prob shakhtnogo vozdukha v podrazdeleniyakh gornospasatel'noi sluzhby* [Effectiveness evaluation of the improved system of remote collecting the mine air samples implemented in the mine-rescue service subdivisions]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, 2021, no. 4(8), pp. 14-22. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 05.03.2021

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director (on science);

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Aleksandr Mikhailovich Simonov, head of department; e-mail: avrstla@mail.ru;

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, advanced engineer; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-34

SYSTEMS OF REMOTE MONITORING OF GAS CONDITIONS DURING ELIMINATION OF FIRES IN MINES

Purpose. Review of results of investigations regarding the development of the systems for remote monitoring of gas conditions during eliminating the fires in mines.

Methods. The analytical method of investigation consisted of the analysis and processing special literature sources, scientific and technical literature, and the method of computer simulation of the principal pneumatic circuits in the FluidSIM-5 software have been applied.

Results. The promising directions of creating the new systems of remote monitoring of gas conditions during elimination of fires and carrying-out of the emergency rescue operations in the coal mines have been presented.

Scientific novelty. The principal pneumatic scheme and the working set of the system for remote collection of the mine air samples with the vacuum pump powered by the detachable batteries as a flow booster have been proposed. The operability of the proposed system for remote mine environment monitoring has been confirmed by modeling its operation in the FluidSIM-5 software.

Practical value. The results of the conducted investigation constitute a ground for the development of technical requirement specifications, design documentation and prototype models of the systems for remote monitoring of gas conditions during elimination of the fires in coal mines by the mine-rescue service subdivisions.

Keywords: *coal mine; mine-rescue service; accident area; underground fire; carrying-out of emergency rescue operations; remote monitoring of gas conditions; mine air samples; remote sampling and gas analysis.*

УДК 614.841.332:620.197.6-97*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru;**Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: tamdoka@mail.ru;**Олег Владимирович Храпоненко, науч. сотр.; e-mail: olghrap@mail.ru**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55*

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Цель. Разработка установки для исследования и оценки свойств вспучивающегося огнезащитного покрытия металлических строительных конструкций в лабораторных условиях.

Методы. Аналитические исследования, схемные и конструктивные решения проблемы разработки лабораторной установки.

Результаты. Разработана конструкция лабораторной установки для определения эффективности вспучивающегося покрытия, обеспечивающего огнезащиту металлических поверхностей. На основании результатов экспериментальных исследований предложен оптимальный вариант размещения опытного образца в испытательной камере. Разработана программа управления режимом нагрева и поддержания развития стандартного пожара в испытательной камере. Решена задача эффективности теплоизоляции не обработанной огнезащитным покрытием поверхности испытуемого образца за счет применения разработанного композитного термостойкого материала на основе волокнистого огнеупора.

Научная новизна. Созданная лабораторная установка отличается от известных установок для определения огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий способом поддержания необходимого температурного режима испытаний.

Практическая значимость. Установка необходима для сравнительной оценки средств огнезащиты, определения и контроля эффективности огнезащитных составов при их разработке, производстве, применении, а также для определения эффективности огнезащиты после испытаний указанных составов на устойчивость к старению. Возможна оценка эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий в лабораторных условиях со значительной экономией материалов по сравнению с испытательным оборудованием согласно требованиям стандарта по испытаниям огнезащитных покрытий для металлических конструкций.

Ключевые слова: *вспучивающееся покрытие; испытательная печь; лабораторная установка; металлическая конструкция; огнезащита; температурный режим стандартного пожара; экспериментальный образец.*

Постановка проблемы. Система мероприятий в области пожарной безопасности и огнестойкости зданий и сооружений включает огнезащиту металлических конструкций. К перспективным пассивным средствам огнезащиты металлических конструкций относят вспучивающиеся огнезащитные краски, механизм огнезащитного действия которых заключается во вспучивании покрытия под действием высокой температуры (более 200 °С) и образовании на поверхности защищаемой конструкции пористого вспененного коксового слоя с низкой теплопроводностью. Эффективность вспучивающихся огнезащитных покрытий для металлических конструкций

определяют в соответствии с ГОСТ Р 53295-2009. Стандартные методы испытаний предусматривают изготовление фрагментов реальных конструкций, требуют применения сложного, дорогого стендового оборудования (установки для огневых испытаний), следовательно, значительных материальных и энергетических затрат на их подготовку и проведение.

В то же время на стадии разработки средств огнезащиты металлических конструкций для предварительной оценки их свойств, а также для контроля качества выпускаемых покрытий возникает необходимость в применении лабораторных методов, основанных на прогреве образцов уменьшенных размеров – металлических пластин с нанесенным покрытием – в условиях температурного режима стандартного пожара. Лабораторные методы определения эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий для металлических конструкций требуют применения соответствующего испытательного оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций. Критический анализ патентной (патент Украины № UA 61294 U) и научно-технической литературы [1, 2] показал непригодность существующих установок для использования их в качестве базовой модели разрабатываемой лабораторной установки ввиду наличия конструкционных недостатков или значительной стоимости и материалоемкости. В применяющихся лабораторных установках при тепловом воздействии на образец не обеспечивается достаточная равномерность распределения теплового потока по его поверхности. Ни один из существующих методов испытаний не предусматривает одновременного варьирования температуры и времени нагрева образца с заданной точностью. Таким образом, возникла необходимость в разработке конструкции лабораторной установки, которая не будет иметь указанных недостатков и позволит повысить достоверность результатов испытаний.

Цель работы – разработка установки для исследования и оценки свойств вспучивающегося огнезащитного покрытия металлических строительных конструкций в лабораторных условиях.

Изложение основного материала. Согласно ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75), в процессе испытаний металлических строительных конструкций на огнестойкость в печах должны быть созданы условия стандартного температурного режима пожара, характеризуемые следующей зависимостью температуры от времени:

$$T - T_0 = 345 \log(8\tau + 1), \quad (1)$$

где T – текущая температура в печи, °С;

T_0 – начальная температура в печи (принимают равной температуре окружающей среды), °С;

τ – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Отклонение H средней измеренной температуры в печи $T_{\text{ср}}$, °С, от значения температуры T , °С, вычисленного по формуле (1), определяют в процентах по формуле

$$H = \frac{T_{\text{ср}} - T}{T_{\text{ср}}} \cdot 100. \quad (2)$$

За среднюю измеренную температуру в печи принимают среднее арифметическое значение показаний печных термопар в момент времени τ . Рассчитанный по формуле (1) стандартный температурный режим испытательной печи представлен в таблице.

Таблица

Стандартный температурный режим печи

Время, исчисляемое от начала испытания τ , мин	Разница температур $T - T_0$, °С	Допускаемое значение отклонения H , %
5	556	± 15
10	659	
15	718	± 10
30	821	
45	875	± 5
60	925	
90	986	
120	1029	
150	1060	
180	1090	
240	1133	
360	1193	

Температуру внутри испытательной печи и на тыльной стороне экспериментального образца со стороны, противоположной огнезащитному покрытию, фиксируют при помощи термопары. Огнезащитную эффективность вспучивающегося покрытия оценивают по времени достижения необогреваемой стороной экспериментального образца критической температуры для металлических конструкций, равной 500 °С.

При создании лабораторной установки (рис. 1) за основу выбран источник нагрева – печь заводского изготовления мощностью 1,8 кВт, обеспечивающая нагрев до температуры не менее 1100 °С.

В ходе предварительных испытаний установлено, что встроенный нагревательный элемент не обеспечивает необходимую скорость нагрева печи вследствие экранирующего воздействия теплоизоляции. С целью устранения выявленного недостатка принято решение об одновременном использовании двух контуров нагревателей. В результате применения дополнительного контура нагрева достигнуто увеличение температуры образца в течение первых

5 мин работы установки за счет инфракрасного излучения при нагреве спирали контура.

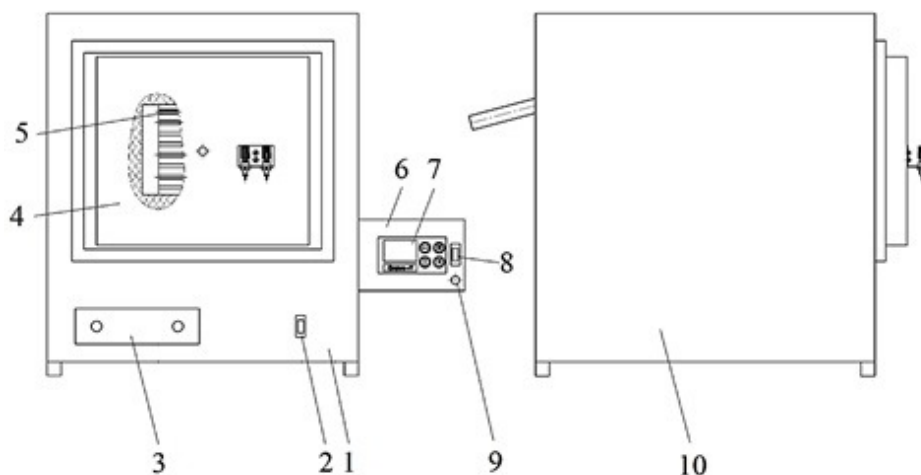


Рис. 1. Лабораторная установка:

1 – испытательная печь; 2 – переключатель печи; 3 – терморегулятор печи; 4 – дверца печи; 5 – нагревательный элемент; 6 – блок управления режимом нагрева; 7 – контроллер температуры; 8 – переключатель блока; 9 – индикатор блока; 10 – кожух печи

Скорость нагрева установки во время испытаний регулируют блоком управления режимом нагрева испытательной печи. В состав блока входят двухканальный контроллер температуры (терморегулятор) типа «Профиль-М-ЛК-2К» и коммутирующее нагрузку твердотельное реле. Контроллер температуры снабжен двумя независимыми контурами управления нагревательными элементами, диапазон измерения температуры от 0 до 1300 °С, дискретность установки температуры 1 °С, погрешность контроля температуры ± 1 °С.

Стандартная термопара ТХА первого контура вставлена в штатное отверстие дверцы печи и упирается термическим спаем во внутреннюю поверхность экспериментального образца.

Контроллер температуры и твердотельное реле закреплены на разных боковых стенках кожуха и размещены за пределами печи. Благодаря такому техническому решению исключена возможность перегрева приборов в процессе эксплуатации установки и созданы удовлетворительные условия для их охлаждения после испытания в условиях высоких температур. Для улучшения вентиляции в верхней крышке предусмотрены вентиляционные отверстия. Все управляющие элементы расположены на передней панели установки.

Размещение нагревательного элемента во внутренней камере установки должно обеспечивать возможность прямого нагрева экспериментального образца за счет инфракрасного излучения спирали. Различные варианты размещения образца во внутренней камере установки рассматривали, исходя из следующих требований: горизонтальный – на нижней или верхней стенке, вертикальный – на дверце. Разместить образец на нижней или верхней

стенке не удалось в связи с проблемами, обусловленными теплоизоляцией внешней стороны образца и выводом термопары. Поэтому за окончательный вариант принято размещение образца в вертикальном положении на дверце. Это позволило максимально увеличить площадь излучения нагревательного элемента – горизонтальных спиралей, установленных на вертикальной плоскости поперечного сечения внутренней камеры установки.

Для поддержания стандартного температурного режима в установке задействованы два электрических терморегулятора. Кроме того, терморегуляторы позволяют дополнительно регулировать скорость и время нагрева системы.

Так как испытания огнезащитных составов проводят в условиях высоких температур, повышается вероятность образования химически агрессивных газообразных продуктов, оказывающих разрушающее воздействие на материал нагревательных элементов. При этом скорость химических реакций прямо пропорциональна температуре нагрева. Поскольку максимальное значение температуры в установке не должно превышать 920 °С, нагретой спирали из нихромовой проволоки – 1100 °С, было принято решение отключать дополнительный нагревательный элемент после 5...7 мин работы установки. С целью отвода образующихся газообразных продуктов за пределы кожуха печи выполнен монтаж керамической трубки, конец которой расположен под расчетным углом наклона для предотвращения избыточных тепловых потерь.

При создании установки возникли сложности с выбором материала для термоизоляции, а также с креплением испытуемого образца – тонкостенной металлической пластины с нанесенным огнезащитным покрытием. На основании результатов экспериментальных исследований образцов шести различных термостойких составов (рис. 2) установлено, что доступные термоизоляционные материалы (асбест, асбоцементные изделия) не выдерживают нагрева до температуры выше 700...800 °С или обладают повышенной хрупкостью и большим весом (шамотные плиты).



Рис. 2. Образцы термостойких составов после испытаний

Для эффективной термоизоляции экспериментального образца разработана огнестойкая композиция на основе муллитокремнезема – материала волокнистой структуры, содержащего 45...62 % оксида алюминия, удовлетворяющая требованиям к термоизоляционным материалам.

Крепление экспериментального образца к теплоизолирующей плите выполняют с помощью металлических прижимных шпилек, натяжение которых осуществляют пружинами, расположенными снаружи дверцы печи (рис. 3).

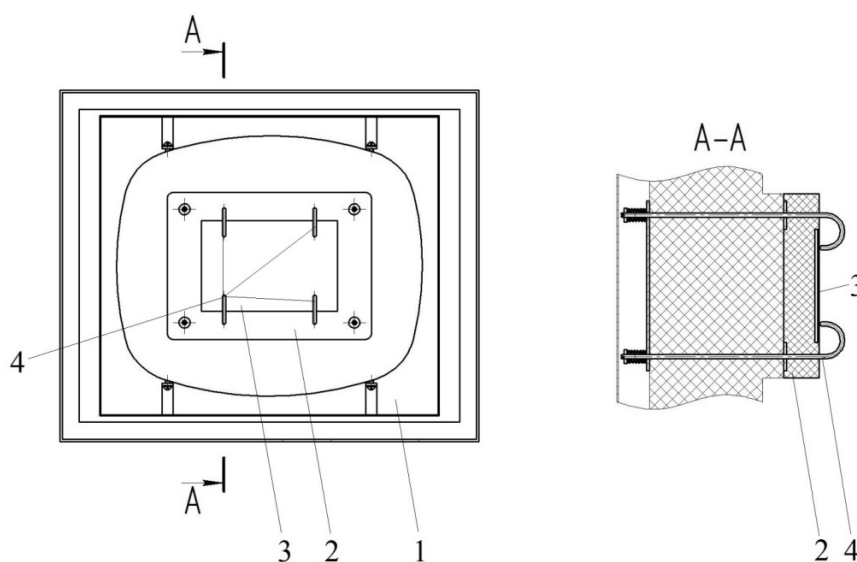


Рис. 3. Схема крепления экспериментального образца:

1 – дверца печи; 2 – теплоизолирующая плита;

3 – экспериментальный образец; 4 – прижимная шпилька

Экспериментальный образец устанавливают в специальное углубление теплоизолирующей плиты толщиной 3 мм.

Рабочий температурный режим лабораторной установки соответствует условиям стандартного режима пожара по ГОСТ 30247.0-94 и находится в пределах 20...900 °С (рис. 4).

Расчетное время работы установки до достижения предела температурного диапазона 20...885 °С составляет 45 мин.

Разработанный вариант лабораторной установки отличается от известных установок для определения и оценки свойств вспучивающихся огнезащитных покрытий конструктивными особенностями, обеспечивающими одинаково равномерный нагрев всей поверхности испытуемого покрытия.

Кроме того, возможна оценка поведения огнезащитных составов во время испытаний при вертикальном размещении экспериментального образца с учетом выявления возможного плавления, скапывания и усадки вспученного слоя огнезащитного покрытия (рис. 5).

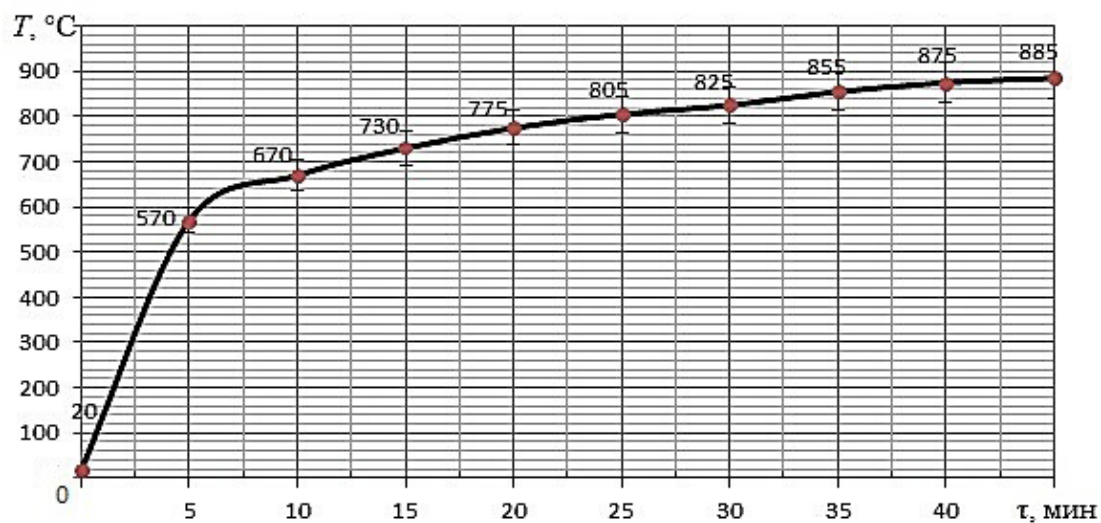


Рис. 4. Температурно-временная кривая стандартного режима пожара

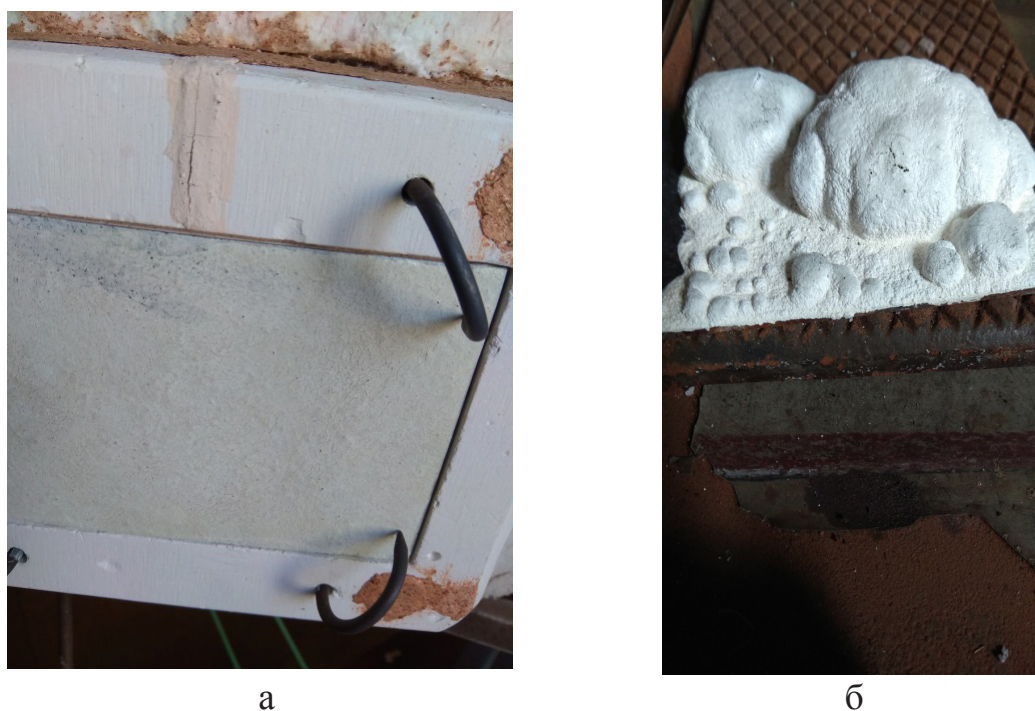


Рис. 5. Внешний вид экспериментального образца:
а — до огневых испытаний; б — после огневых испытаний

Выводы. Выполнены аналитические исследования и разработана лабораторная установка для испытаний огнезащитных покрытий в условиях, приближенных к реальным пожарам. Возможна оценка эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий в лабораторных условиях со значительной экономией материалов по сравнению с испытательным оборудованием согласно требованиям стандарта по испытаниям огнезащитных покрытий для металлических конструкций. Разработана цифровая программа для создания и поддержания стандартного температурного режима независимо от возможных колебаний напряжения сети, что позволяет получать более

достоверные результаты испытаний огнезащитных покрытий. Следующий этап работ – проведение исследований по оценке эффективности разрабатываемых составов для металлических строительных конструкций с применением лабораторной установки.

Список литературы / References

1. Рыбка, Е.А. Лабораторная установка для оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учетом параметров развития реального пожара / Е.А. Рыбка, В.А. Андронов // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 10. – С. 19 – 24.

Rybka Ye.A., Andronov V.A. *Laboratornaya ustanovka dlya otsenki ognezashhitnoi effektivnosti vspuchivayushhikhsya pokrytii dlya metallicheskih konstruksii s uchytom parametrov razvitiya real'nogo pozhara* [The laboratory installation for evaluation of the fireproof effectiveness of intumescent fire-retardant coatings for metal constructions taking into account the parameters of a real fire development]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 19 – 24. (In Russian).

2. Цой, А.А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Цой. ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – СПб., 2017. – 134 с.

Tsoi A.A. *Metodika opredeleniya effektivnosti ognezashhitnykh pokrytii dlya stal'nykh konstruksii v usloviyakh fakel'nogo uglevodorodnogo goreniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology of determination of effectiveness of fire-retardant coatings for steel constructions in the hydrocarbon pilot-light burning conditions: diss. ... Cand. Sci. (Tech.)]. FGBOU VO Saint-Petersburg University of the State fire service of EMERCOM of Russia Press. Saint-Petersburg, 2017, 134 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 11.03.2021

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

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

Oleg Vladimirovich Khraponenko, scientific associate; e-mail: olghrap@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

LABORATORY INSTALLATION FOR INVESTIGATION OF FIRE-RETARDANT COATING CHARACTERISTICS

Purpose. Development of the installation for investigation and estimation of characteristics of the intumescent fire-retardant coating of metal building constructions in laboratory conditions.

Methods. Analytical investigations, circuitry and design solutions of the problem with the laboratory installation development.

Results. The construction of the laboratory installation for determination of effectiveness of the intumescent fire-retardant coating providing the fire-protection of metal surfaces has been developed. Based on the results of the experimental investigations the optimal placement of a test sample inside the test chamber has been suggested. The program for heating mode control has been developed making it possible to maintain the temperature of a standard fire development in the test chamber. The problem with the heat insulation effectiveness of the test sample surface unprotected by the fire-retardant coating has been solved by utilizing the designed composite heat-resistant material based on the fiber castable.

Scientific novelty. The created laboratory installation differs from the known installations for determining the fireproof effectiveness of the intumescent fire-retardant coatings by the method of maintaining the required thermal mode of tests.

Practical value. The installation is necessary for comparative evaluation of the flame-retardant means, for measurement and monitoring of the effectiveness of fire-retardant compositions at the stage of their development, production and application as well as for estimation of their fireproof effectiveness after the ageing resistance tests. The effectiveness of the intumescent fire-retardant coatings in the laboratory conditions is possible with the significant saving in materials comparing to the test equipment in accordance with the standard requirements for testing the fire-retardant coatings for metal constructions.

Keywords: *intumescent coating; test furnace; laboratory installation; metal construction; fire protection; temperature mode of a standard fire; test sample.*

УДК 622.413.4

Константин Александрович Подвигин, ассистент; e-mail: podvigindonntu@mail.ru
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СТРУИ
ОХЛАЖДЕННОГО ВОЗДУХА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ**

Цель. Исследование процессов теплообмена холодной струи с теплым потоком воздуха в горной выработке.

Методы. Разработка математической модели процессов взаимодействия холодной струи с теплым потоком воздуха.

Результаты. Разработана математическая модель процессов заполнения холодной струей нагретого объема горной выработки. Адекватность данной модели подтверждена результатами экспериментов в установке испытаний. Получена аналитическая зависимость дальности подачи охлажденной массы воздуха в зависимости от скорости и температуры истекающего из сопла установки воздушного потока, а также плотности, температуры и скорости движения потока окружающего воздуха.

Научная новизна. Результаты теоретических исследований позволили получить новые аналитические зависимости и установить адекватность математической модели натурному объекту.

Практическая значимость. Полученные результаты предполагается использовать при обосновании параметров установки охлаждения рудничного воздуха льдом для противотепловой защиты горнорабочих.

Ключевые слова: струя; скорость; установка; охлаждение воздуха; теплообмен; математическая модель; дальность подачи.

Постановка проблемы. При истечении из трубы с большой скоростью охлажденная струя попадает в спутный поток горячего воздуха и постепенно смешивается с ним. Часть струи имеет ядро течения с постоянной скоростью от конца трубы до полного разрушения ядра и называется начальным участком x_n .

Размывание струи за пределами начального участка ($x > x_n$) приводит к ее утолщению и снижению скорости вдоль оси. Поэтому установление закономерностей движения струи охлажденного воздуха в горной выработке – актуальная задача, решение которой позволит изучить процессы заполнения холодной струей нагретого объема горной выработки и установить дальность подачи охлажденной массы воздуха.

Анализ последних исследований. В работе [1] автор выполнил исследование процессов теплообмена и взаимодействия воздушной струи с водо-ледяными элементами в установке для охлаждения воздуха. Недостатком полученных закономерностей является то, что не учтены процессы взаимодействия исходящей струи воздуха из сопла установки с нагретым воздухом в горной выработке.

Цель работы – исследование процессов теплообмена холодной струи с теплым потоком воздуха в горной выработке. Определение влияния скорости

и температуры истечения струи из сопла установки на дальность подачи и охлаждающий эффект.

Материалы исследования. Для установления дальности полета и закономерностей распада струй пены или воды будем исходить из теории движения газожидкостных систем [2]. На основании общих представлений и известных экспериментальных данных схему движения и распада струи можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Будем считать, что до распада струи можно пренебречь силами гравитации благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтем, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения холодной струи с нагретым воздухом, но и бокового трения струи о воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения одиночной струи можно представить в виде [3]

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_0 \frac{w^2}{2V}, \quad (1)$$

где ρ – переменная плотность воздуха, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

w – продольная скорость движения струи, м/с;

τ – время с момента вылета холодной струи из установки, с;

λ – коэффициент бокового трения струи о воздух;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления;

S_6 – площадь боковой поверхности струи, м²;

S – площадь поперечного сечения струи в ее головной части, м²;

V – объем холодного воздуха на участке действия струи, м³.

Уравнение (1) предназначено для определения скорости изменения полета холодной струи при начальном условии

$$w(0) = w_0, \quad (2)$$

где w_0 – начальная скорость истечения струи, м/с.

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнение (1), заранее известными величинами, за исключением искомой функции скорости w .

Так как объем струи равен $V = \pi L d^2 / 4$, а боковая поверхность струи $S_6 = \pi L d$, то их отношение можно представить как $S_6 / V = 4 / d$. Подставляя эту формулу в уравнение (1) и пренебрегая лобовым сопротивлением по сравнению с боковым сопротивлением, получим

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -2\lambda \rho_0 \frac{w^2}{d}, \quad (3)$$

где d – диаметр струи, м.

Принимая $\rho = \rho_0$, разделим переменные в уравнении (3) и получим

$$\frac{dw}{w^2} = -2\lambda d\tau / d. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\frac{1}{w} = -2\lambda\tau / d + A, \quad (5)$$

где $A = 1/w_0$ – константа интегрирования, с/м.

Подставляя значение константы интегрирования в формулу (5), получим

$$w = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau/d}, \quad (6)$$

где безразмерный коэффициент $C = 2\lambda$.

Анализ полученного решения (6) показывает, что скорость движения струи будет уменьшаться по сравнению с начальным ее значением.

Для определения дальности x полета холодной струи воздуха используем зависимость (6) и после интегрирования получим

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau/d). \quad (7)$$

Из анализа полученной зависимости следует, что дальность полета холодной струи воздуха в большей степени зависит от ее начальной скорости и диаметра выходного отверстия установки.

При больших скоростях движения струи возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сплюснуть. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания струи, приводящие к ее распаду. Взаимодействие холодного воздуха с окружающим теплым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида [4]

$$2\mu \frac{dR}{d\tau} = R \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right], \quad (8)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости холодного воздуха на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения холодной струи, Па·м;

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны головной части струи, м.

Из уравнения (8) следует, что изменения площади или радиуса поперечного сечения струи происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому

динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения струи.

Определим главные радиусы кривизны холодной струи воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи R_1 и поперек ее движению R_2 соответственно определяются по формулам

$$R_1 = \frac{2R^2}{L}; \quad R_2 = \frac{L^2}{4R}, \quad (9)$$

где L – длина струи до распада, м.

Так как объем струи равен $V = \pi R^2 L$, откуда длина струи $L = \frac{V}{\pi R^2}$, то подставляя это выражение в формулы (9), получим

$$R_1 = \frac{2\pi R^4}{V}; \quad R_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 R^5}. \quad (10)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения струи $S = \pi R^2$, то вместо уравнения (8) будем иметь

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2} \right) \right]. \quad (11)$$

Анализ полученного уравнения (11) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость воздуха. При большой вязкости стержень струи при полете почти не изменит своей формы, что соответствует физическим представлениям. В то же время при малой вязкости воздуха форма струи будет сильно меняться, и в установившемся режиме каждой скорости будет соответствовать своя форма струи. Предположим, что до распада струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (11) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (12)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (13)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}. \quad (14)$$

Полагая $A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu}$, решение уравнения (13) представим в виде

$$S(\tau) = \exp(A_0\tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0\tau)] \right\}. \quad (15)$$

При полной деформации и больших вибрациях струи происходит ее окончательный распад. Будем считать, что распад струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($R_2 \ll R_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения из уравнения (12) получим

$$\lambda\rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2,5}}{\pi^{0,5}V^2}, \quad (16)$$

откуда найдем максимально возможную площадь $S_1 = S_m$ поперечного сечения струи

$$S_1 = \left[\pi^{0,5} \lambda\rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (17)$$

Этой площади должно соответствовать определенное время распада струи и ее скорость. Так, из выражения (16) найдем время распада струи τ_m по формуле

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{S_1 - B/A_0}{S_0 - B/A_0} \right) \quad (18)$$

и критическую скорость распада w_1 , м/с, по формуле

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau_m/d}, \quad (19)$$

где C – эмпирическая константа.

Для расчета дальности полета сплошной части струи холодного воздуха используем формулу (19) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau_m/d). \quad (20)$$

Таким образом, расчетным путем с достаточной степенью точности можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи воздуха, а также дальность полета сплошной и распыленной струй.

Для проверки справедливости полученных результатов теоретических исследований проведен комплекс опытно-промышленных испытаний на специально разработанной экспериментальной установке [5]. Схема проведения опытно-промышленных испытаний приведена на рис. 1.

В ходе испытаний замеры параметров воздуха в рабочей зоне производились в специально оборудованных замерных станциях на расстоянии 1,5; 3,0 и 4,5 м от сопла установки по ходу движения воздушной струи в двенадцати точках.

Из показаний замеров параметров воздуха видно, что в точках 1, 2, 3 и в точках 10, 11, 12 температура воздуха в ходе испытаний оставалась выше предельно допустимой. В замерных точках 4, 5, 6 и в точках 7, 8, 9 температура воздуха на протяжении серии из трех экспериментов оставалась в допустимых Правилами безопасности пределах ($\leq 299,2$ К).

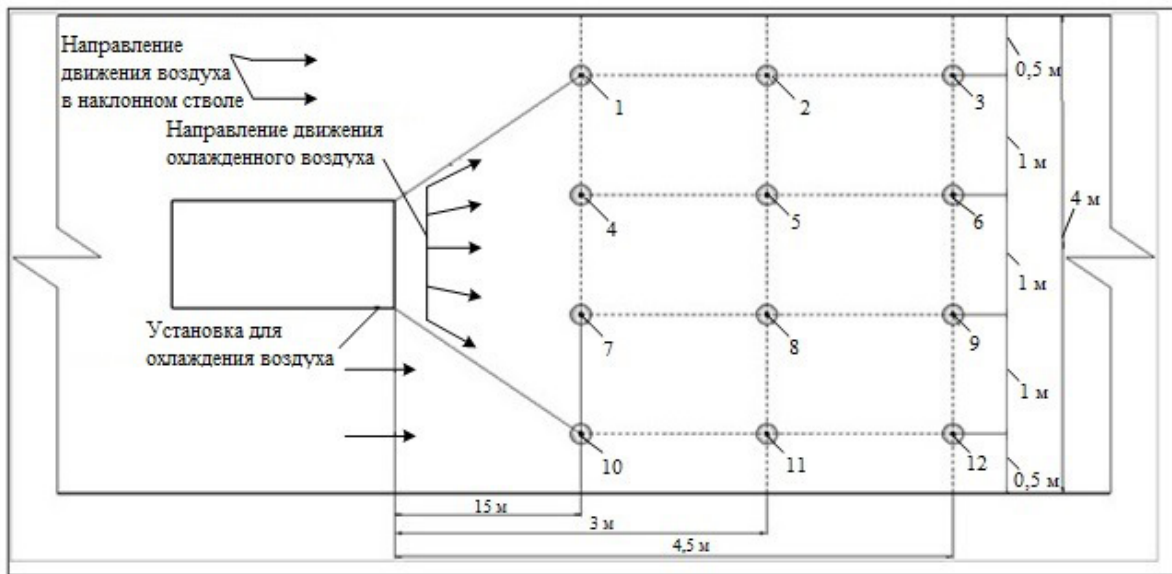


Рис. 1. Схема проведения опытно-промышленных испытаний:
1–12 – точки замера температур воздуха на замерных станциях в ходе испытаний

Из анализа экспериментальных данных следует, что температура воздуха в одних и тех же промежутках времени в точках 4 и 7; 5 и 8; 6 и 9 практически равна, для упрощения произведем усреднение показаний температур воздуха в указанных точках (рис. 2).

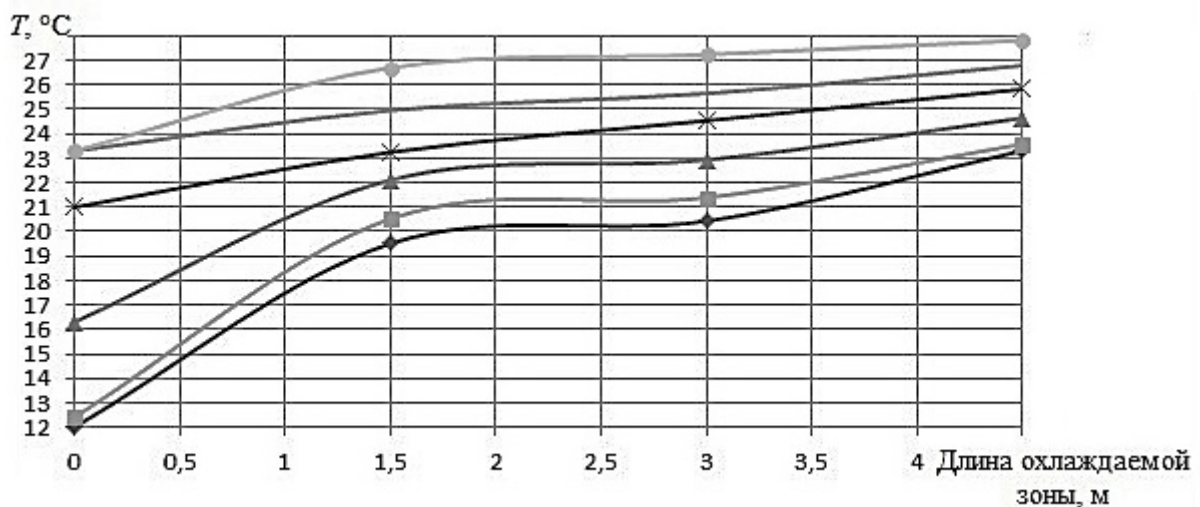


Рис. 2. Усредненная температура воздуха в точках $T_{\text{ср}(4,7)}$; $T_{\text{ср}(5,8)}$; $T_{\text{ср}(6,9)}$:

—◆— 10 минут; —■— 30 минут; —▲— 60 минут;
—×— 90 минут; —— 120 минут; —●— 150 минут

Анализ экспериментальных данных показывает, что выход установки на стационарный режим работы происходит в первые пять минут от начала опыта и продолжается до восьмидесяти минут, после чего наблюдается значительный рост температуры воздуха на выходе из установки. Из рис. 2 видно, что во время стационарного режима работы установки значительного прироста температуры воздуха не наблюдается.

Анализ зависимости избыточной температуры от избыточной скорости показывает, что она не только не отражает физической сущности процессов теплообмена, но имеет большие погрешности при расчетах. Поэтому рассмотрим стационарный процесс теплообмена в горной выработке без учета термодиффузии, описываемый уравнением (19) и имеющий вид

$$w \frac{dT}{dx} = b(T_1 - T), \quad (21)$$

где T_1 – температура в горной выработке, К.

Подставляя в уравнение (21) формулу для расчета скорости струи воздуха (19), получим

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1 + Cx/d}{w_0} b(T_1 - T). \quad (22)$$

Здесь принято за расстояние $x = w_0 \tau$.

После интегрирования уравнения (22) получим

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{x + Cx^2/2d}{w_0} b\right), \quad (23)$$

где T_0 – температура на выходе из установки, К.

Анализ полученного решения (23) показывает, что при $x = 0$ температура на выходе из установки равна $T = T_0$, а вдали от установки она приближается к температуре в горной выработке, и тем быстрее, чем больше параметр b .

Для упрощения произведем усреднение показаний температур воздуха во время стационарного режима работы установки (рис. 3).

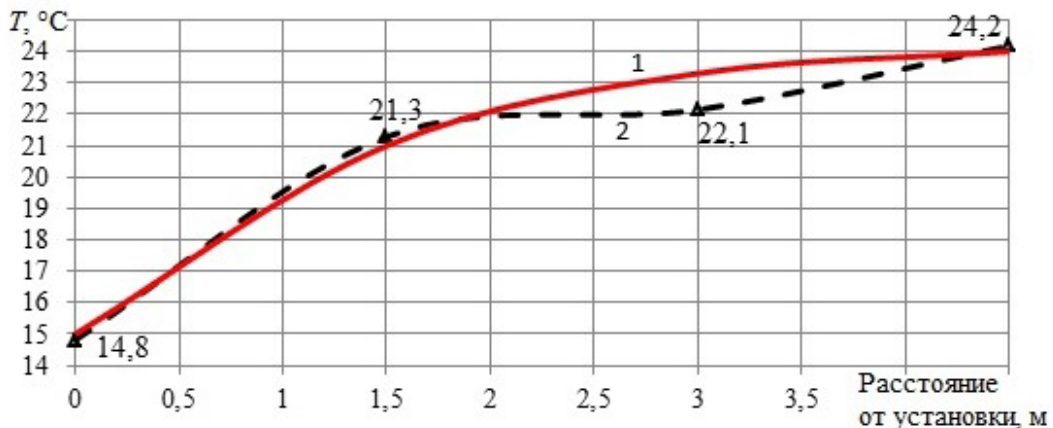


Рис. 3. График изменения температуры воздуха по длине выработки при стационарном режиме работы установки:

1 – расчетные данные; 2 – экспериментальные данные

Из рис. 3 видно, что в стационарном режиме работы установки средняя температура воздуха в охлаждаемой рабочей зоне составляет: на выходе из установки 287,95 К (14,8 °С); на расстоянии 1,5 м от установки 294,15 К (21,3 °С); на расстоянии 3 м от установки 295,15 К (22,1 °С); на расстоянии 4,5 м от установки 297,35 К (24,2 °С).

При сравнении результатов расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 3) видим, что наилучшая сходимость между ними обеспечивается при коэффициенте теплообмена $b = 0,5 \text{ c}^{-1}$.

Выводы

- Выполнены теоретические исследования подачи холодного воздуха установкой. Получены аналитические зависимости максимально возможной площади поперечного сечения холодной струи, а также дальности ее полета.

- В ходе численных экспериментов установлено, что после охлаждения температура горячего воздуха постепенно снижается от 304,2 К (31 °С) до 290 К (17 °С) на выходе из установки, а также получена аналитическая зависимость дальности подачи от площади поперечного сечения охлажденного воздушного потока.

Список литературы / References

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

Podvigin K.A. *Protsessy teploobmena vozduшной strui pri kontakte s netayushhim l'dom* [Processes of heat exchange of an air stream upon contact with non-melting ice]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashhity: nauch. zhurn.* [Bulletin of the Academy of Civil Defence: scientific journal]. Donetsk, 2020, issue 4(24), pp. 56-61. (In Russian).

2. Виноградов, С.А. Исследование распространения высокоскоростной водяной струи в воздухе / С.А. Виноградов, И.Н. Грицына, Н.О. Консуров // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2012. – Вип. 26, № 12. – С. 161 – 164.

Vinogradov S.A., Gritsyna I.N., Konsurov N.O. *Issledovanie rasprostraneniya vysokoskorostnoi vodyanoi strui v vozdukhe* [Investigation of the spreading of a high-velocity water stream in the air] *Naukovyi visnyk UkrNDIPB – UkrNDIPB scientific bulletin*, 2012, issue 26, no. 12, pp. 161-164. (In Russian).

3. Ольшанский, В.П. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т. 14, № 4. – С. 67 – 70.

Ol'shanskii V.P., Ol'shanskii S.V. *K raschyotu predel'noi dal'nosti podachi isparayayushhikhsya tonkoraspylyonnykh ognetyushashhikh veshhestv ustanovkami impul'snogo pozharotusheniya* [To the calculation of the maximum range for the delivery of the evaporating fine-sprayed fire-extinguishing agents by pulse fire-extinguishing installations]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 67-70. (In Russian).

4. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.

Lykov A.V. *Teplomassoobmen. Spravochnik* [Heat and mass exchange. Reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 580 p.

5 Булгаков, Ю.Ф. Математическая модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте со льдом / Ю.Ф. Булгаков, К.А. Подвигин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 1(58). – С. 34 – 39.

Bulgakov Yu.F., Podvigin K.A. *Matematicheskaya model' protsessov teploobmena vozduшной strui pri kontakte so l'dom* [Mathematical model of heat exchange processes between air stream and ice]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific Bulletin of NIIGD «Respirator»: scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 1(58), pp. 34-39. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 09.04.2021

Konstantin Aleksandrovich Podvigin, assistant lecturer; e-mail: podvigindonntu@mail.ru
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
"Donetsk National Technical University"
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09

REGULARITIES OF COOLED AIR STREAM MOVEMENT IN A MINE WORKING

Purpose. Investigation of heat exchange processes between a cold stream and a warm air flow in a mine working.

Methods. Development of a mathematical model of the processes of interaction between the cold stream and the warm air flow.

Results. The mathematical model of the processes of filling the mine working heated volume with the cold stream has been elaborated. The adequacy of the given model has been proven by the results of experiments in a testing installation. The analytical dependence of the delivery distance of the cooled air mass on the velocity and temperature of the air mass flowing out of the nozzle of the air stream installation and on the density, temperature and velocity of the ambient air stream has been obtained.

Scientific novelty. The results of theoretical investigations have made it possible to derive the new analytical dependences and to establish the adequacy of the mathematical model to a full-scale object.

Practical value. The obtained results are suggested to be used for substantiation of the parameters of the installation for cooling the mine air with ice for thermal protection of miners.

Keywords: *stream; velocity; installation; air cooling; heat exchange; mathematical model; delivery distance.*

Требования к оформлению и опубликованию статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи 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 200 до 300 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;
- раздел журнала для размещения статьи.

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, Visio). *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. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (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 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008. 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.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Рецензия

• Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению. Если рукопись научной статьи соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

- Рецензент оценивает статью и дает заключение о целесообразности ее публикации.
- Рецензии хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Если статья не соответствует профилю журнала, то автору сообщается о невозможности её публикации.

В случае положительного решения редакция регистрирует статью и совместно с автором ведёт подготовку статьи к публикации. Перед публикацией статьи автору представляется отредактированный сверстный вариант для просмотра.

Рукописи статей, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

Статьи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2021, № 2(58)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Редактор А.С. Набиулина

Переводчик Л.А. Ахундова

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к использованию 04.06.2021.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-60

Объем 5,65 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 7 июня 2021 г.