



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(59)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2022. – № 2(59). – 118 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	С.П. Греков
д-р техн. наук	С.Е. Гулько
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
д-р мед. наук	В.В. Черкесов
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 2 от 19.05.2022).

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(59)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2022

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2022. – No. 2(59). – 118 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.)	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.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V.V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 2 from 19.05.2022).

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**TABLE OF CONTENTS*****I. Пожарная и промышленная
безопасность******I. Fire and industrial safety*****Агеев В.Г., Греков С.П.,
Орликова В.П.**Избирательность адсорбции газов
при окислении ископаемых углей

7

**Ageyev V.G., Grekov S.P.,
Orlikova V.P.**Adsorption selectivity of gases during
oxidation of mineral coal**Галухин Н.А.**Математическая модель движения
жидкости в пожаротушащей установке
с акустическим распылением

17

Galukhin N.A.Mathematical model of fluid motion
in fire-extinguishing device with acoustic
atomization**Берестовая А.А., Шаповалов В.В.**Термодинамический анализ процесса
горения в окисдно-
и пероксидно-солевых системах

26

Berestovaya A.A., Shapovalov V.V.Thermodynamic analysis of combustion
process in oxide- and peroxide-salt
systems**Чубучный Н.Ю., Добрякова Е.И.**Анализ методов оценки состояния
объектов при проведении
пожарного аудита

38

Chubuchnyi N.Yu., Dobryakova Ye.I.Analysis of methods for assessing objects
condition during conduction
of fire safety audit***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях******II. Safety in emergencies*****Агеев В.Г., Греков С.П.,
Мавроди А.В.**Математическая модель
газодинамических процессов
при техногенных авариях в шахтах
вследствие их обесточивания

47

**Ageyev V.G., Grekov S.P.,
Mavrodi A.V.**Mathematical model
of gas-dynamic processes proceeding
during technogenic accidents in mines
caused by power failure**Князева Т.В., Зборщик Л.А.,
Плетенецкий Р.С., Францев В.И.**Контроль защитной способности
поглотителя ХП-И

58

**Knyazeva T.V., Zborshchik L.A.,
Pletenetskiy R.S., Frantsev V.I.**Control of the ХП-И absorbent protective
capacity

Орликова В.П., Момот Д.И.
Газовый анализ продуктов
термического разложения древесины

64

Orlikova V.P., Momot D.I.
Gas analysis of wood
thermal decomposition products

**Козлитин А.А., Храпоненко О.В.,
Щербакова О.Н., Сиверский А.В.**
Идентификация горючих жидкостей
в пробах, отобранных с места пожара

73

**Kozlitin A.A., Khraponenko O.V.,
Shcherbakova O.N., Siverskiy A.V.**
Detection of flammable liquids
in samples collected from a place of fire

III. Охрана труда и экологическая безопасность

III. Labor protection and environmental safety

**Симонов А.М., Карнаух Н.В.,
Агарков Ал.В., Захлебн В.В.**
Обеспечение безопасности ведения
аварийно-спасательных работ в шахтах
после внезапных выбросов

82

**Simonov A.M., Karnaukh N.V.,
Agarkov Al.V., Zakhlebin V.V.**
Provision of safety of emergency
operations carrying-out in mines
after sudden outbursts

**Мамаев В.В., Иваненко А.Ф.,
Мухин П.Е., Попова Л.М.**
Исследование проблем техногенной
безопасности на ликвидируемых
шахтах ДНР

94

**Mamayev V.V., Ivanenko A.F.,
Mukhin P.Ye., Popova L.M.**
Investigation of technogenic
safety problems at the DPR mines
under liquidation

Коляда А.Ю., Буряк Д.С.
Исследование процессов флегматизации
водяным паром очага горения

103

Kolyada A.Yu., Buryak D.S.
Investigation of processes of phlegmatizing
a seat of fire by water vapor

**Гуржий В.В., Березин А.А.,
Политучий Д.А.**
Практическая значимость
Методических рекомендаций
по выявлению и изъятию фрагментов
электроустановок с места пожара

109

**Gurzhiy V.V., Berezin A.A.,
Polituchiy A.A.**
Practical value
of Methodological recommendations
on detection and collection of electrical
installations fragments at a place of fire

І. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 622.822.225:001.891.572

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Виктория Петровна Орликова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-79-07

ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ АДСОРБЦИИ ГАЗОВ ПРИ ОКИСЛЕНИИ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ

Цель. Разработать метод оценки избирательной адсорбции газов шахтного воздуха для дальнейшего исследования низкотемпературного окисления угля, приводящего к его самонагреванию.

Методы. Математическое моделирование адсорбции компонентов газовой смеси на основе экспериментальных данных кинетики поглощения исследуемых веществ.

Результаты. Установлена аналитическая зависимость для оценки количества поглощенного газа из смеси. Определены параметры адсорбции кислорода на поверхности угля средней стадии метаморфизма и проведен сравнительный анализ поглощения этого газа по отношению к основному компоненту шахтного воздуха – азоту. Установлена динамика коэффициентов адсорбции и диффузии при поглощении веществ различной реакционной способности.

Научная новизна. Разработан метод оценки избирательной адсорбции компонентов шахтного воздуха, который учитывает динамику параметров этого процесса и вклад кислорода в процесс окисления угля.

Практическая значимость. Предложенный метод избирательной адсорбции компонентов газовой смеси позволяет оценить хемосорбцию кислорода угольным скоплением и его температуру, повысить точность расчета инкубационного периода самовозгорания угля.

Ключевые слова: адсорбция; диффузия; газовая смесь; уголь; математическое моделирование.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Кинетика адсорбции углями смеси различных газов интересует исследователей всего мира на протяжении длительного времени. В современной химической, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности адсорбционный метод широко используют для глубокой очистки и осушки технологических потоков газа [1].

В горном деле адсорбцию газовых смесей связывают с изучением низкотемпературного окисления раздробленных горным давлением пластов, оставшихся неизвлеченными в результате технологических процессов добычи угля, что приводит к его самовозгоранию при недостаточном отводе теплоты (30 % эндогенных пожаров возникает при переходе лавами мест геологических нарушений) [2].

Смеси, сорбируемые углями, состоят из различных газов, концентрация которых колеблется в зависимости от конкретных условий в следующих

пределах: метан – 70...80 %, азот – 80 % и более (при тушении пожара), кислород – 20 % и ниже, диоксид углерода – 50 % и более (при тушении пожара) [3].

Кислород, в отличие от других газов, химически взаимодействует с углем, что приводит к его окислению с выделением теплоты. Хемосорбция кислорода протекает необратимо с небольшой скоростью и в зависимости от размера частиц угля может длиться несколько суток. Исследование влияния интенсивности хемосорбции кислорода углями на склонность их к самовозгоранию позволило установить зависимость скорости химической реакции от таких параметров, как коэффициент диффузии, массоперенос газа в порах угля, коэффициент адсорбции, константа скорости этой реакции [2].

Однако присутствие других газов в шахтном воздухе, омывающем угольное скопление, приводит к эффекту избирательности адсорбции, что существенно влияет на процесс окисления угля и требует изучения. В связи с этим представляют интерес дальнейшие исследования влияния избирательности адсорбции смеси газов шахтного воздуха на процесс окисления угля.

Общие закономерности адсорбции газов из смесей подробно рассматривались в работах Н.В. Кельцева, Б.П. Беринга, В.В. Серпинского и других. В качестве меры избирательности они предложили применять коэффициенты разделения K_p и подобия β .

По данным Н.В. Кельцева, если принять значение коэффициента подобия для азота равным единице, то для метана $\beta = 1,52$, диоксида углерода $\beta = 1,25$, оксида углерода $\beta = 0,61$ и кислорода $\beta = 1,42$.

Количество одного поглощенного вещества из газовой смеси вследствие совместной адсорбции всех компонентов обычно оценивают по кривым адсорбционного равновесия, где каждому соотношению компонентов в газовой фазе соответствует определенный состав адсорбированной фазы. Кривые адсорбционного равновесия отражают молярное соотношение адсорбированной фазы в зависимости от состава газовой среды при постоянном суммарном давлении двух адсорбирующихся компонентов, поэтому коэффициент разделения K_p предложено определять из соотношения

$$K_p = y_2 x_1 / (y_1 x_2),$$

где y_1 и y_2 – мольные доли адсорбирующихся компонентов в газовой фазе;

x_1 и x_2 – мольные доли этих компонентов в адсорбированной фазе.

При исследовании адсорбции бинарной газовой смеси пропан – бутан на активном угле было установлено, что при двух различных температурах адсорбционная способность по сумме извлекаемых компонентов a_{12} почти линейно зависит от состава адсорбированной фазы и при постоянной сумме парциальных давлений этих компонентов в системе может быть описана выражением

$$a_{12} = x_1 a_1^0 + x_2 a_2^0,$$

где a_1^0 и a_2^0 – адсорбционная способность чистых компонентов при давлении, равном сумме парциальных давлений извлекаемых компонентов.

Если эта сумма постоянна, то справедливо следующее полуэмпирическое соотношение Льюиса:

$$a_1 / a_1^0 + a_2 / a_2^0 = 1, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 – адсорбционная способность компонентов, извлекаемых из смеси.

Из выражения (1) следует, что при постоянном общем давлении адсорбция одного компонента линейно зависит от адсорбции другого. Повышение температуры и увеличение давления в системе несколько снижает избирательность поглощения газовой смеси.

Обработав экспериментальные данные по равновесию в 15 бинарных газовых системах на микропористых сорбентах, Н.В. Кельцев и Ю.И. Шумяцкий установили зависимость для определения коэффициента разделения по соотношению коэффициентов подобия компонентов в виде

$$\lg K_p = -0,23 + 4,76(1 - \varphi),$$

где $\varphi = \beta_2 / \beta_1$ – соотношение коэффициентов подобия адсорбирующихся компонентов.

Необходимо отметить, что данные зависимости получены для газов, близких по реакционной способности к используемому адсорбенту, чего нельзя сказать о шахтном воздухе, содержащем инертные и активные компоненты. Кроме того, в условиях горной выработки адсорбент (уголь), подверженный окислению кислородом воздуха, представляет собой систему пор различного размера, что не учтено в рассмотренных выше зависимостях.

Поэтому **цель исследования** – разработать метод оценки избирательной адсорбции газов шахтного воздуха для дальнейшего изучения низкотемпературного окисления угля, приводящего к его самонагреванию.

Результаты исследований. Угольное скопление в горной выработке представляет собой совокупность частиц различного размера, из которых выделяется метан, освобождая доступ кислорода к твердой реакционной поверхности. Как показали результаты экспериментов [3] с углями, предварительно насыщенными метаном, после сброса давления в течение 3...5 дней происходит струйное выделение газа, которое затем заметно уменьшается. В зависимости от размера частиц угля дегазация метана может длиться около 30...40 сут.

Учитывая различную скорость подвигания лавы, систему разработки пласта, крепость пород и реакционную активность угля, скорость фильтрации потока

в слабо проветриваемой зоне, омывающего скопление частиц, составляет $1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ м/с [4].

Процесс адсорбции основных газов, содержащихся в воздухе (азот, кислород и метан), зависит от размера частиц угля. Если азот и метан удерживаются на твердой поверхности за счет сил Ван-дер-Ваальса, то кислород вступает в химическое взаимодействие с образованием теплоты. Будем считать, что уголь (адсорбент) помещен в поток газовой смеси – воздух (адсорбтив), при этом каждый компонент этой смеси имеет свои параметры адсорбции.

Сформулированная нами математическая задача кинетики адсорбции газовой смеси отличается от предложенной ранее [5] наличием трех безразмерных параметров адсорбции Ka_i для кислорода, азота и метана, которые равны

$$Ka_i = \frac{\beta_i R_1^2}{D_i}, \quad (2)$$

где β_i и D_i – коэффициенты адсорбции, с^{-1} , и внутренней диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$, кислорода, или азота, или метана;

R_1 – радиус частицы угля, м.

При этом параметром Ka_{CH_4} в первом приближении можно пренебречь, так как к моменту заметного самонагревания угля, вызванного реакцией окисления, метан в адсорбенте, очевидно, находится в равновесном состоянии с метаном воздуха.

В этом случае решение поставленной задачи в безразмерных и усредненных по радиусу частиц параметрах будет иметь вид [6]

$$\bar{C}_i = \frac{C_i}{C_{ci}} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^2 \frac{\exp(p_{kn} Fo_g)}{\mu_{kn} p_{kn}}, \quad (3)$$

$$\bar{a}_i = \frac{a_i}{\gamma_i C_{ci}} = 1 - \exp(-Ka_i Fo_g) - \frac{1}{2} \sum_k B_k \mu_k \sum_n \frac{2 Ka_i [\exp(p_{kn} Fo_g) - \exp(-Ka_i Fo_g)]}{\mu_{kn} p_{kn} (Ka_i + p_{kn})}, \quad (4)$$

где \bar{C}_i – относительная концентрация сорбирующегося компонента в газовой фазе твердых частиц;

C_i – концентрация адсорбата в газовой фазе пор угля, моль /м³;

C_{ci} – начальная концентрация адсорбтива, моль /м³;

\bar{a}_i – относительная концентрация сорбирующегося компонента в неподвижной фазе твердых частиц;

a_i – концентрация адсорбата в неподвижной фазе, моль /м³;

γ_i – константа Генри сорбирующегося компонента;

B_k – постоянные коэффициенты, определяемые из соотношения

$$B_k = \frac{6Bi_g^2}{\mu_k^2 (\mu_k^2 + Bi_g^2 - Bi_g)}; \quad (5)$$

μ_k – корни уравнения $\operatorname{tg} \mu = -\mu / (\operatorname{Bi}_g - 1)$;

$$p_{kn} = -\frac{\mu_k^2 + \operatorname{Ka}(1 + \gamma)}{2} \pm \sqrt{\frac{[\mu_k^2 + \operatorname{Ka}(1 + \gamma)]^2}{4} - \mu_n^2 \operatorname{Ka}}; \quad (6)$$

$$\mu_{kn} = -\frac{1}{2\mu_k} \left[1 + \frac{\gamma \operatorname{Ka}^2}{(p_{kn} + \operatorname{Ka})^2} \right]; \quad (7)$$

$\operatorname{Fo}_g, \operatorname{Bi}_g$ – диффузионные критерии Фурье и Био, равные

$$\operatorname{Fo}_g = \frac{D\tau}{R_1^2}; \quad \operatorname{Bi}_g = \frac{\beta R_1}{D}; \quad (8)$$

β – коэффициент массообмена, м/с.

Общее количество кислорода или азота, поглощенного частицами адсорбента, можно определить из следующего выражения [7]:

$$N_i = \frac{\varepsilon}{\rho} C_{ci} (\bar{C}_i + \gamma_i \bar{a}_i + \gamma_i), \quad (9)$$

где ε – пористость адсорбента;

ρ – плотность адсорбента, кг/м³.

Анализируя приведенные выше выражения (2) – (9), определим параметры адсорбции кислорода и азота частицами угля. Кинетика данного процесса во многом зависит от начальной концентрации газа в шахтном воздухе, коэффициента диффузии в поры угля различного размера и коэффициентов адсорбции и массообмена.

Воспользуемся экспериментальными данными кинетики поглощения кислорода и азота углем, имеющим средний радиус $R_1 = 0,0015$ м и выход летучих веществ 15,68 %, которые получены М.Б. Суллой и его коллегами (рис. 1).

Представленные кинетические кривые показывают, что основное количество азота поглощено в течение первых шести часов эксперимента, в то время как проникновение и реагирование кислорода происходит постепенно и описывается степенной зависимостью (см. рис. 1). Разный характер кривых поглощения наглядно иллюстрирует различие во взаимодействии молекул кислорода и азота с углем. В первую очередь это объясняется их реакционной способностью, связанной со строением: молекула азота состоит из двух атомов, прочно соединенных тройной ковалентной связью, и инертна, в то время как кислород – один из сильных окислителей, в молекуле которого неспаренные электроны образуют двойную ковалентную связь. Поэтому для азота характерно физическое взаимодействие с твердой поверхностью адсорбента, которое носит обратимый характер и не приводит к изменению химического строения вещества. Адсорбция кислорода с углем происходит в результате образования

сложных кислородных комплексов и сопровождается выделением теплоты, а при определенных условиях в результате резкого повышения скорости реакции выделяются газообразные продукты окисления, то есть происходит химическое взаимодействие [2].

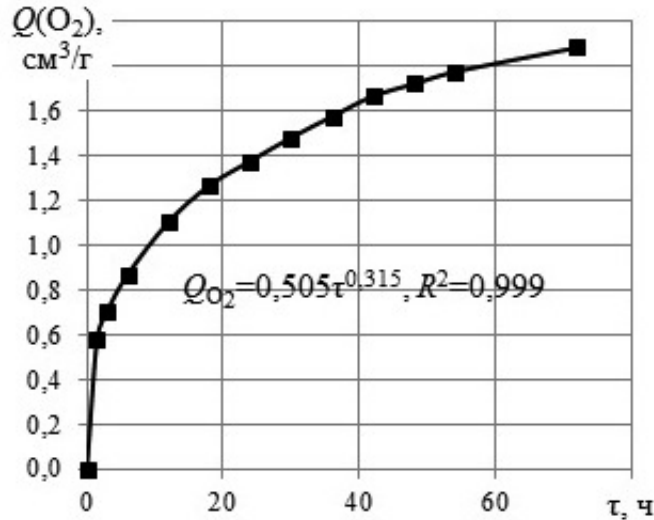


Рис. 1. Кинетика поглощения углем кислорода

Значения концентрации кислорода в неподвижной фазе угля, рассчитанные на основании экспериментальных данных $a_{\text{эксп}}$ и с помощью уравнения (4) $a_{\text{теор}}$ при начальной концентрации $C_c = 22,3$ моль/м³, представлены на рис. 2. Константа Генри определена из соотношения $\gamma = a/C_c$ на основании экспериментальных данных и равна 1,88. Аналогичные исследования для азота представлены в работе [6].

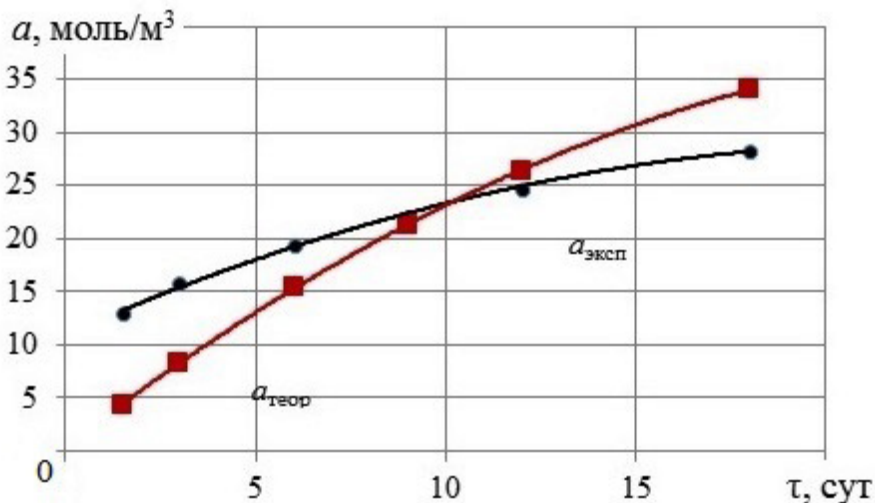


Рис. 2. Динамика концентрации кислорода в неподвижной фазе угля:

$$a = -0,051x^2 + 2,785x + 0,391; R^2 = 0,9999;$$

$$a_{\text{теор}} = -0,034x^2 + 1,576x + 11,005; R^2 = 0,9976$$

Анализ установленных зависимостей выявил значительное отклонение расчетных значений от экспериментальных данных, что, вероятно, связано

со сложным механизмом адсорбции, включающим не только физическую адсорбцию на твердой поверхности, но и химическое реагирование с кислородом. Математическое моделирование проведено при среднем значении коэффициента адсорбции, равном $\beta_1 = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, однако, учитывая ранее проведенные исследования и низкую сходимость расчетных и экспериментальных данных, предложен переменный характер этой величины. Поэтому определены изменяющиеся во времени значения β_1 (см. рис. 3, а), которые использованы при расчете количества кислорода, адсорбированного углем, что позволило максимально приблизить результаты теоретических расчетов к экспериментальным данным. Характер динамики коэффициентов адсорбции кислорода и азота (см. рис. 3, б) еще раз подтверждает различие в видах адсорбции на угольной поверхности.

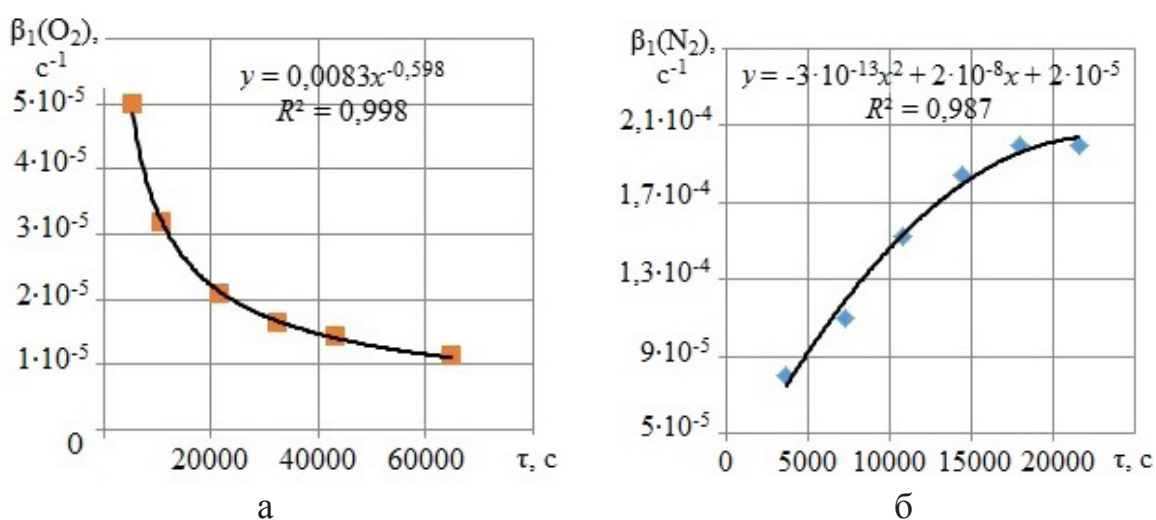


Рис. 3. Динамика коэффициента адсорбции кислорода (а) и азота (б)

К параметрам, влияющим на протекание процесса адсорбции, относится коэффициент диффузии газа в поры адсорбента, поэтому в результате математического моделирования определены значения D_i для кислорода и азота и установлено изменение их за время основного поглощения веществ (рис. 4, а, б).

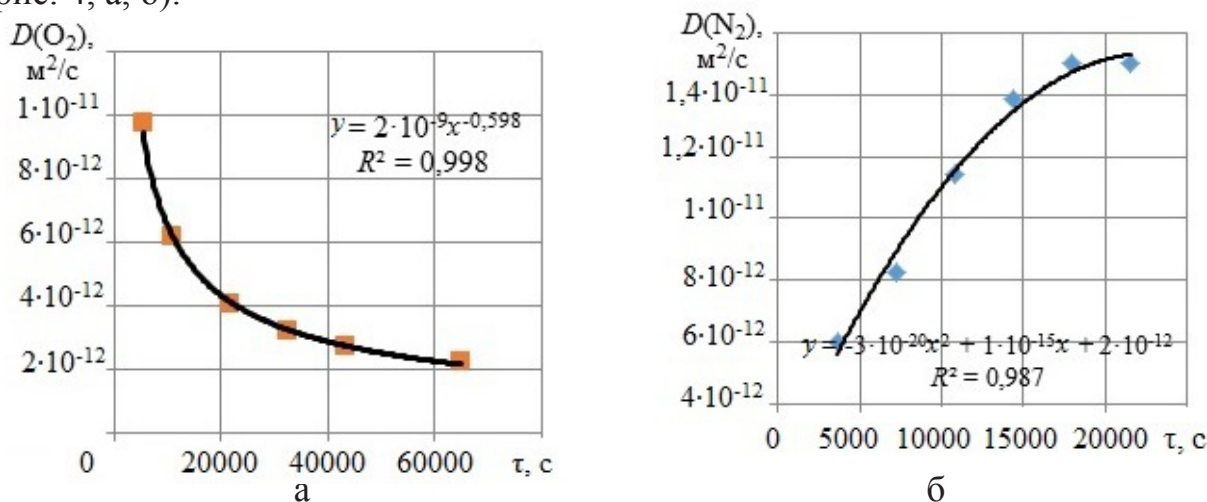


Рис. 4. Динамика коэффициента диффузии кислорода (а) и азота (б)

Установленные зависимости аналогичны изменению коэффициента адсорбции и использованы для определения общего количества исследуемого газа, поглощенного частицами адсорбента. Значения N , рассчитанные для кислорода и азота по формуле (9), и их изменение за период основного поглощения газа описано полиномиальной зависимостью с коэффициентом детерминации 0,997 (рис. 5).

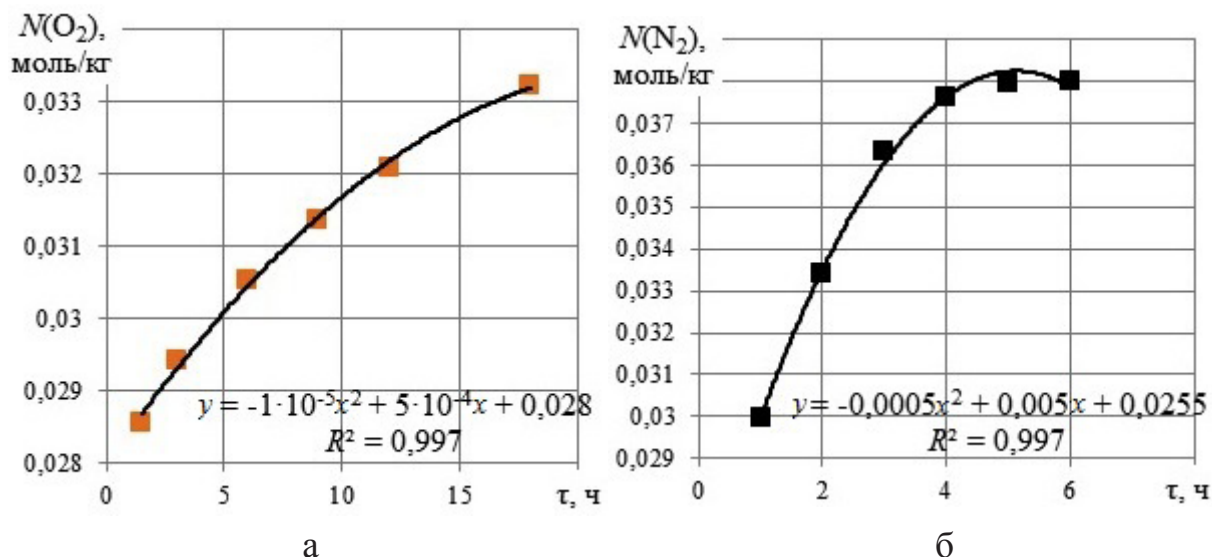


Рис. 5. Изменение количества кислорода (а) и азота (б), поглощенного углем

Динамика общего количества кислорода или азота, диффундировавшего в поры угля, установленная с помощью математического моделирования процесса адсорбции, симбатна изменению экспериментальных данных, что позволяет использовать полученные зависимости для оценки процесса адсорбции газа на поверхности угля.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В результате использования экспериментальных данных поглощения кислорода частицами угля средней стадии метаморфизма методом математического моделирования этого процесса впервые получены значения параметров адсорбции исследуемых газов. Установлена динамика этих параметров за время основного поглощения газов и проведен сравнительный анализ адсорбции веществ различной реакционной способности.

Список литературы / References

1. Ветошкин, А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды / А.Г. Ветошкин. – М.: Высшая школа, 2008. – 397 с.

Vetoshkin A.G. *Teoreticheskie osnovy zashhity okruzhayushhei sredy* [Theoretical basics of environmental protection]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, 397 p. (In Russian).

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

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

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

Ageyev V.G., Pashkovskiy P.S., Grekov S.P. *Profilaktika endogennoi pozharoопасnosti: monografiya* [Prevention of spontaneous fire hazard: monograph]. Donetsk, 2020, 592 p. (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. Греков, С.П. Особенности адсорбции кислорода каменными углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Вестник Академии гражданской защиты: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – Вып. 3(27). – С. 16 – 22.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Osobennosti adsorbtsii kisloroda kamennymi uglyami* [Specifics of oxygen adsorption by hard coal]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashhity: nauch. zhurn.* [Bulletin of the Civil Defence Academy: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO “Akademiya grazhdanskoi zashhity” MChS DNR Press, 2021, issue 3(27), pp. 16-22. (In Russian).

6. Греков, С.П. Теоретическое исследование параметров адсорбции азота ископаемыми углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2022. – № 1(59). – С. 16 – 25.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Teoreticheskoe issledovanie parametrov adsorbtsii azota iskopaemyimi uglyami* [Theoretical investigation of parameters of nitrogen adsorption by mineral coal]. *Nauchnyi vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2022, no. 1(59), pp. 16-25. (In Russian).

7. Греков, С.П. Кинетика адсорбции кислорода газонасыщенными углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журн. / под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2021. – № 7. – С. 341 – 345.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Kinetika adsorbtsii kisloroda gazonasyshhennymi uglyami* [Kinetics of adsorption of oxygen by gas-saturated coal]. *Naukoyomkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: nauch. zhurn. / pod obshh. red. Fryanova V.N.* [Science-driven technologies of exploitation and utilization

of mineral resources: scientific journal / Fryanov V.N. (ed.)]. Novokuznetsk, 2021, no. 7, pp. 341-345. (In Russian).

8. Орликова, В.П. Кинетика хемосорбции кислорода углями при переменном коэффициенте диффузии адсорбтива как функции его проницаемости / В.П. Орликова // Вестник Академии гражданской защиты: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – Вып. 4(27). – С. 7 – 12.

Orlikova V.P. *Kinetika khemosorbtsii kisloroda uglyami pri peremennom koeffitsiente diffuzii adsorptiva kak funktsii ego pronitsaemosti* [Kinetics of oxygen chemisorption by coal with variable coefficient of adsorptive diffusion as function of its permeability]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashhity: nauch. zhurn.* [Bulletin of the Civil Defence Academy: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO “Akademiya grazhdanskoi zashhity” MChS DNR Press, 2021, issue 4(27), pp. 7-12. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 28.01.2022

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Viktoria Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.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

ADSORPTION SELECTIVITY OF GASES DURING OXIDATION OF MINERAL COAL

Purpose. To develop a method for assessing the adsorption selectivity of mine air gases for further investigation of the low-temperature oxidation of coal leading to its spontaneous heating.

Methods. Mathematical modeling of the adsorption of gas mix components on the basis of the experimental data on kinetics of adsorption of the substances in question.

Results. The analytical dependence has been established for assessment of the adsorbed gas from the mix. The parameters of the oxygen adsorption on the surface of coal with the medium-grade metamorphism have been determined, and the comparative analysis of adsorption of this gas in reference to the main component of the mine air, i.e. nitrogen, has been fulfilled. The dynamics of the coefficients of adsorption and diffusion during sorption of substances with various reactive capacity has been established.

Scientific novelty. The method has been developed for assessing the adsorption selectivity of the mine air components factoring in the dynamics of the process parameters and the oxygen input in the process of coal oxidation.

Practical value. The proposed method of the adsorption selectivity of the gas mix components makes it possible to assess the oxygen chemisorption by a coal accumulation and its temperature, to improve the accuracy of calculating the incubation period of the coal spontaneous combustion.

Keywords: *adsorption; diffusion; gas mix; coal; mathematical modeling.*

УДК [614.844.2:621.647.23:534.29]:001.891.572

*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*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОЖАРОТУШАЩЕЙ УСТАНОВКЕ С АКУСТИЧЕСКИМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Цель. Разработка математической модели движения пожаротушащей жидкости в установке с акустическим распылением для обоснования оптимальных параметров сопла.

Методы. Аналитические методы исследования газогидродинамики, неразрывности потока, истечения жидкости через отверстие; экспериментальные исследования давления в камере распыления.

Результаты. Разработана математическая модель движения пожаротушащей жидкости при ее вытеснении сжатым газом в камеру распыления. Получена зависимость относительного давления в камере распыления ствола от числа Маха.

Научная новизна. Установлено, что для обеспечения нормальной работы генератора акустических колебаний и получения наибольшей скорости газочапельного потока на срезе сопла скорость газового потока на выходе газодинамического сопла должна находиться в диапазоне 1,0М...1,1М, а относительное давление в камере распыления – 0,500...0,528.

Практическая значимость. Численная реализация предложенной математической модели позволяет определить конструктивный параметр ствола – суммарную площадь отверстий распылительного диска. Полученный диапазон изменения относительного давления в камере распыления позволит рассчитать оптимальное давление, которое является граничным условием для системы дифференциальных уравнений движения двухфазного потока в канале газодинамического сопла, и теоретически обосновать оптимальный геометрический профиль сопла для повышения эффективности тушения пожара.

Ключевые слова: математическая модель; пожаротушение; акустическое распыление; газодинамическое сопло; газочапельный поток; камера распыления.

Постановка проблемы. Установки ранцевого и мобильного исполнения относятся к первичным средствам пожаротушения, имеющим ограниченный запас пожаротушащей жидкости. Наибольшая эффективность в малорасходных установках достигается при тушении локальных очагов пожара в начальной стадии возгорания, длящейся 5...10 мин. В связи с ограниченным объемом пожаротушащей жидкости применяют различные способы улучшения эффективности тушения водой, например распыление в газовом потоке газодинамическим или акустическим способом для повышения скорости истечения двухфазного газочапельного потока на срезе выходного сопла. Тонкость распыления пожаротушащей жидкости во многом определяется способом ее подачи в камеру распыления. Для повышения эффективности распыления воду (или воду с добавками) подают в камеру в виде тонких струек через отверстия цилиндрической или щелевидной формы, выполненные

в распылительном диске, что улучшает их распад на капли в акустическом поле резонатора. Очевидно, что разработка математической модели движения пожаротушающей жидкости позволит получить аналитические зависимости для определения диаметра сопла и количества струек, перепада давления на распылительном диске и обоснования его оптимальных конструктивных параметров, повышения эффективности пожаротушения.

Анализ последних исследований. В работе [1] получение тонкораспыленной воды осуществляют подачей тонких струек в выходную (диффузорную) часть газодинамического сопла. За счет взаимодействия сверхзвукового потока газа на срезе сопла формируется газокпельный поток. В статье приведено выражение для объемного расхода воды, где перепад давления на отверстии принят с учетом того, что подвод воды осуществлен на срезе сопла. Недостаток такого способа подачи воды состоит в кратковременности взаимодействия газовой и жидкостной струй, что снижает передачу кинетической энергии несущей газовой фазы дисперсной фазе – капле жидкости. Из-за этого снижается дальнобойность струи.

Повышение эффективности тушения пожаров в помещениях на основе улучшения свойств воды рассмотрено в статье [2]. Показано, что тонкораспыленная вода в наибольшей степени соответствует критериям общедоступности, низкой стоимости и экологической безопасности. Сделан вывод, что тушение пожара тонкораспыленной водой эффективно в начальной стадии его развития, когда площадь пожара твердого горючего вещества составляет 2...3 м². При большей площади пожара на пути движения капель диаметром примерно 100 мкм возникают сразу два барьера – тепловой и кинематический, при их прохождении капля может испариться (ввиду высокой температуры) или отклониться от первоначальной траектории под действием восходящих тепловых потоков. Авторы сделали вывод, что преодоление двух указанных барьеров наиболее эффективно каплями с диаметрами 300...3000 мкм. Применение крупнораспыленной и мелкораспыленной воды признано неэффективным.

В работе [3] рассмотрено влияние увеличения перепада давления на распыляющем отверстии на скорость истечения потока. Показано, что это приводит к слабому увеличению скорости испарения капель, а следовательно, и к незначительному увеличению отбора тепла из очага пожара. Сделан вывод, что эффективность тушения тонкораспыленной водой по сравнению с тушением водой обычного распыления проявляется лишь в случае, если полный импульс капельного потока тонкораспыленной воды превышает импульс восходящего теплового потока продуктов горения. В противном случае применение воды обычного грубого распыления более эффективно.

В статье [4] показано, что в двухфазных пожаротушающих установках при прохождении газа из баллона в бак и ствол через редуцирующий канал

температура газа понижается на 50 К, охлаждение газа обусловлено его дросселированием (эффект Джоуля – Томсона) при редуцировании давления от 20 до 1 МПа, что может привести к замерзанию воды.

Цель исследования – разработка математической модели движения жидкости в пожаротушащей установке с акустическим распылением для обоснования оптимальных параметров сопла.

Результаты исследований. Пневмогидравлическая схема подачи газа и жидкости в ствол пожаротушащей установки с акустическим распылением [5] представлена на рис. 1.

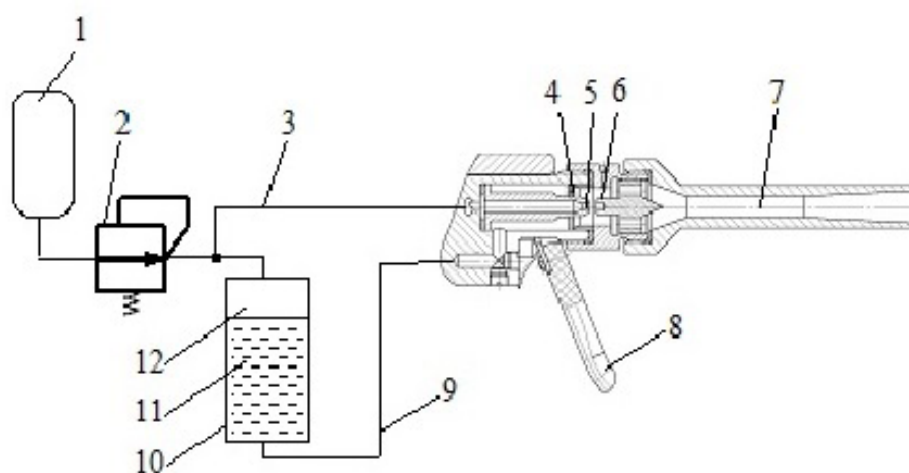


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема пожаротушащей установки:

- 1 – баллон; 2 – редуциционный клапан; 3 – линия подачи газа;
 4 – распылительный диск; 5 – газодинамическое сопло; 6 – камера распыления;
 7 – газокпельное сопло; 8 – рычаг; 9 – линия подачи жидкости; 10 – бак;
 11 – жидкость; 12 – газовая полость

Работа пожаротушащей установки состоит в следующем. При нажатии на рычаг 8 открываются одновременно два клапана (на рисунке не показаны), что приводит к подаче газа и жидкости в ствол. Сжатый до давления 20...30 МПа газ из баллона 1 проходит через редуциционный клапан 2, на выходе давление снижается до 1 МПа, газ поступает одновременно в газовую полость 12 бака 10 и через линию подачи газа 3 – на вход газодинамического сопла 5. Под действием постоянного давления в газовой полости 12 жидкость 11 вытесняется через линию подачи жидкости 9 на вход распылительного диска 4. В распылительном диске 4 выполнены отверстия малого диаметра, за счет которых весь поток жидкости делится на струйки, которые легко разрушаются в акустическом поле (создаваемом генератором Гартмана) камеры распыления 6. Получившийся газокпельный поток попадает на вход газокпельного сопла 7, где ускоряется и выбрасывается в атмосферу.

С точки зрения газовой динамики баллон представляет собой опорожняющуюся полость постоянного объема. Следовательно, уравнение адиабаты в дифференциальной форме может быть записано в виде

$$\frac{dP_1}{d\tau} = -kRT_1 \frac{1}{V_1} G_1, \quad (1)$$

где P_1 – давление газа в баллоне, Па;

τ – время, с;

k – показатель адиабаты газа;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T_1 – температура газа в баллоне, К;

V_1 – объем баллона, м³;

G_1 – массовый расход газа, кг/с.

На основании закона неразрывности потока можно утверждать, что массовый расход истекающего из баллона газа G_1 равен массовому расходу газа через редукционный клапан

$$G_1 = \mu_1 f_1 K \varphi(\sigma) / \sqrt{RT_1}, \quad (2)$$

где μ_1 – коэффициент расхода;

f_1 – площадь сечения регулирующего отверстия, м²;

$K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$ – коэффициент;

$$\varphi(\sigma) = \begin{cases} 0,528 & \text{при } 0 < \sigma \leq 0,528; \\ \sqrt{\sigma^{2/k} - \sigma^{(k+1)/k}} & \text{при } 0,528 < \sigma \leq 1; \end{cases} \quad (3)$$

$\sigma = \frac{P_p}{P_1}$ – отношение давлений;

P_p – давление настройки редукционного клапана, Па.

Работа редукционного клапана характеризуется постоянством выходного давления, то есть $P_p = \text{const}$. При этом расход газа G_1 , проходящего через регулирующее окно, – переменная величина. При редуцировании давления от 20 до 1 МПа температура газа уменьшается на $T_0 = 50$ К за счет эффекта Джоуля – Томсона [5]. Редуцированный и охлажденный газ поступает в газовую полость бака и вытесняет жидкость через линию ее подачи в ствол пожаротушающей установки. Газовая полость бака представляет собой наполняющуюся полость переменного объема, уравнение адиабаты которой можно представить в виде

$$kRT_2 (G_1 - G_2) = kP_p \frac{dV_2}{d\tau} + V_2 \frac{dP_p}{d\tau}, \quad (4)$$

где $T_2 = T_1 - T_0$ – температура газа в баке, К;

G_2 – массовый расход газа, поступающего в газодинамическое сопло, кг/с;

V_2 – объем газа в баке, м³.

С учетом того, что $P_p = \text{const}$, уравнение (4) упрощаем

$$\frac{dV_2}{d\tau} = R(T_1 - T_0) \frac{1}{P_p} (G_1 - G_2). \quad (5)$$

Полученное уравнение (5) – уравнение объемного расхода газа, поступающего в бак при постоянном давлении. Очевидно, что объем поступившего в бак газа равен объему вытесненной жидкости, то есть при взаимодействии газового и жидкостного потоков сохраняется закон неразрывности потока. На основании этого запишем уравнение, связывающее расход газа, поступающего в бак, и расход воды, поступающей через отверстия распылительного диска,

$$R(T_1 - T_0) \frac{1}{P_p} (G_1 - G_2) = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2(P_p - P_k)}{\rho}}, \quad (6)$$

где μ_2 – коэффициент расхода отверстия распылительного диска;

f_2 – суммарная площадь сечений отверстий распылительного диска, м²;

P_k – давление в камере распыления, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Давление P_k найдем на основе следующих рассуждений. Для создания акустического поля в камере распыления скорость течения газа на выходе из газодинамического сопла должна превосходить скорость звука, то есть $M > 1$, где M – число Маха.

$$\text{Поскольку } M = \frac{v}{a},$$

где v – скорость газа на выходе газодинамического сопла, м/с;

a – местная скорость звука, м/с,

то с учетом того, что

$$v = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R(T_1 - T_0 - T_k)};$$

$$a = \sqrt{kRT_k},$$

где T_k – температура газа в камере распыления, К, получаем

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \frac{T_1 - T_0 - T_k}{T_k}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим

$$T_k = \frac{T_1 - T_0}{0,5M^2(k-1) + 1}. \quad (8)$$

С другой стороны, для адиабатического процесса выполняется соотношение

$$\frac{T_k}{T_1 - T_0} = \left(\frac{P_k}{P_p} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

из которого имеем

$$T_k = (T_1 - T_0) \left(\frac{P_k}{P_p} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (9)$$

Приравнивая правые части уравнений (8) и (9), получаем уравнение

$$\left[0,5M^2(k-1) + 1 \right]^{-1} = \left(\frac{P_k}{P_p} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Отсюда находим

$$\frac{P_k}{P_p} = \left[0,5M^2(k-1) + 1 \right]^{\frac{k}{1-k}}. \quad (10)$$

На графике показана зависимость относительного давления P_k / P_p от числа Маха для двухатомного газа (рис. 2).

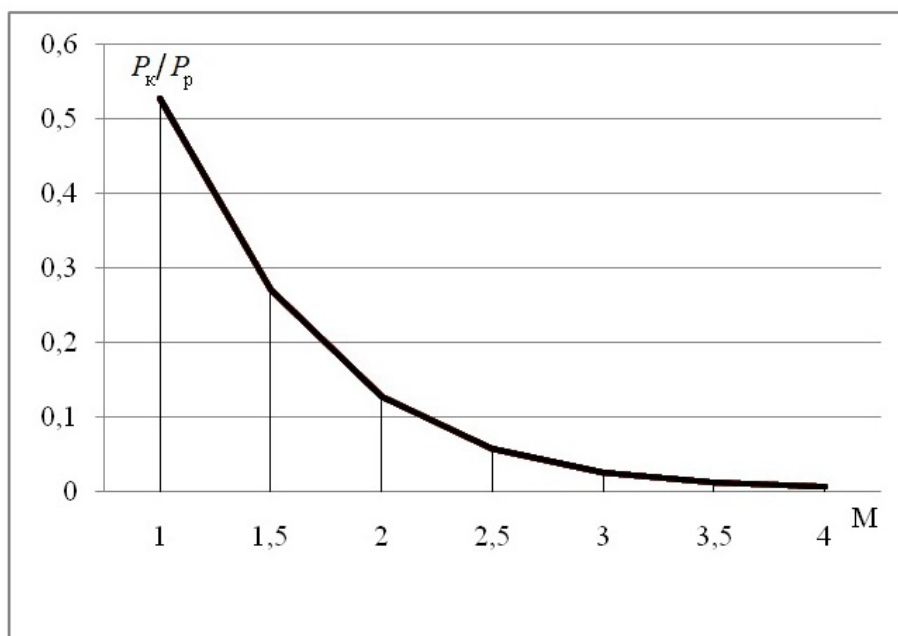


Рис. 2. Зависимость относительного давления от скорости газа

Из рис. 2 видно, что относительное давление в камере распыления резко падает с увеличением M . При проектировании пожаротушающего устройства

с акустическим распылением воды важно создать в камере распыления сверхзвуковой газовый поток для возбуждения генератора акустических колебаний, то есть должно быть $M > 1$. С другой стороны, согласно рис. 2 при увеличении M резко снижается давление P_k в камере распыления. P_k является входным давлением для газокапельного сопла и влияет на скорость капель на срезе сопла. То есть при увеличении M уменьшается P_k и снижается скорость газокапельного потока.

Компромиссным решением, удовлетворяющим условию работы генератора акустических колебаний и получения высокоскоростного капельного потока на срезе сопла, является выбор такого M , при котором относительное давление $\frac{P_k}{P_p}$ наибольшее. Согласно графику (рис. 2) и с учетом технологических погрешностей изготовления выбираем $1,0 < M \leq 1,1$. Этому диапазону соответствует, например, отношение $\frac{P_k}{P_p} = 0,5$. Тогда при $P_p = 1$ МПа получаем $P_k = 0,5$ МПа.

Уравнения (1) – (3), (5), (6), (10) позволяют определить давление, температуру и расход газа в баллоне, расход и скорость пожаротушащей жидкости, подаваемой в ствол, площадь отверстий распылительного диска.

Испытания макетного образца ствола пожаротушащего устройства со встроенным в камеру распыления манометром (рис. 3) подтвердили правильность проведенных расчетов и конструктивных решений. Давление в установившемся режиме соответствовало значению 0,5 МПа.



Рис. 3. Макетный образец ствола пожаротушащего устройства

Выводы.

1. Разработана математическая модель подачи пожаротушающей жидкости в камеру акустического распыления ствола пожаротушающей установки.

2. Показано, что оптимальное значение давления в камере распыления зависит от условия возбуждения генератора акустических колебаний и получения наибольшей скорости газочапельного потока на срезе сопла. Этим двум условиям соответствует узкий диапазон давлений $0,500 \leq P_k < 0,528$ МПа при редуцирующем давлении $P_p = 1$ МПа.

3. Проведенные измерения давления P_k в камере распыления макетного образца пожаротушающей установки подтвердили приведенные теоретические расчеты.

Список литературы / References

1. Андриюшкин, А.Ю. Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением / А.Ю. Андриюшкин, Н.Т. Пелех // Вестник С.-Петерб. ун-та гос. противопожар. службы МЧС России. – 2012. – № 1. – С. 53 – 58.

Andryushkin A.Yu., Pelekh N.T. *Poluchenie tonkoraspylyonnoi vody gazodinamicheskim raspyleniem* [Generation of water mist by gas-dynamic atomizing]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii – Bulletin of the Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia*, 2012, no. 1, pp. 53-58. (In Russian).

2. Лісняк, А.А. Підвищення ефективності гасіння пожеж твердих горючих матеріалів в будівлях / А.А. Лісняк, П.Ю. Бородич, Н.В. Покідін // Проблеми пожежної безпеки. – 2013. – № 34. – С. 115 – 119.

Lisniak A.A., Borodych P.Yu., Pokidin N.V. *Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh tverdykh horiuchykh materialiv v budivliakh* [Enhancement of effectiveness of suppression of fires involving solid flammable materials in buildings]. *Problemy pozharnoi bezopasnosti – Problems of fire safety*, 2013, no. 34, pp. 115-119. (In Ukrainian).

3. Цой, А.С. Режимы и механизмы подавления пламени распыленной водой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2016. – 21 с.

Tsoi A.S. *Rezhimy i mekhanizmy podavleniya plameni raspylyonnoi vodoi: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Modes and mechanisms of flame suppression by atomized water: Cand. tech. sci. diss. abstract]. St. Petersburg, 2016, 21 p. (In Russian).

4. Душкин, А.Л. Первичные средства пожаротушения для Арктики / А.Л. Душкин, С.Е. Ловчинский, Н.Н. Рязанцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 5. – С. 66 – 73.

Dushkin A.L., Lovchinskii S.E., Ryazantsev N.N. *Pervichnye sredstva pozharotusheniya dlya Arktiki* [Primary fire-fighting equipment for the Arctic].

Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 66-73. (In Russian).

5. Ультразвуковое пожаротушащее устройство / В.Г. Агеев, Г.И. Пейтибай, Н.А. Галухин, А.В. Еремин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 4(56). – С. 7 – 16.

Ageyev V.G., Peftibay G.I., Galukhin N.A., Yeryomin A.V. *Ul'trazvukovoe pozharotushashhee ustroistvo* [Ultrasonic fire-extinguishing device]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 4(56), pp. 7-16. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 11.02.2021

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

MATHEMATICAL MODEL OF FLUID MOTION IN FIRE-EXTINGUISHING DEVICE WITH ACOUSTIC ATOMIZATION

Purpose. Development of the mathematical model of fire-extinguishing fluid motion in the acoustic atomization device for confirming the optimum parameters of a nozzle.

Methods. Analytical methods for investigation of gas-hydrodynamics, continuity of flow, liquid discharge through a perforation; experimental investigations of pressure inside the atomization chamber.

Results. The mathematical model has been developed for motion of the fire-extinguishing fluid during its displacement into the atomization chamber by the compressed gas. The relative pressure dependence in the atomization chamber of the nozzle on the Mach number has been obtained.

Scientific novelty. It has been established that for ensuring the normal operation of the acoustic oscillator and for generating the highest velocity of the gas-and-drop flow at the nozzle cut the velocity of the gas flow at the gas-dynamic nozzle exit should be within the range of 1.0M...1.1M and the relative pressure in the atomization chamber should be within the range of 0.500...0.528.

Practical value. Numerical realization of the proposed mathematical model makes it possible to determine the construction parameter of the nozzle, i.e. the total area of the atomization disk perforations. The derived range of relative pressure variation in the atomization chamber makes it possible to determine the optimum pressure which is the boundary condition for the system of differential equations of the two-phase flow motion in the channel of the gas-dynamic nozzle, and to substantiate theoretically the optimum nozzle geometric profile for improvement of fire extinguishment effectiveness.

Keywords: *mathematical model; fire extinguishment; acoustic atomization; gas-dynamic nozzle; gas-and-drop flow; atomization chamber.*

УДК 544.3-971.2+614.841.12

Алина Анатольевна Берестовая, ст. преп.; e-mail: berestova865@gmail.com;

Валерий Васильевич Шаповалов, д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой

e-mail: wwshapovalov@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+38 062) 301-03-09

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ОКСИДНО- И ПЕРОКСИДНО-СОЛЕВЫХ СИСТЕМАХ

Цель. Определение термодинамических параметров реакций горения в твердофазных системах, содержащих соли двухвалентных металлов и оксиды натрия – Na_2O , Na_2O_2 , NaO_2 .

Методы. Использованы фундаментальные положения химической термодинамики для определения энергетических характеристик реакций.

Результаты. Проанализировав реакции взаимодействия оксида, пероксида и супероксида натрия с солями ряда двухвалентных металлов, установили, что тепловыделение реакций и развиваемая температура в процессе взаимодействия предопределяют их протекание в режиме горения. Теплота реакций и температура в зоне горения уменьшаются в ряду $\text{Na}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}_2-\text{NaO}_2$. Температура горения солей с соединениями натрия снижается в ряду $\text{MeCl}_2-\text{MeSO}_4-\text{Me}_3(\text{PO}_4)_2-\text{Me}(\text{NO}_3)_2$. Теплота горения коррелирует с потенциалами ионизации металлов, образующих соли.

Научная новизна. Предложены новые химические реакции оксидных соединений щелочных металлов с солями двухвалентных металлов и определены их термодинамические характеристики.

Практическая значимость. Могут быть использованы при создании автономных химических источников кислорода и тепловыделяющих элементов, синтезе суперпарамагнетиков и другой функциональной керамики, утилизации солей тяжелых металлов и отработавших ресурс пероксидных составляющих индивидуальных и коллективных средств защиты органов дыхания и регенерации атмосферы.

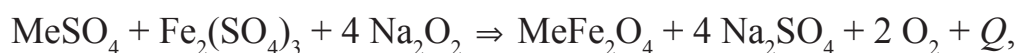
Ключевые слова: *горение; термодинамика; оксидные соединения; пероксид натрия; супероксид натрия; соли; теплота реакции; температура горения.*

Постановка проблемы. Изучение параметров процесса горения в смесевых твердофазных системах на основе оксидных соединений щелочных металлов и солей двухвалентных металлов.

Анализ последних исследований. Оксидные соединения щелочных и щелочноземельных металлов, в частности пероксиды и супероксиды, находят широкое применение в кислородных генераторах, в пиротехнике; для извлечения урана из рудных концентратов; для получения некоторых полупроводниковых материалов; в средствах спасения. Также их используют для отбеливания разных материалов, для получения пенопластов, пористого бетона, для консервирования пищевых продуктов, в хлебопечении, в косметической промышленности, для получения стиральных порошков, в медицине и других областях, что отражено в основополагающей монографии [1] и в дальнейшем проанализировано в работе [2].

Пероксидные и супероксидные соединения типа Me_2O_2 и MeO_2 , где Me – ионы одно- или двухвалентных металлов, широко используют в системах

получения кислорода [3, 4]. Из-за высокой реакционной способности данных соединений их реакции с разными классами соединений, в частности с оксидами и солями, могут протекать в режиме горения. Особый интерес вызывает получение с помощью пероксидных соединений особых наноразмерных материалов общей формулы $MeFe_2O_4$, проявляющих свойства суперпарамагнетиков [5, 6]. Последние представляют собой порошки, обладающие значительными магнитными свойствами, их могут применять в разных областях: от создания магнитных жидкостей для регулируемых автомобильных амортизаторов до применения в медицине в качестве средств целенаправленной доставки лекарств под действием магнитного поля к пораженному органу [7]. Реакции образования суперпарамагнетиков изучены только при использовании композиций сульфатов металлов с пероксидами натрия и в целом соответствуют уравнению [5]



где $Me - Co^{+2}, Ni^{+2}, Zn^{+2}$.

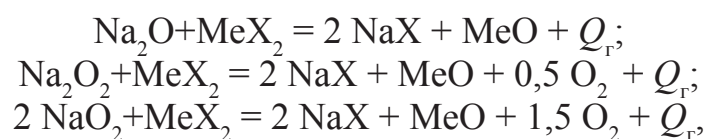
Реакции протекают в режиме горения с температурой во фронте реакции от 800 до 1300 К в зависимости от качественного и количественного состава композиций, легко инициируются и сопровождаются выделением кислорода.

Вследствие особенностей взаимодействия работоспособными соединениями, а также с составами, их содержащими, невозможно осуществлять без должного внимания к технике безопасности и к противопожарным мероприятиям. Поэтому теоретический анализ возможных последствий использования пероксидных соединений важен как с точки зрения практического применения, так и с точки зрения безопасности их использования в производстве.

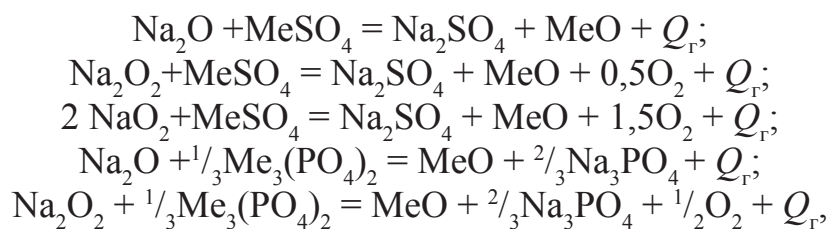
Цель работы – определение термодинамических параметров реакций горения в твердофазных системах, содержащих соли двухвалентных металлов и оксиды натрия – Na_2O, Na_2O_2, NaO_2 .

Метод исследования. Теоретический термодинамический анализ на основе фундаментальных характеристик, участвующих в реакциях веществ. Экспериментально определяли скорости горения ряда анализируемых систем. Образцы композиций для исследований диаметром 10, 20, 40 мм и высотой до 60 мм прессовали под давлением 1000...1500 кгс/см². Линейную скорость горения определяли, исходя из длины образца и времени горения. Инициировали процесс керамической пластинкой с температурой 1073 К.

Результаты исследований и их анализ. Взаимодействие оксидных соединений натрия с солями можно представить в виде следующих уравнений реакций:



где $X - Cl^-, NO_3^-$,



где Me – Mn^{+2} , Fe^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Ba^{+2} ;

Q_r – теплота горения.

Особенность данных реакций заключается в том, что в отличие от общепринятых классических представлений о горении как о процессе, требующем наличия топлива и окислителя, в них источник теплоты – обмен атомов между участниками реакции. И в данном случае теряется смысл между понятиями топлива и окислителя. В случае с пероксидными и супероксидными соединениями, наоборот, образуется окислитель в виде кислорода. Тепловыделение приведенных выше реакций при стандартных условиях в термодинамической системе определили по формуле

$$Q_r = \sum_{y=1}^m \nu_y \Delta H_y - \sum_{i=1}^n \nu_i \Delta H_i, \quad (1)$$

где Q_r – теплота горения, кДж/моль;

ν_i – стехиометрический коэффициент i -го компонента в продуктах горения;

ν_y – стехиометрический коэффициент y -го компонента в исходной смеси;

ΔH_y и ΔH_i – энтальпии образования исходных веществ и продуктов реакции соответственно, при стандартных условиях, кДж/моль [8];

n и m – количество молей, участвующих в реакции исходных соединений и продуктов.

Расчет теоретической температуры в зоне горения проводили, исходя из условия, что энтальпия продуктов реакции при заданной температуре равна энтальпии исходных веществ при стандартной температуре. Исходя из этого положения, теплота горения направлена на разогрев продуктов реакции до температуры горения и осуществление в них фазовых превращений согласно формуле

$$Q_{\text{расч}}(T) = \sum_{i=1}^u \nu_i \int_{T_0}^T C_p^i(T) dT + \sum_i \nu_i \phi_j \Delta H_{\phi_i}, \quad (2)$$

где $C_p^i(T) = a_i + b_i T + d_i / T^2$ – теплоемкость i -го продукта горения как функция температуры и его фазового состояния, кДж/(моль·К);

ΔH_{ϕ_i} – теплота фазовых переходов в продуктах горения, кДж/моль;

ϕ_j – степень j -го фазового превращения i -го продукта горения;

- n – количество фазовых переходов в продуктах горения в интервале температуры $T - T_0$;
 u – число химических соединений в продуктах реакции;
 T_0 – начальная температура, К;
 T – температура в зоне горения, К.

Уравнение (2) относительно температуры горения и степени фазового превращения – трансцендентное и решалось методом итераций до выполнения условия

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{расч}}(T).$$

При выбранной температуре состав должен соответствовать состоянию продуктов горения в области их существования при данной температуре, что рассмотрено на примере сульфатов и хлоридов металлов (рис. 1). Так, на участке 5 продукты горения представляют собой расплавленный Na_2SO_4 и твердый оксид двухвалентного металла. На вертикальных участках при постоянной температуре один из продуктов реакции находится в разных политропных или агрегатных состояниях, что при расчете учитывается величиной степени фазового превращения φ_j . Таким образом, определяют не только температуру горения, но и фазовый состав продуктов горения.

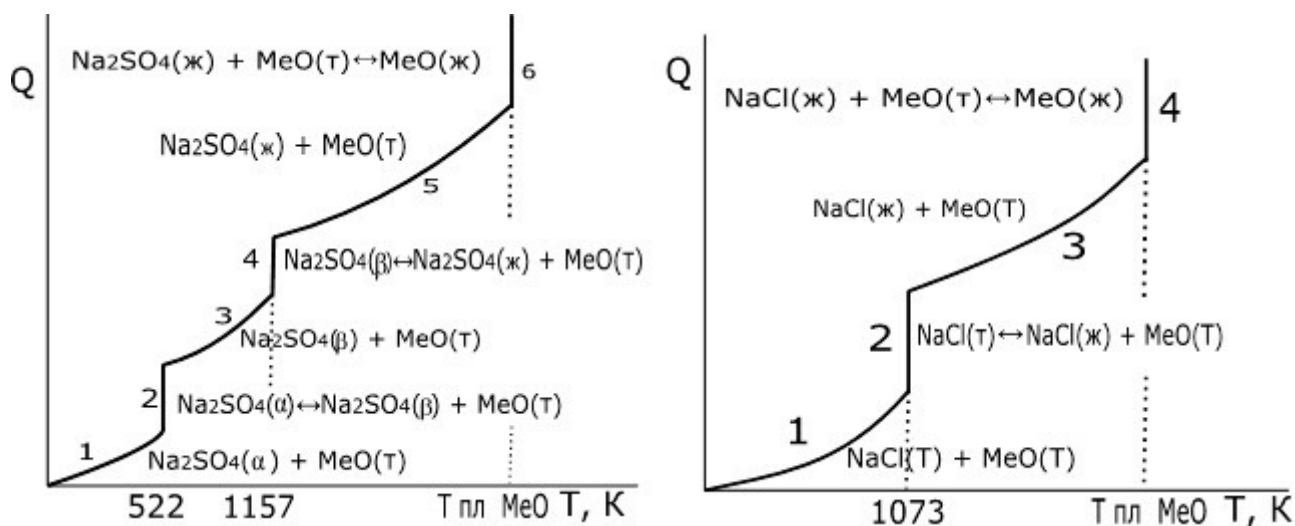


Рис. 1. Диаграммы состояния продуктов взаимодействия оксидных соединений натрия с сульфатами и хлоридами двухвалентных металлов.

Скачки на кривых соответствуют фазовым превращениям:

$T = 1157$ К и $T = 1073$ К – температуры плавления Na_2SO_4 и NaCl ; $T_{\text{пл MeO}}$ – температура плавления оксида двухвалентного металла

Результаты расчета теплоты и теоретической температуры горения стехиометрических систем, содержащих соли двухвалентных металлов с оксидом, пероксидом и супероксидом натрия, приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Теплота горения, температура и прогнозируемая линейная скорость горения $U_{пр}$ оксидных соединений натрия с хлоридами двухвалентных металлов

Соединения	Na ₂ O			Na ₂ O ₂				NaO ₂			
	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин		Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин	
						$U_{пр}$	$U_{эксп}$			$U_{пр}$	$U_{эксп}$
MnCl ₂	312,02	1720	1610	214,32	1135	59		205,54	1073	41	
FeCl ₂	331,08	1770	2135	233,38	1200	86		224,60	1073	41	
CoCl ₂	336,85	1870	3754	239,15	1275	131	111	230,37	1100	48	32
NiCl ₂	343,54	1845	3260	245,84	1265	124	146	237,06	1100	48	50
CuCl ₂	349,44	1845	3260	251,74	1285	138		242,96	1115	53	
ZnCl ₂	343,53	1890	4202	245,83	1290	142		237,05	1120	55	
MgCl ₂	367,81	1738		272,41	1440			264,81	1247		
CaCl ₂	244,93	1345		149,53	1073			141,93	827		
BaCl ₂	104,86	1030		9,46	390			1,86	315		

Таблица 2

Теплота горения, температура и прогнозируемая линейная скорость горения $U_{пр}$ оксидных соединений натрия с фосфатами двухвалентных металлов

Соль	Na ₂ O			Na ₂ O ₂		
	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин
Mn ₃ (PO ₄) ₂	201,2	1352	202	105,8	819	10
Zn ₃ (PO ₄) ₂	243,5	1560	653	148,1	1033	33
Mg ₃ (PO ₄) ₂	207,4	1410	280	32,7	–	–
Ca ₃ (PO ₄) ₂	123,2	950	21	31,1	–	–
Ba ₃ (PO ₄) ₂	63,1	630	3	–62,1	–	–

Таблица 3

Теплота горения, температура и прогнозируемая линейная скорость горения $U_{пр}$ оксидных соединений натрия с сульфатами двухвалентных металлов

	Na ₂ O			Na ₂ O ₂				NaO ₂			
	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин	Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин		Q_p , кДж/моль	T, К	$U_{пр}$, мм/мин	
						$U_{пр}$	$U_{эксп}$			$U_{пр}$	$U_{эксп}$
MnSO ₄	293,00	1392	253	195,31	1055 1287*	37 140	96	186,52	945	20	77

Окончание табл. 3

	Na ₂ O			Na ₂ O ₂				NaO ₂			
	Q _г , кДж/моль	T, К	U _{пр} , мм/мин	Q _г , кДж/моль	T, К	U _{пр} , мм/мин		Q _г , кДж/моль	T, К	U _{пр} , мм/мин	
						U _{пр}	U _{эксп}			U _{пр}	U _{эксп}
FeSO ₄	311,92	1442	335	214,22	1110	52	63	205,43	998	27	45
CoSO ₄	324,63	1532	557	226,93	1157	67	–	218,14	1057	38	42
NiSO ₄	340,91	1554	631	243,21	1157	67	67	234,42	1090	46	36
CuSO ₄	360,78	1584	747	263,09	1182	77	63	254,30	1140	61	–
ZnSO ₄	343,93	1592	782	246,23	1157	67	67	237,44	1112	52	49
MgSO ₄	294,17	1415	288	198,77	1080	43		191,17	972	24	20
CaSO ₄	168,36	990	26	72,96	578	–	–	65,36	520	–	–
BaSO ₄	63,29	612	3	–32,11	–	–	–	–39,71	–	–	–

* Расчет на образование в качестве продукта Mn₃O₄.

Таблица 4

Теплота горения, температура и прогнозируемая линейная скорость горения U_{пр} оксидных соединений натрия с нитратами двухвалентных металлов

Соль	Na ₂ O			Na ₂ O ₂		
	Q _г , кДж/моль	T, К	U _{пр} , мм/мин	Q _г , кДж/моль	T, К	U _{пр} , мм/мин
Mn(NO ₃) ₂	328,4	1155	66	233,00	870	13
Co(NO ₃) ₂	326,48	1160	68	231,08	870	13
Ni(NO ₃) ₂	332,71	1155	66	237,31	872	13
Cu(NO ₃) ₂	365,79	1230	101	270,39	953	21
Zn(NO ₃) ₂	384,12	1312	161	288,72	1016	30
Mg(NO ₃) ₂	330,25	1170	72	232,55	875	14
Ca(NO ₃) ₂	218,18	850	12	120,48	565	–
Ba(NO ₃) ₂	87,97	520	–	–9,73	–	–

Анализ полученных результатов исследований показывает, что наибольшее тепловыделение происходит при горении систем, содержащих оксидные соединения натрия и нитраты металлов. В ряду Mn⁺²–Fe⁺²–Co⁺²–Ni⁺²–Cu⁺²–Zn⁺², включающем металлы одного периода периодической системы, наблюдается некоторое усиление тепловыделения с увеличением молекулярной массы металла (рис. 2).

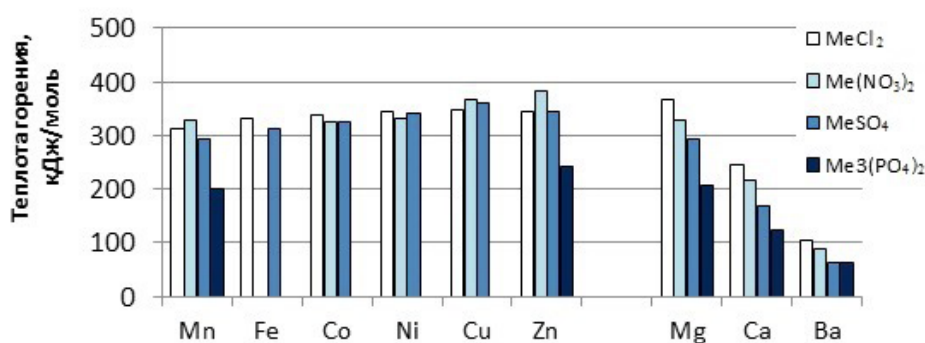


Рис. 2. Зависимость теплоты горения при взаимодействии в системе Na_2O –соль от природы соли

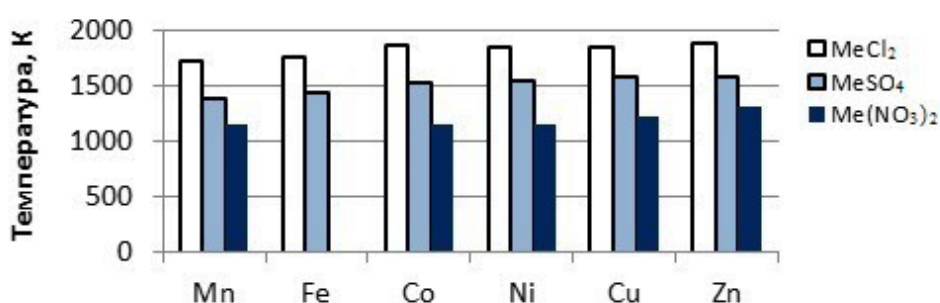


Рис. 3. Зависимость температуры горения при взаимодействии в системе Na_2O –соль от природы соли

При этом теплота горения в системах, содержащих фосфаты приведенных металлов, значительно меньше, чем хлоридов, сульфатов и нитратов. В пределах группы периодической системы в ряду Mg^{+2} – Ca^{+2} – Ba^{+2} , наоборот, происходит снижение теплоты реакции по мере увеличения порядкового номера металла в ряду Mg – Ca – Ba (см. рис. 2). При примерном равенстве теплоты в системах, содержащих MeCl_2 , MeSO_4 и $\text{Me}(\text{NO}_3)_2$, температура горения существенно ниже у нитратов (см. рис. 3). Это связано с расходом теплоты горения на фазовые превращения образующегося NaNO_3 и его высокой теплоемкостью. Пониженная температура горения систем с фосфатами (табл. 2) обусловлена в основном малыми тепловыми эффектами. Согласно полученным данным, и теплота, и температура горения уменьшаются в ряду Na_2O – Na_2O_2 – NaO_2 . Для ряда систем, содержащих Na_2O_2 и NaO_2 , вследствие малой теплоты горение проблематично. Это относится в основном к системам, содержащим фосфаты и сульфаты магния, кальция и бария (см. табл. 2 и 3). Следует отметить, что теплота в рассмотренных реакциях хорошо коррелирует с суммой первых двух потенциалов ионизации металлов, образующих соли (рис. 4) [9].

Экспериментальные данные по скорости горения систем, приведенные в табл. 1 и 3, позволяют аппроксимировать зависимость скорости горения от температуры уравнением

$$\lg U = 0,00245T - 1,007.$$

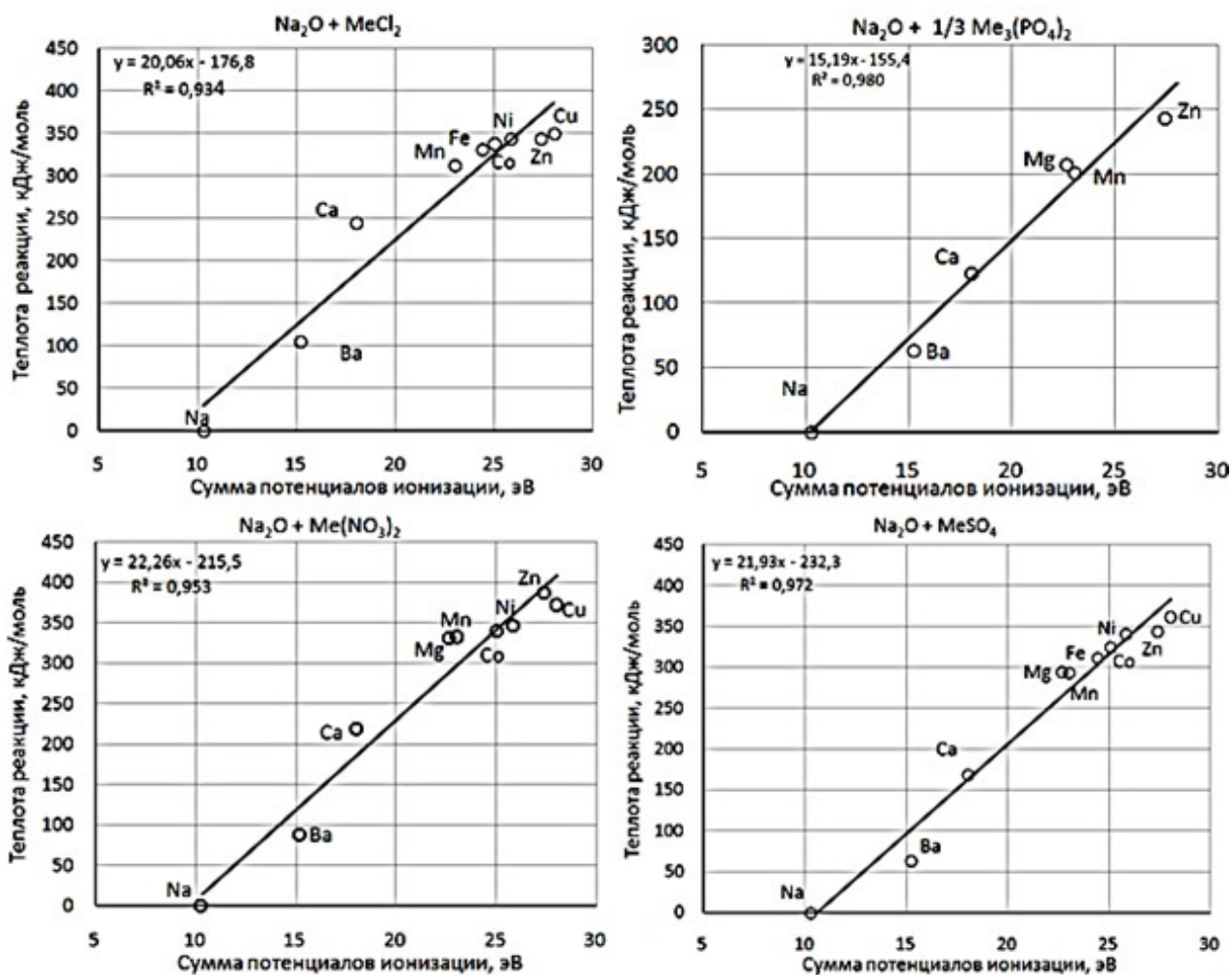


Рис.4. Зависимость теплоты реакции солей металлов с оксидом натрия от суммы потенциалов ионизации металлов, образующих соль

Прогнозируемые по данному уравнению скорости горения систем приведены в табл. 1–4. Из анализа следует, что наибольшую скорость горения можно наблюдать при взаимодействии оксида натрия с хлоридами металлов и достигать до ~ 4 мм/мин (см. табл. 1). В системах, содержащих сульфаты и фосфаты металлов, а также оксид натрия, скорости горения намного ниже. При замене оксида натрия на пероксид и далее на супероксид натрия скорости горения снижаются и находятся в диапазоне 13...150 мм/мин, а в некоторых системах горение проблематично. Соли марганца (см. табл. 3) отличаются высокой скоростью горения. Рентгенофазовым анализом установлено, что при взаимодействии с пероксидными соединениями помимо оксида MnO образуется Mn_3O_4 . Это приводит к дополнительному повышению температуры горения и, соответственно, скорости горения. В целом наблюдается удовлетворительная корреляция между температурой и скоростью горения. Но это вряд ли относится к системам, содержащим нитраты металлов. Вследствие низкой температуры горения такие системы должны иметь невысокую скорость горения (см. табл. 4).

Имеются единичные данные [10], в частности по системе $\text{NaO}_2 + \text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, в которой при $T = 777 \text{ K}$ скорость горения достигает высоких значений 101 мм/мин. При этом реакция начинается при низкой температуре и сопровождается образованием большого количества расплава. Можно ожидать, что системы с нитратами металлов и оксидами натрия из-за образования легкоплавкого NaNO_3 будут отличаться высокой скоростью горения по сравнению с прогнозируемой.

Выводы. В результате термодинамического анализа новых реакций горения солей двухвалентных металлов с оксидными соединениями натрия установлено, что теплота и температура горения уменьшаются в ряду $\text{Na}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}_2 - \text{NaO}_2$, причем теплота горения усиливается пропорционально увеличению энергии ионизации атомов металлов, образующих соль. В тепловом отношении наибольшую опасность при использовании представляют системы, содержащие оксид натрия, горение которых кроме высокой температуры сопровождается образованием жидких высокотемпературных продуктов. Горение систем с Na_2O_2 и NaO_2 протекает при более низких температурах, но сопровождается выделением горячего кислорода, становящегося инициатором вторичных возгораний. Наибольшую потенциальную опасность представляют смеси, содержащие нитраты металлов, поскольку при их горении во всех случаях образуется расплавленный нитрат натрия, являющийся в горячем состоянии сильнейшим окислителем. В системах с пероксидом или супероксидом в газообразной фазе также будет выделяться кислород. Целесообразно избегать использования систем оксидных соединений натрия с нитратами металлов вследствие повышения опасности ведения работ.

Список литературы / References

1. Вольнов, И.И. Перекиси, надперекиси и озониды щелочных и щелочноземельных металлов / И.И. Вольнов. – М.: Наука, 1964. – 123 с.

Vol'nov I.I. *Perekisi, nadperekisi i ozonidy shhelochnykh i shhyolochnozemelnykh metallov* [Peroxides, superoxides and ozonides of alkaline and alkaline earth metals]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 123 p. (In Russian).

2. Анализ результатов проведенных исследований в области химии перекисных соединений / С.Р. Артемьев, С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий, В.П. Шапоров. – Тамбов: ТГТУ, 2007. – 11 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/4908/1/converted_file_f1fa6d4d.pdf.

Artem'ev S.R., Dvoretckii S.I., Dvoretckii D.S., Shaporov V.P. *Analiz rezul'tatov provedennykh issledovaniy v oblasti khimii perekisnykh soedinenii* [Analysis of results of investigations carried out in the field of chemistry of peroxide compounds]. Tambov, TGTU Press, 2007, 11 p. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/4908/1/converted_file_f1fa6d4d.pdf. (In Russian).

3. Шаповалов, В.В. Низкотемпературное горение в пероксидно-солевых системах / В.В. Шаповалов, А.А. Берестовая // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2019. – № 1(56). – С. 110 – 117.

Shapovalov V.V., Berestovaya A.A. *Nizkotemperaturnoe gorenje v peroxidno-solevykh sistemakh* [Low-temperature combustion in peroxide-salt systems]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": sci. techn. journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 110-117. (In Russian).

4. Шаповалов, В.В. Химия простых и координационных соединений источников и переносчиков молекулярного кислорода: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Киев, 2004. – 40 с.

Shapovalov V.V. *Khimiya prostykh i koordinatsionnykh soedinenii istochnikov i perenoschikov molekulyarnogo kisloroda: avtoref. dis. ... d-ra khim. nauk* [Chemistry of simple and coordination compounds of sources and carriers of molecular oxygen: Dr. chem. sci. diss. abstract]. Kiev, 2004, 40 p. (In Russian).

5. Берестовая, А.А. Синтез суперпарамагнетиков в режиме самораспространяющегося взаимодействия в системах $\text{MeSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$ / А.А. Берестовая, В.В. Шаповалов // Физико-химия и технология неорганических материалов: XII Российская конференция молодых научных сотрудников и аспирантов. – М., 2015. – С. 17 – 18.

Berestovaya A.A., Shapovalov V.V. *Sintez superparamagnetikov v rezhime samorasprostranyayushhegosya vzaimodeistviya v sistemakh $\text{MeSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$* [Synthesis of superparamagnetics in the mode of reciprocal action in the systems $\text{MeSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$]. *Fiziko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov: XII Rossiiskaya konferentsiya molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Physics and chemistry and technology of inorganic materials: The 12th Russian conference of young research assistants and postgraduates]. Moscow, 2015, pp. 17 – 18. (In Russian).

6. Шаповалов, В.В. Самораспространяющееся взаимодействие в системе $\text{CoSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2$ / В.В. Шаповалов, А.А. Берестовая // Научные труды ДОНТУ. Сер.: Химия и химическая технология. – 2014. – Вып. 1. – С. 71 – 81.

Shapovalov V.V., Berestovaya A.A. *Samorasprostranyayushheesya vzaimodeystvie v sisteme $\text{CoSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2$* [The reciprocal action in a system $\text{CoSO}_4\text{-Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-NaO}_2$]. *Nauchnye Trudy DonNTU. Ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Academic papers of the Donetsk national technical university. Chemistry and chemical technology series*, 2014, issue 1, pp. 71 – 81. (In Russian).

7. Губин, С.П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи химии. – 2005. – Т. 74. – С. 539 – 574.

Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B., Yurkov G.Yu. *Magnitnye nanochastitsy: metody polucheniya, stroenie i svoystva* [Magnetic nanoparticles: methods of generation, structure and properties]. *Uspekhi khimii – Progress of Chemistry*, 2005, vol. 74, pp. 539-574. (In Russian).

8. Термические константы веществ // База данных. Ин-т теплофизики экстремальных состояний РАН; МГУ. URL: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.htm>.

Termicheskie konstanty veshchestv [Thermal constants of substances]. *Baza dannykh. Institut teplofiziki ekstremal'nykh sostoyanii RAN, MGU* [Data base. Institute of Thermal Physics of Extremal States of RAN, MGU]. Available at: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.htm>.

9. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л.В. Гурвич, Г.В. Карачевцев, В.Н. Кондратьев [и др.]. – М.: Наука, 1974. – 351 с.

Gurvich L.V., Karachevtsev G.V., Kondrat'ev V.N. [et al.]. *Energii razryva khimicheskikh svyazei. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu* [Energies of chemical bonds rupture. Ionization potentials and affinity with electron]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 351 p. (In Russian).

10. Шаповалов, В.В. Самораспространяющееся взаимодействие пероксидных соединений натрия с нитратом кадмия / В.В. Шаповалов, Ю.Н. Бажутина // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – № 1. – С. 15 – 16.

Shapovalov V.V., Bazhutina Yu.N. *Samorasprostranyayushheesya vzaimodeistvie peroksidnykh soedinenii natriya s nitratom kadmiya* [The reciprocal action of peroxide sodium compounds with cadmium nitrate]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii – Problems of Chemistry and Chemical Technology*, 2006, no. 1, pp. 15 – 16. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 18.04.2022

Alina Anatolyevna Berestovaya, lecturer; e-mail: berestova865@gmail.com;

Valery Vasilyevich Shapovalov, Dr. Sci. (Chem.), prof., head of chair; e-mail: wwshapovalov@gmail.com

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-87

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF COMBUSTION PROCESS IN OXIDE- AND PEROXIDE-SALT SYSTEMS

Purpose. Determination of thermodynamic parameters of combustion reactions in solid-phase systems containing the salts of bivalent metals and sodium oxides Na_2O , Na_2O_2 , NaO_2 .

Methods. The methodology is based on the use of fundamental regulations of the chemical thermodynamics for determination of energetic characteristics of reactions.

Results. After the analysis of interaction reactions of sodium oxide, peroxide and superoxide with the salts of a number of bivalent metals it has been ascertained that the heat generation of the reactions and the temperature developed in the process of interaction predetermine their behavior in the combustion mode. The reaction heat and temperature in the reaction zone decrease in some cases of $\text{Na}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}_2-\text{NaO}_2$. The temperature of burning the salts with the sodium compounds diminishes in some cases of $\text{MeCl}_2-\text{MeSO}_4-\text{Me}_3(\text{PO}_4)_2-\text{Me}(\text{NO}_3)_2$. The combustion heat correlates with the potentials of the metals ionization generating the salts.

Scientific novelty. The novel chemical reactions of oxide compounds of the alkaline metals with the salts of bivalent metals have been proposed and their thermodynamic characteristics have been determined.

Practical value. Creation of the autonomous chemical oxygen sources and heat-generating elements, synthesis of the superparamagnetics and other functional ceramics, utilization of heavy metals salts and spent resource peroxide components of the individual and collective protective means of respiratory organs and atmosphere regeneration.

Keywords: *combustion; thermodynamics: oxide compounds; sodium peroxide; sodium superoxide; salts; heat of the reaction; combustion temperature.*

УДК 614.841.315

*Николай Юрьевич Чубучный, гл. гос. инспектор по пожарному надзору; e-mail: mchs-dnr@mail.ru
Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР*

283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел.: (+38 062) 342-69-26

Елена Ивановна Добрякова, науч. сотр.; 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) 332-78-44

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОЖАРНОГО АУДИТА

Цель. Исследовать методы оценки соответствия фактического противопожарного состояния объектов нормативным требованиям при проведении пожарного аудита и обследовании объектов инспектором государственного пожарного надзора для усиления контроля качества его работы.

Методы. Информационно-аналитические методы оценки противопожарного состояния объектов.

Результаты. Характеризуются высокой степенью значимости, поскольку относятся к важнейшей проблеме – внедрению современных технологий в систему проведения экспертных оценок предписаний инспекторов государственного пожарного надзора.

Научная новизна. Предложено использовать программное обеспечение для оценки эффективности деятельности государственного пожарного надзора.

Практическая значимость. Представленный подход позволит усилить контроль качества работы инспектора государственного пожарного надзора.

Ключевые слова: *пожарный аудит; государственный пожарный надзор; оценка рисков; компьютерные технологии; эффективность деятельности.*

Постановка проблемы. Государственный пожарный надзор (далее – ГПН) – элемент системы обеспечения пожарной безопасности, одна из функций которого – профилактика пожаров.

На нынешнем этапе технического развития возможны анализ не только количества и причин возникновения пожаров, оценка нанесенного ущерба, но и исследование других причинно-следственных параметров. Предположим, существует наличие взаимосвязи между качеством проведенной инспектором ГПН оценки соответствия пожарного состояния объекта нормативным требованиям и риском возникновения пожаров. В этом случае внедрение компьютерных технологий для проведения пожарного аудита предписаний инспектора позволит повысить качество противопожарного обследования объектов надзора.

Анализ последних исследований и публикаций. Научное сообщество рассматривает возможности внесения новых элементов в существующую структуру системы обеспечения пожарной безопасности объектов для повышения ее эффективности [1 – 4]. В.П. Молчанов [5] проводит анализ зарубежного опыта внедрения пожарного аудита и приходит к выводу, что аудит пожарной безопасности распространен в экономически развитых странах, но единые стандарты для его проведения отсутствуют.

Результаты анализа подходов к проведению пожарного аудита, выполненного авторами, представлены в таблице.

Анализ стандартов проведения пожарного аудита

Наименование страны	Субъекты аудита безопасности	Функции субъекта	Участники аудита	Примечание
Бельгия	Страховые компании	Оценивают риски в области пожарной безопасности	Страховая компания	Размер страховой премии является результатом договоренности страховой компании, банка, агентства недвижимости и клиента
	Омбудсмен, назначенный правительством для разбора жалоб в области страхования		Омбудсмен	Проводит независимую оценку рисков и выносит свой вердикт
Великобритания	Страховые компании	Привлекают к работе специалистов наиболее высокой квалификации, не заинтересованных в результатах аудита	Привлеченный организацией специалист	При заключении страховой сделки
	Государственные и частные структуры	Проведение аудита	Представители организаций	
Германия	Федеральное ведомство по защите населения и помощи в ЧС МВД ФРГ	Координация и нормативно-правовое обеспечение в сфере аудита объектов критической структуры	Наряду с независимыми аудиторами обязательное участие инспекторов пожарной профилактики	Рассмотрение проектно-сметной документации на строительство крупных объектов
Люксембург	Высокий комиссариат национальной защиты	Координационные функции и особые полномочия при ЧС		Разрабатывает концепцию защиты критических инфраструктур
	Национальная служба безопасности в государственном секторе	Надзор за исполнением законов и административных актов во всех государственных и других учреждениях		Надзор на стадии строительства, оборудования, эксплуатации и контроль отслеживания пожарных рисков

Окончание таблицы

Наименование страны	Субъекты аудита безопасности	Функции субъекта	Участники аудита	Примечание
Франция	Независимые эксперты	Аудит пожарной безопасности	Эксперт по технической безопасности	Проводится в процессе строительства и эксплуатации. Законами и постановлениями уточняются уровень квалификации экспертов и периодичность аудита
	Комиссия по безопасности (представители префектуры, мэрии, пожарного надзора, полиции)	Выдает разрешения на открытие и дальнейшую эксплуатацию объекта на основании заключений эксперта		
Португалия	Национальная служба гражданской защиты (НСГЗ)	Властные полномочия по организации пожарного аудита	НСГЗ непосредственно либо через квалифицированных лиц и организации	Проверяет исполнение законов, норм, технических параметров и выносит обязательные рекомендации. Невыполнение рекомендаций влечет за собой отзыв лицензий, разрешений на работу и сертификатов
Греция	Страховые компании	Заказчики	Компаний-оценщики	
	Собственники объектов			
	Противопожарная служба	Утверждает план противопожарной защиты новостроящихся объектов		План противопожарной защиты разрабатывается инженерами, имеющими аккредитацию при Технической палате
Канада	Единственная аккредитованная компания CGJ Insurance Business Services	Используя различные системы оценок и прогнозирование пожарных рисков, дает страховым компаниям информацию для разработки и корректировки тарифов	CGJ Insurance Business Services	

Как следует из таблицы, проведение пожарного аудита – это современная тенденция повышения уровня пожарной безопасности объектов. Необходимо

отметить, что в перечисленных странах оценка соответствия объекта нормативным требованиям пожарной безопасности на стадии строительства (под контролем государственных структур) обязательна. Субъектами аудита выступают государственные структуры, страховые компании и собственники объектов. Методики проведения пожарного аудита как способа проверки соответствия состояния объекта нормативным требованиям не регламентируются, однако очевидна общая направленность подходов, а именно:

- гарантированно высокое качество проверки может обеспечить независимый эксперт, обладающий необходимым уровнем знаний нормативной базы;
- в качестве побудительного мотива для соблюдения нормативных требований пожарной безопасности целесообразно использовать имущественное страхование;
- контроль работы независимых экспертов должны осуществлять государственные структуры.

Цель работы – исследовать методы оценки соответствия фактического противопожарного состояния объектов нормативным требованиям при проведении пожарного аудита и обследовании объектов инспектором государственного пожарного надзора для повышения контроля качества его работы.

Изложение основного материала и полученных научных результатов. В рамках исследования сравним существующую систему оценки соответствия противопожарной защиты объектов нормативным требованиям и зарубежный опыт проведения пожарного аудита, рассмотрим используемые побудительные мотивы для выполнения предложенных экспертом мероприятий. Основная цель пожарного аудита – выявление несоответствия состояния объекта нормативным требованиям и разработка мероприятий для их устранения. Для визуализации полученных результатов приведем рассмотренные схемы пожарного аудита (рис. 1). За рамки исследования выведена работа над усовершенствованием нормативной базы.

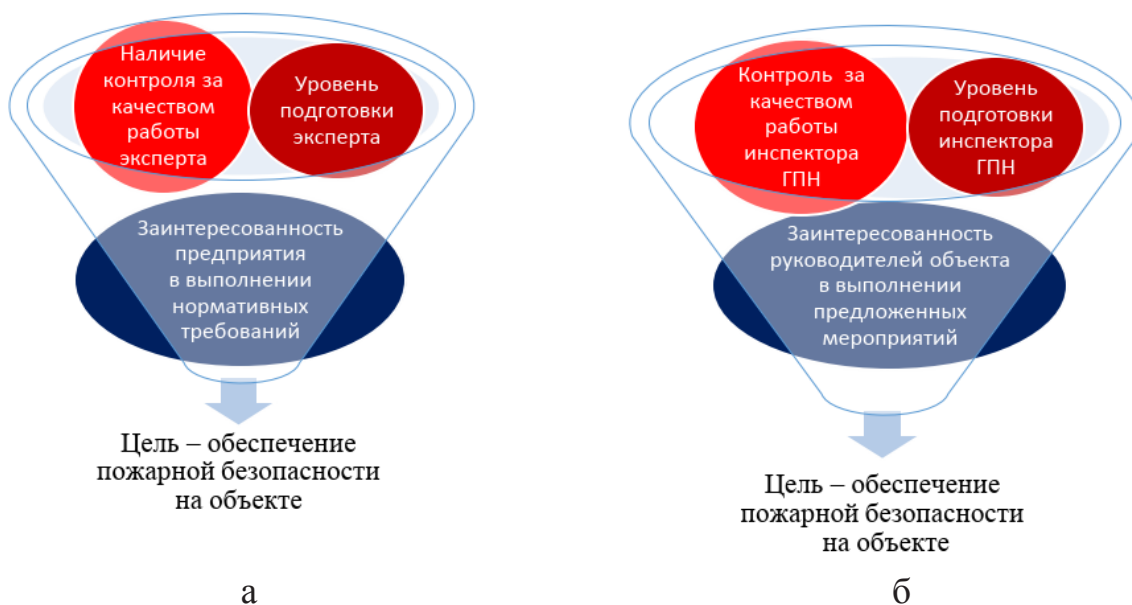


Рис. 1. Схемы пожарного аудита:
а – зарубежного опыта; б – работы ГПН

В представленных на рис. 1 схемах много общего. В существующей схеме работы ГПН система безопасности ориентирована на государственного инспектора пожарного надзора как специалиста по оценке соответствия состояния объекта нормативным требованиям. В схеме зарубежного опыта государство в основном участвует только в контроле над работой независимых экспертов. Исследуем преимущества рассматриваемых схем и спрогнозируем пути возможного их развития. Рассмотрим рациональность привлечения для проведения пожарного аудита независимого эксперта или представителя государственной структуры. В качестве конечного продукта их работы должен появиться документ, отражающий перечень выявленных несоответствий состояния объекта нормативным требованиям и мероприятия по снижению риска возникновения и распространения пожаров. Факторы, влияющие на качество исходного документа D_k , приведем в формуле

$$D_k = f(P_s, O_s, Z_s, F_{ch}),$$

где P_s – уровень подготовки специалиста;

O_s – ответственность специалиста за качество документа;

Z_s – полномочия и правовая защищенность специалиста;

F_{ch} – человеческий фактор.

Независимый эксперт – единица самостоятельная, действующая на свой страх и риск. Государственный инспектор пожарного надзора – элемент государственной системы обеспечения пожарной безопасности, поэтому на результаты его работы существенное влияние оказывает работа структуры в целом. Авторы работы [6] отметили целесообразность проведения системного анализа структуры ГПН для оценки эффективности работы. К основным свойствам системы МЧС ДНР относят такие, как целостность, централизация, иерархичность организации. Д.И. Костямин [7] утверждает, что структура системы, представляющая совокупность связей между элементами системы в виде отделов, обеспечивает осуществление организующей и контролирующей роли над работой органов ГПН подчиненных подразделений и способствует достижению общей цели. Очевидно, что четко построенную организационную структуру проще анализировать и на ее основе моделировать последствия возможных результатов модификации.

В рассматриваемом в рамках данной статьи аспекте отметим, что структура системы позволяет обеспечить правовую защищенность специалиста Z_s , контролировать уровень его подготовки P_s и качество работы. В рамках исследования изучаемой проблемы в качестве гипотезы рассмотрим возможность минимизации влияния человеческого фактора F_{ch} на качество конечного продукта (в виде разрабатываемых в ходе обследования объектов документов) путем компьютеризации процесса осуществления контроля за качеством работы инспектора. Модель влияния компьютерной оценки качества работы инспектора ГПН на конечный вариант документа приведена на рис. 2.



Рис. 2. Влияние компьютерной оценки качества работы инспектора ГПН на конечный вариант документа

Настройку модели программного обеспечения для компьютеризации контроля качества документов осуществляют по исходным данным в виде нормативных требований. Для постановки задач необходимо выполнить сбор информации по интересующим направлениям. Математическая постановка задачи состоит в следующем: найти функцию $f(F_s, N_t)$, при которой параметры F_s соответствуют параметрам N_t , где F_s – фактическое состояние объекта исследования, выявленное на моменте обследования, N_t – нормативные требования.

Выводы. Система обеспечения пожарной безопасности в плане проведения оценки соответствия состояния объекта исследования нормативным требованиям и разработки мероприятий, необходимых для обеспечения такого соответствия, принятая в Донецкой Народной Республике, опирается на государственные ресурсы и структуру МЧС.

Выполненные исследования позволили сравнить модели проведения пожарного аудита в зарубежных странах и действующую в ДНР и выделить отличия. Подтверждено, что за рубежом имеется тенденция к привлечению в качестве инспекторов независимых экспертов, а не представителя государственного пожарного надзора. Проанализированы факторы, влияющие на качество работы инспекторов при проведении пожарного аудита, изучены схемы проведения пожарного аудита.

Очевидно, что:

- четко структурированная система МЧС ДНР создает условия нормативного обеспечения проведения работы, обеспечивает правовую защищенность инспекторов и условия для их профессионального роста;
- для исключения негативного влияния человеческого фактора на конечный продукт обследования объекта целесообразно в используемую схему ввести компьютерный контроль предписаний инспекторов, что способствует эффективности деятельности ГПН.

Список литературы / References

1. Еремина, Т.Ю. Эффективные решения в обеспечении пожарной безопасности зданий и сооружений в Российской Федерации / Т.Ю. Еремина. – М.: Наука, 2014. – 278 с.

Eryomina T.Yu. *Effektivnye resheniya v obespechenii pozharnoi bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii v Rossiiskoi Federatsii* [Effective solutions in ensuring the fire safety of buildings and constructions in the Russian Federation]. Moscow, Nauka Publ., 2014, 278 p. (In Russian).

2. Якуш, С.Е. Анализ пожарных рисков. Ч. 1: Подходы и методы / С.Е. Якуш. – М., 2014. – 142 с.

Yakush S.E. *Analiz pozharnykh riskov. Ch. 1: Podkhody i metody* [Fire risks analysis. Part 1: Approaches and methods]. Moscow, 2014, 142 p. (In Russian).

3. Административный регламент МЧС России исполнения государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности: утв. приказом МЧС России от 28.06.2012 № 375 (в ред. от 30.11.2016).

Administrativnyi reglament MChS Rossii ispolneniya gosudarstvennoi funktsii po nadzoru za vypolneniem trebovaniy pozharnoi bezopasnosti: utv. prikazom MChS Rossii ot 28.06.2012 № 375 (v red. ot 30.11.2016) [Administrative regulation of EMERCOM of Russia on execution of the state function of supervision of fulfilling the requirements of fire safety: as amended by the Decree of the EMERCOM of Russia on June 28, 2012 № 375 (as amended as of November 30, 2016)]. (In Russian).

4. Абашкин, А.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» / А.А. Абашкин, А.В. Карпов, Д.В. Ушаков [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2012. – 83 с.

Abashkin A.A., Karpov A.V., Ushakov D.V. [et al.]. *Posobie po primeneniyu "Metodiki opredeleniya raschyotnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroeniyakh razlichnykh klassov funktsional'noi pozharnoi opasnosti"* [Guidebook on application of the Methodology for determining the computed values of fire risk in buildings, structures and constructions of different classes of functional fire hazard]. Moscow, VNIIPPO Publ., 2012, 83 p. (In Russian).

5. Молчанов, В.П. Научно-техническое обеспечение работы по сбору и анализу информации о зарубежных системах аудита безопасности. Средства спасения / В.П. Молчанов // Противопожарная защита. – М.: Издательский дом ВДПО, 1995. – Вып. 9. – С. 66 – 74.

Molchanov V.P. *Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie raboty po sboru i analizu informatsii o zarubezhnykh sistemakh audita bezopasnosti. Sredstva spaseniya* [Scientific-technical provision of work on collection and analysis of data on foreign systems of safety audit. Rescue equipment]. *Protivopozharnaya zashhita – Fire protection*, Moscow, Izdatel'skii dom VDPO Publ., 1995, issue 9, pp. 66-74. (In Russian).

6. Костямин, Д.И. Расчет необходимой численности государственного пожарного надзора / Д.И. Костямин, Н.Ю. Чубучный, Е.И. Добрякова // Сборник тезисов докладов на Международной научно-практической конференции 18–19.10.2018. – М.: Академия государственной противопожарной службы МЧС России, 2018. – С. 576 – 579.

Kostyamin D.I., Chubuchnyi N.Yu., Dobryakova Ye.I. *Raschyot neobkhodimoi chislennosti gosudarstvennogo pozharnogo nadzora* [Calculation of required manpower of the state fire safety supervision]. *Sbornik tezisov dokladov na Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 18-19.10.2018* [Collection of theses of the International scientific-practical conference, October 18-19, 2018]. Moscow, Akademiya Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii Press, 2018, pp. 576-579. (In Russian).

7. Костямин Д.И. Оценка эффективности управленческих решений по регуляции численности инспекторского состава государственного пожарного надзора / Д.И. Костямин, Е.И. Добрякова // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – № 3(4). – С. 97 – 104.

Kostyamin D.I., Dobryakova Ye.I. *Otsenka effektivnosti upravlencheskikh reshenii po regulyatsii chislennosti inspektorskogo sostava gosudarstvennogo pozharnogo nadzora* [Assessment of efficiency of managerial decisions on regulation of inspectorial staff manpower of the state fire safety supervision]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO “Akademiya grazhdanskoi zashhity” MChS DNR Press, 2019, no. 3(4), pp. 97-104. (In Russian).

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

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shhorsa. Phone: (+38 062) 342-69-26

Yelena Ivanovna Dobryakova, scientific associate; 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) 332-78-44

ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING OBJECTS CONDITION DURING CONDUCTION OF FIRE SAFETY AUDIT

Purpose. To investigate the methods for assessment of conformity of the actual fire safety condition of objects with the regulatory requirements carrying out the fire safety audit and inspecting the objects under supervision by the state fire safety supervision inspector for strengthening the quality control of his work.

Methods. Information-and-analytical methods for assessing the fire safety condition of objects.

Results. They are characterized by the high level of significance as they are belonged to the most important problem, i.e. implementation of modern technologies in the system of expert evaluations of assignments of the state fire safety supervision inspectors.

Scientific novelty. The software has been proposed for application in assessment of the performance efficiency of the state fire safety supervision.

Practical value. The presented approach will enable strengthening the control of quality of the state fire safety supervision inspector's work.

Keywords: *fire safety audit; state fire safety supervision; risks assessment; computer-aided technologies; performance efficiency.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.411.33:[622.012.2:621.311.064.2]

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

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

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

*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*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЯХ В ШАХТАХ ВСЛЕДСТВИЕ ИХ ОБЕСТОЧИВАНИЯ

Цель. Разработка математической модели переходных газодинамических процессов в выемочном участке шахты при изменении режимов работы вентиляции и системы дегазации.

Методы. Теоретические исследования процессов диффузии и переноса веществ в пористых средах и каналах на основании основных законов газодинамики.

Результаты. Получены дифференциальные уравнения и аналитические решения газодинамических процессов при изменении режима работы вентиляции и системы дегазации для прогнозирования газовой обстановки на выемочных участках шахт.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель переходных газодинамических процессов в выемочном участке при отключении электроснабжения шахты и установлены зависимости относительных концентраций метана от характерных для данных процессов критериев подобия.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют рассчитать газовую обстановку на выемочных участках после отключения электроснабжения и прогнозировать место и время образования взрывоопасной концентрации метана для принятия оперативных решений по разгазированию аварийного участка.

Ключевые слова: *выемочный участок; выработанное пространство; лава; метан; дегазация; вентиляция; сближенный пласт (спутник); переходный газодинамический процесс; математическая модель.*

Постановка проблемы. В соответствии с требованиями «Правил безопасности в угольных шахтах» все угольные предприятия обеспечиваются двумя независимыми источниками электроснабжения для исключения возможности останова их проветривания и безопасного вывода на поверхность горнорабочих. Однако из-за непрекращающихся боевых действий на территории Донецкой Народной Республики неоднократно имели место случаи длительного отключения (более трех часов) от электроснабжения угольных шахт, что влекло за собой невозможность выхода на поверхность горнорабочих, а также затопление и загазирование горных выработок (шахты им. А.Ф. Засядько, им. А.А. Скочинского, «Комсомолец Донбасса», «Калиновская-Восточная» и др.).

Как показывает практика прошлых лет и в настоящее время, в случае отключения электроэнергии изменяются режимы работы основных средств удаления метана – дегазации и вентиляции. При отключении систем дегазации на угольных предприятиях отсутствует четкий регламент режимов проветривания выемочных участков, принимаются недостаточные меры безопасности по предотвращению возникновения в горных выработках повышенных концентраций метана. Обильное газовыделение на выемочных участках шахт Донбасса и низкая эффективность предварительной дегазации заставляют обращать особое внимание на данную проблему. Все это приводит к возникновению аварий на угольных предприятиях и влечет за собой человеческие жертвы.

Анализ последних исследований. Газообильность шахт в значительной степени определяют числом работающих лав и их нагрузками. Шахты Донбасса, применяющие системы дегазации, относятся, как правило, к сверхкатегорийным и опасным по внезапным выбросам угля и газа, с абсолютной газообильностью до 230 м³/мин.

Увеличение поступления метана из сближенных пластов (спутников) в выработанное пространство при отключении системы дегазации и изменении режима проветривания может привести к образованию взрывоопасных концентраций метана. Исследование влияния данных факторов на газовую обстановку выемочного участка позволяет определить время образования взрывоопасной концентрации метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка.

Вопросам оценки и прогноза газовой обстановки на аварийном участке при изменении режимов дегазации и вентиляции посвящены работы А.Л. Романчука, Г.М. Алейниковой, Н.И. Привалова и других ученых. Оценку ожидаемой газовой обстановки выемочного участка, где предполагают отключение дегазации, авторы предлагают производить опытным путем, что в современных условиях выполнить практически невозможно. Поэтому в работе рассмотрены переходные газодинамические процессы в выемочном участке с помощью аналитических зависимостей путем сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Цель исследований – разработка математической модели переходных газодинамических процессов в выемочном участке шахты при изменении режимов работы вентиляции и системы дегазации.

Результаты исследований. Для описания переходных газодинамических процессов на выемочном участке представим лаву и активно проветриваемую зону выработанного пространства как две параллельные выработки, в которых происходит конвективно-диффузионный перенос примеси с равномерно распределенными источниками газовыделения из пласта в лаву и из сближенных пластов (спутников), которые предварительно фильтруются через породные толщи.

Предположим, что в части вентиляционного штрека, примыкающей к активно проветриваемой зоне выработанного пространства, происходит мгновенное перемещение метана, а в остальной части штрека – его диффузия в общем потоке воздуха.

Исходное уравнение, описывающее переходный газодинамический процесс в лаве, имеет вид [1]

$$\frac{\partial C_{\text{л}}}{\partial t} + \frac{Q_{\text{л}}}{S_{\text{л}}} \cdot \frac{\partial C_{\text{л}}}{\partial z} = D_{\text{м}} \frac{\partial^2 C_{\text{л}}}{\partial^2 z} + \frac{q_{\text{пл}}}{S_{\text{л}} l_{\text{л}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{л}}$ – объемная доля метана в лаве, %;

$q_{\text{пл}}$ – дебит метана из разрабатываемого пласта, м³/мин;

$Q_{\text{л}}$ – расход воздуха в лаве, м³/мин;

$D_{\text{м}}$ – коэффициент диффузии метана в лаве;

$S_{\text{л}}$ – площадь поперечного сечения лавы, м²;

$l_{\text{л}}$ – длина лавы, м;

t – время с начала переходного процесса, мин;

z – координата, отсчитываемая от откаточного штрека по направлению движения вентиляционной струи воздуха.

Считаем, что концентрация метана на выходе в лаву – величина постоянная, тогда

$$C_{\text{л}}(0, t) = C_{\text{л}0}. \quad (2)$$

На противоположном конце лавы ($z \rightarrow \infty$) примем, что

$$\left. \frac{\partial C_{\text{л}}}{\partial z} \right|_{z \rightarrow \infty} = M, \quad (3)$$

где M – некоторая константа.

Тогда из решения уравнения (1) с граничными условиями (2) и (3) при $\partial C_{\text{л}} / \partial t = 0$ и $Q_{\text{л}} = Q_{\text{л}0}$, что соответствует нормальному режиму работы вентиляции, получим начальное распределение концентрации метана в лаве

$$C_{\text{л}}(z, 0) = C_{\text{л}0} + \frac{q_{\text{пл}}}{Q_{\text{л}0}} \cdot \frac{z}{l_{\text{л}}}. \quad (4)$$

Для измененного режима работы вентиляции, когда расход воздуха в лаве $Q_{\text{л}} = Q_{\text{л}1}$, решение уравнений (2) – (4) описывает переходный газодинамический процесс в лаве. Существенные изменения концентрации метана имеют место на выходе из лавы при $z = l_{\text{л}}$, при изменении режима проветривания они могут быть найдены с помощью подстановки [2]

$$C_{\text{л}}(z, t) = C_{\text{п}}(z, t) \exp\left(\frac{Q_{\text{л.1}} z}{2S_{\text{п}} D_{\text{п}}} - \frac{Q_{\text{л.1}}^2 t}{4S_{\text{п}}^2 D_{\text{п}}}\right). \quad (5)$$

Преобразуем условия (2) – (4), подставляя уравнение (5), для определения относительной концентрации метана на выходе из лавы и получим

$$\zeta_{\text{л}} = 1 - \frac{1}{2} \left[\exp(\delta_{\text{л}}) (\tau_{\text{л}} + 1) \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau_{\text{л}} + 1}{2\sqrt{\tau_{\text{л}} / \delta_{\text{л}}}}\right) - (\tau_{\text{л}} - 1) \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau_{\text{л}} - 1}{2\sqrt{\tau_{\text{л}} / \delta_{\text{л}}}}\right) \right], \quad (6)$$

где $\tau_{\text{л}}$ – критерий гомохронности ($\tau_{\text{л}} = Q_{\text{л.1}} t / S_{\text{п}} l_{\text{п}}$);

$\delta_{\text{л}}$ – параметр, представляющий собой произведение числа Пекле $Pe = Q_{\text{л.1}} / S_{\text{п}} D_{\text{п}}$ на геометрический критерий $l_{\text{п}} / m$;

m – мощность разрабатываемого пласта, м.

По формуле (6) выполнены расчеты и построены зависимости (рис. 1).

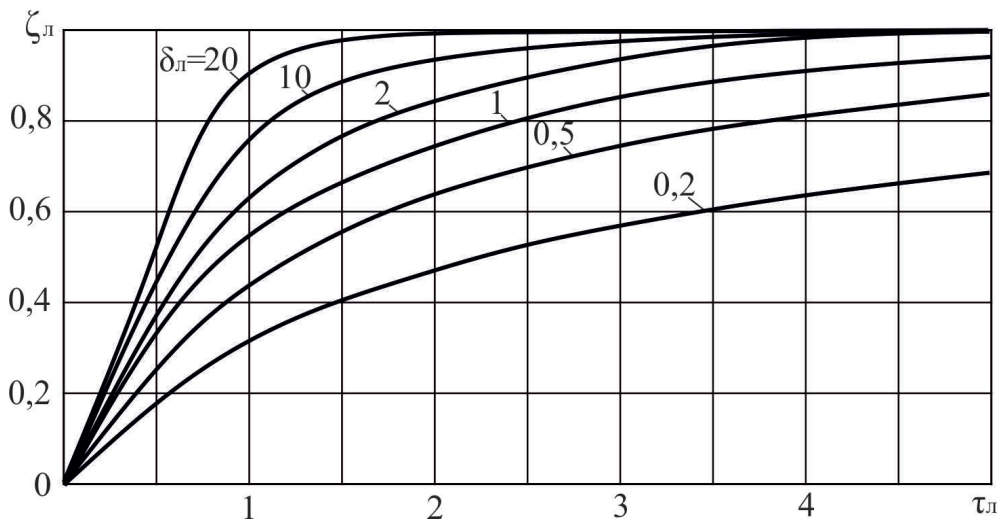


Рис. 1. Зависимость относительной концентрации метана в лаве от критериев $\tau_{\text{л}}$ и $\delta_{\text{л}}$ при изменении режима работы вентиляции

Если газовыделение из разрабатываемого пласта происходит прямо в поток воздуха, то выделяющийся метан из сближенных пластов (спутников), прежде чем смешаться с воздухом, должен пройти непроветриваемую зону выработанного пространства.

Уравнения движения и неразрывности одномерного потока метана в породной толще имеют вид [3]

$$V = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho\sigma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = 0,$$

где V – скорость фильтрации, м/с;

P – давление, Па;

ρ – плотность газа, л/моль;

μ – динамическая вязкость газа, Па·с;

k – коэффициент проницаемости породы, м²;

σ – коэффициент пористости породы;

y – координата, отсчитываемая от сближенного пласта (спутника) в сторону разрабатываемого пласта.

Считаем, что для метана в разгруженной зоне справедливо уравнение состояния идеального газа [4]; принимая $\sigma = RT$ за константу и дифференцируя уравнение по y , получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\sigma \rho}{\partial y} \right) + \frac{RT}{\sigma} \cdot \frac{\partial^2(\rho V)}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

где R – газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К.

Так как динамическая вязкость μ связана с кинематической ν соотношением $\mu = \rho\nu$, то, подставляя уравнение (8) вместо градиента давления из уравнения (7), будем иметь

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2(\rho V)}{\partial y^2}, \quad (9)$$

где χ – коэффициент пьезопроводности, принимаемый за константу.

Умножая на площадь фильтрации S_{ϕ} и деля на плотность метана $\rho_{\text{н}}$ при нормальных условиях левую и правую части уравнения (9), получим

$$\frac{\partial q_{\text{сп}}}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 q_{\text{сп}}}{\partial y^2}, \quad (10)$$

где $q_{\text{сп}}$ – дебит метана из сближенных пластов (спутников) при нормальных условиях работы выемочного участка, м³/мин.

Предположим, что до изменения параметров работы системы дегазации дебит метана на любом расстоянии от сближенного пласта (спутника) равен

$$q_{\text{сп}}(y, 0) = q_{\text{сп.0}}. \quad (11)$$

После изменения режима работы системы дегазации в выработанное пространство из сближенного пласта (спутника) выделяется метан с дебитом

$$q_{\text{сп}}(0, t) = q_{\text{сп}1}. \quad (12)$$

На противоположном конце зоны фильтрации ($y \rightarrow \infty$) примем

$$\left. \frac{\partial q_{\text{сп}}}{\partial y} \right|_{y \rightarrow \infty} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (10) с начальными и граничными условиями (11) – (13) представим в виде

$$q_{\text{сп}}(y, t) = q_{\text{сп}1} - (q_{\text{сп}1} - q_{\text{сп}0}) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{\chi t}} \right). \quad (14)$$

По формуле (14) можно определить дебит метана, поступающий из сближенного пласта (спутника) в активно проветриваемую зону выработанного пространства в любое время t с момента изменения режима работы дегазации.

Исходное уравнение, описывающее переходный газодинамический процесс в активно проветриваемой зоне выработанного пространства, имеет вид

$$\frac{\partial C_{\text{в}}}{\partial t} + \frac{Q_{\text{в}}}{S_{\text{в}}} \frac{\partial C_{\text{в}}}{\partial z} = D_{\text{в}} \frac{\partial^2 C_{\text{в}}}{\partial z^2} + \frac{q_{\text{сп}}(l_{\text{сп}}, t)}{S_{\text{в}} l_{\text{п}}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{в}}$ – объемная доля метана в выработанном пространстве, %;

$Q_{\text{в}}$ – расход воздуха в утечках через активно проветриваемую зону выработанного пространства, м³/мин;

$D_{\text{в}}$ – коэффициент диффузии метана в рассматриваемой зоне;

$l_{\text{сп}}$ – расстояние по нормали до сближенного пласта (спутника), м;

$S_{\text{в}}$ – площадь поперечного сечения рассматриваемой зоны, м².

Считаем, что в выработанное пространство поступает постоянная концентрация объемной доли метана, а на противоположном конце ($z \rightarrow \infty$) принимаем некоторую константу M , тогда из решения уравнения (15) с граничными условиями при $\partial C_{\text{в}} / \partial z = 0$, $q_{\text{сп}}(l_{\text{сп}}, 0) = q_{\text{сп}0}$ и $Q_{\text{в}} = Q_{\text{в}0}$, что соответствует нормальному режиму дегазации и проветривания, получим начальное распределение концентрации метана в активно проветриваемой зоне выработанного пространства

$$C_{\text{в}}(z, 0) = C_{\text{в}0} + \frac{q_{\text{сп}0}}{Q_{\text{в}0}} \frac{z}{l_{\text{сп}}}. \quad (16)$$

При изменении параметров режима проветривания и системы дегазации, когда расход воздуха в утечках $Q_B = Q_{B1}$, решение уравнения (15) с граничными и начальными условиями может быть найдено с помощью подстановки уравнения (5), в котором параметром лавы принимаем выработанное пространство. Полученное таким образом решение после ряда преобразований примет вид

$$\zeta_B = 1 - \frac{1}{2} \left[\exp(\delta_B)(\tau_B + 1) \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau_B + 1}{2\sqrt{\tau_B / \delta_B}} \right) - (\tau_B - 1) \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau_B - 1}{2\sqrt{\tau_B / \delta_B}} \right) \right] - \frac{K_q - 1}{K_q - K_{Q_B}} \cdot \frac{\tau_B}{2} \int_0^1 \operatorname{erfc} \left(\frac{\lambda}{2\sqrt{\Theta \tau_B / \delta_B}} \right) \times \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\tau_B(1 - \bar{\Theta}) - 1}{2\sqrt{\tau_B(1 - \bar{\Theta}) / \delta_B}} \right) - \exp(\delta_B) \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau_B(1 - \bar{\Theta}) + 1}{2\sqrt{\tau_B(1 - \bar{\Theta}) / \delta_B}} \right) \right] d\bar{\Theta}. \quad (17)$$

На рис. 2 по формуле (17) построены кривые роста относительной концентрации метана на выходе из выработанного пространства при изменении параметров работы системы дегазации ($K_{Q_B} = 1$) в зависимости от критерия гомохронности τ_B , δ_B и параметра λ .

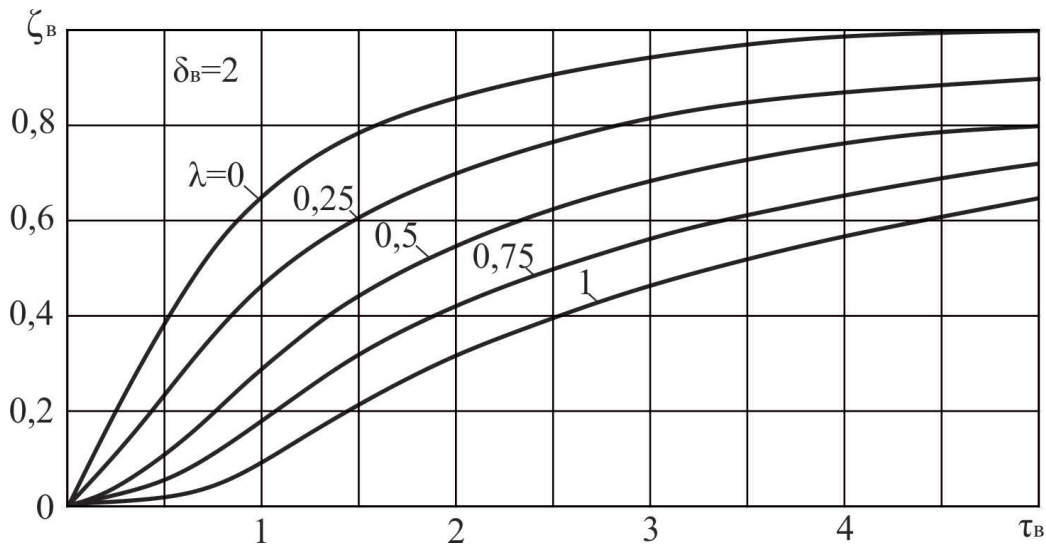


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации метана при изменении режима работы дегазации от критериев τ_B и λ

Если ширина зоны активных утечек воздуха не превышает 50 м, то концентрация метана в вентиляционном штреке на отрезке $x \leq x_0$ может быть определена по формуле

$$C_{\text{ш}}(x, t) = \frac{C_{\text{л}}(l_{\text{л}}, t)Q_{\text{л1}} + C_{\text{в}}(l_{\text{в}}, t)Q_{\text{в1}} \frac{x}{x_0}}{Q_{\text{л1}} + Q_{\text{в1}} \frac{x}{x_0}}, \quad (18)$$

где x – координата, отсчитываемая от забоя вентиляционного штрека по направлению движения вентиляционной струи воздуха.

Предположим, что в неактивно проветриваемой зоне выработанного пространства газодинамические процессы протекают настолько медленно, что в некотором интервале времени их изменениями можно пренебречь. Тогда в остальной части вентиляционного штрека ($x \geq x_0$) задача конвективной диффузии метана сводится к решению уравнения

$$\frac{\partial C_{\text{ш}}}{\partial t} + \frac{Q_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}} \cdot \frac{\partial C_{\text{ш}}}{\partial x} = D_{\text{ш}} \frac{\partial^2 C_{\text{ш}}}{\partial x^2} + \frac{\alpha q_{\text{в}}}{S_{\text{ш}}} e^{-\alpha(x-x_0)}, \quad (19)$$

где $C_{\text{ш}}$ – объемная доля метана в вентиляционном штреке, %;

$Q_{\text{ш}}$ – расход воздуха в исходящей вентиляционной струе участка, м³/мин;

$q_{\text{в}}$ – дебит метана в утечках воздуха через неактивно проветриваемую зону выработанного пространства, м³/мин;

α – показатель изменения газовыделения вдоль вентиляционного штрека;

$D_{\text{ш}}$ – коэффициент диффузии метана в вентиляционном штреке, см²/с;

$S_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения вентиляционного штрека, м².

Из граничных условий для уравнения (19) используем функцию (18) при $x = x_0$. На противоположном конце вентиляционного штрека ($x \rightarrow \infty$) примем

$$\left. \frac{\partial C_{\text{ш}}}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0. \quad (20)$$

В таком случае для нормальных режимов проветривания выемочного участка ($Q_{\text{ш}} = Q_{\text{ш0}}$) и работы системы дегазации ($q_{\text{в}} = q_{\text{в0}}$) из решения уравнения (19) при $\partial C_{\text{ш}} / \partial t = 0$ с указанными граничными условиями при $t = 0$ получим начальное распределение концентрации метана в вентиляционном штреке на расстоянии $x \geq x_0$

$$C_{\text{ш}}(x, 0) = C_{\text{ш}}(x_0, 0) + \frac{q_{\text{в0}}}{Q_{\text{ш0}} + \alpha S_{\text{ш}} D_{\text{ш}}} [1 - e^{-\alpha(x-x_0)}]. \quad (21)$$

Поскольку неактивно проветриваемая зона выработанного пространства не оказывает влияния на переходный газодинамический процесс в вентиляционном штреке, то изменения режимов работы дегазации и вентиляции принимаем

$$q_{\text{в}} = q_{\text{в.1}} = \frac{Q_{\text{ш1}}}{Q_{\text{ш0}}} q_{\text{в0}}.$$

При одновременном изменении режима работы дегазации и вентиляции, когда расход воздуха в вентиляционном штреке $Q_{\text{ш}} = Q_{\text{ш1}}$ и дебит метана из выработанного пространства $q_{\text{в}} = q_{\text{в1}}$, решение уравнения (19) с граничными и начальными условиями (18) при $x = x_0$, (20) и (21) может быть найдено с помощью подстановки уравнения (5), при этом переменную z следует заменить переменной $(x - x_0)$. Полученное таким образом решение после некоторых преобразований примет вид

$$C_{\text{ш}}(x, 0) = C_{\text{ш}}(x_0, 0) + \frac{q_{\text{в.0}}}{Q_{\text{ш0}} + \alpha S_{\text{ш}} D_{\text{ш}}} [1 - e^{-\alpha(x-x_0)}] + \frac{x - x_0}{2\sqrt{\pi D_{\text{ш}}}} \int_0^t \frac{C_{\text{ш}}(x_0, \theta) - C_{\text{ш}}(x_0, 0)}{(t, \theta)^{1.5}} \exp \left\{ - \left[\frac{\frac{Q_{\text{ш1}}(t - \theta)}{S_{\text{ш}}(x - x_0)} - 1}{2\sqrt{\frac{D_{\text{ш}}(t - \theta)}{(x - x_0)^2}}} \right]^2 \right\} d\theta. \quad (22)$$

Решение формулы (22) описывает переходный газодинамический процесс при изменении режима работы дегазации и вентиляции в вентиляционном штреке.

Для анализа переходного процесса в вентиляционном штреке приведем формулу (22) к безразмерному виду

$$\zeta_{\text{ш}} = \frac{\xi}{2\sqrt{\pi \tau_{\text{ш}} / \delta_{\text{ш}}}} \int_0^1 \frac{\Delta \bar{C}_{\text{ш}}(\bar{\Theta})}{(1 - \bar{\Theta})^{1.5}} \exp \left[- \left(\frac{\frac{\tau_{\text{ш}}(1 - \bar{\Theta}) - 1}{\xi}}{2\sqrt{\frac{\tau_{\text{ш}}(1 - \bar{\Theta})}{\delta_{\text{ш}} \xi^2}}} \right)^2 \right] d\bar{\Theta}, \quad (23)$$

где $l_{\text{ш}}$ – условная длина вентиляционного штрека, м.

Выражая $\Delta \bar{C}_{\text{ш}}$ через функции $\zeta_{\text{л}}$ и $\zeta_{\text{в}}$, согласно формуле (18) получим

$$\Delta \bar{C}_{\text{ш}} = \frac{(1 - K_{Q_{\text{л}}})\zeta_{\text{л}} + a(K_q - K_{Q_{\text{в}}})\zeta_{\text{в}}}{(1 - K_{Q_{\text{л}}}) + a(K_q - K_{Q_{\text{в}}})},$$

где $K_{Q_{\text{л}}}$ – глубина регулирования расхода воздуха в лаве ($K_{Q_{\text{л}}} = Q_{\text{л1}} / Q_{\text{л0}}$), м;

$K_{Q_{\text{в}}}$ – глубина регулирования расхода воздуха в активно проветриваемой зоне выработанного пространства ($K_{Q_{\text{в}}} = Q_{\text{в1}} / Q_{\text{в0}}$), м;

a – удельный вес метановыделения из сближенных пластов (спутников) ($a = q_{\text{сп0}} / q_{\text{сп}}$), Н/м³;

K_q – глубина регулирования дебита метана из сближенных пластов (спутников) при дегазации ($K_q = q_{\text{сп1}} / q_{\text{сп}}$), м.

Поскольку условная длина вентиляционного штрека может считаться произвольной, то, полагая $\tau_{\text{ш}} = \tau_{\text{л}}$ при $\Delta \bar{C}_{\text{ш}} = \zeta_{\text{л}}$ или $\tau_{\text{ш}} = \tau_{\text{в}}$ при $\Delta \bar{C}_{\text{ш}} = \zeta_{\text{в}}$, найдем условную длину вентиляционного штрека $l_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{ш1}} / S_{\text{ш}}}{Q_{\text{л1}} / S_{\text{л}}} l_{\text{л}}$ или $l_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{ш1}} / S_{\text{ш}}}{Q_{\text{в1}} / S_{\text{в}}} l_{\text{в}}$.

По формуле (23) для $\lambda = 0$ и для $\lambda = 0,5$ построены кривые роста относительной концентрации метана в разных сечениях вентиляционного штрека в зависимости от критерия гомохронности при фиксированных параметрах $\delta_{\text{л}} = 2$ и $\delta_{\text{ш}} = 70$ (рис. 3).

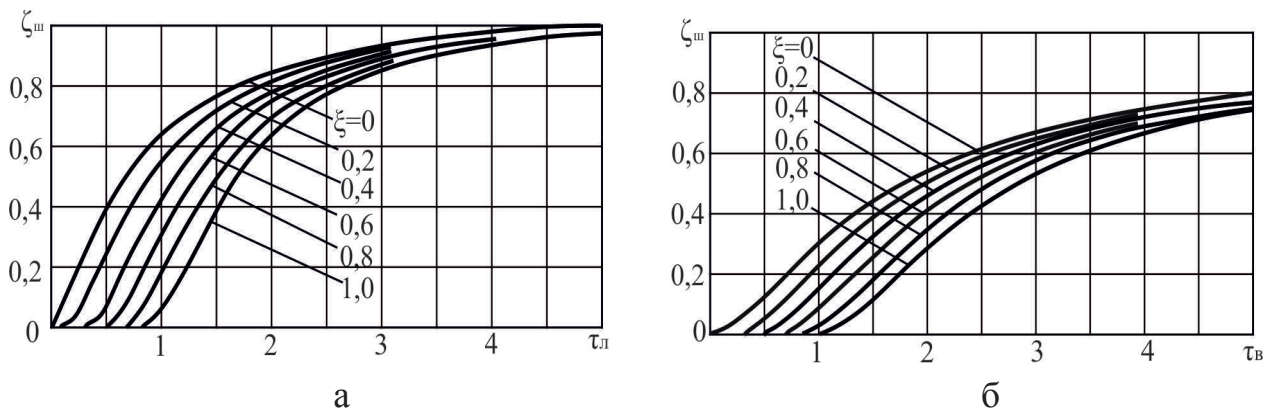


Рис. 3. Зависимость относительной концентрации метана в различных сечениях вентиляционного штрека от безразмерного времени при нарушении режима работы вентиляции и дегазации:

- а – нарушен режим работы вентиляции ($\lambda = 0$);
- б – нарушен режим работы дегазации ($\lambda = 0,5$)

Выводы. Исследовано влияние нарушения режимов работы вентиляции и дегазации в выемочном участке при обесточивании шахты и разработана математическая модель переходных газодинамических процессов в выработках выемочного участка. Установлены зависимости относительных концентраций метана от характерных для данного процесса критериев подобия, гомохронности и кратности обмена воздуха в рассматриваемом объеме с целью прогнозирования газовой обстановки на выемочных участках шахт.

Список литературы / References

1. Леонтьев, Н.Е. Основы теории фильтрации / Н.Е. Леонтьев. – 2-е изд. – М.: МАКС Пресс, 2017. 88 с.
Leont'ev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii. 2-e izd.* [Basics of filtration theory. The 2nd ed.]. Moscow, MAKS Press Publ., 2017, 88 p. (In Russian).
2. Самарский, А.А. Уравнения математической физики / А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 799 с.

Samarskii A.A., Tikhonov A.N. *Uravneniya matematicheskoi fiziki. 6-e izd., ispr. i dop.* [Mathematical physics equations. The 6th edition revised and supplemented]. Moscow, MGU Press, 2004, 799 p. (In Russian).

3. Ушаков, К.З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГГУ, 2004. – 481 с.

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

4. Пашковский, П.С. Единый подход к решению задач теплогазообмена при пожарах на различных объектах / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // ВІТР: науч. журн. – 2016. – Т. 44, вып. 4. – С. 83 – 88.

Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N. *Edinyi podkhod k resheniyu zadach teplogazoobmena pri pozharakh na razlichnykh ob"ektakh* [Combined approach to solving issues of heat and gas exchange caused by fires in different locations]. *ВІТР: nauch. zhurn. – ВІТР – Safety and Fire Technique: scientific journal*, 2016, vol. 44, issue 4, pp. 83-88. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 19.05.2022

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Aleksandr Viktorovich Mavrodi, scientific associate; e-mail: mavrodi-av@mail.ru
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

MATHEMATICAL MODEL OF GAS-DYNAMIC PROCESSES PROCEEDING DURING TECHNOGENIC ACCIDENTS IN MINES CAUSED BY POWER FAILURE

Purpose. Development of the mathematical model of transient gas-dynamic processes in the mine working area in the event of changes in ventilation and degassing system working modes.

Methods. Theoretical investigations of diffusion and substances transfer processes in porous media and channels on the basis of the gas-dynamics principal laws.

Results. The differential equations and analytical solutions have been obtained for the gas-dynamic processes in the event of changes in ventilation and degassing system working modes for predicting the gas condition in the working areas of mines.

Scientific novelty. The novel mathematical model of the transient gas-dynamic processes in the working area in the event of power failure in the mine has been developed, and the dependences of relative methane concentrations on the similarity criteria typical for the given processes have been established.

Practical value. The results of the investigations make it possible to estimate the gas condition in the working areas after the power failure and to predict the location and time of formation of the explosive methane concentration for making timely decisions on degassing of the emergency area.

Keywords: *working area; mined-out space; face; methane; degassing; ventilation; contiguous seam (adjacent seam); transient gas-dynamic process; mathematical model.*

УДК 661.183"ХП-И":620.163.4

Татьяна Викторовна Князева, руководитель аппарата министра; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям

и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР

283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-80

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: lzborschik@yandex.ru;

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

Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,

пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-45

КОНТРОЛЬ ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОГЛОТИТЕЛЯ ХП-И

Цель. Исследование сорбционной емкости известкового химического поглотителя ХП-И для улучшения защитных свойств дыхательных аппаратов.

Методы. Экспериментальные и расчетные методы исследований поглотителя ХП-И.

Результаты. Рассчитан доверительный интервал сорбционной емкости известкового химического поглотителя ХП-И, выпускаемого в Донецкой Народной Республике.

Научная новизна. Впервые предложено определять достоверность защитной способности поглотителя ХП-И при проскоковой объемной доле диоксида углерода, равной 0,5 %, а не исследовать ее согласно ГОСТ 6755-88.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволяют подтвердить соответствие известкового химического поглотителя ХП-И, выпускаемого в ДНР, требованиям нормативной документации с целью дальнейшего его усовершенствования.

Ключевые слова: известковый химический поглотитель; дыхательный аппарат; защитная способность; сорбция; сорбент; диоксид углерода; удельная сорбционная емкость.

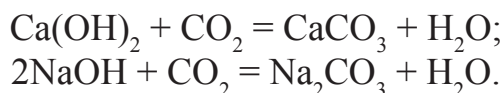
Постановка проблемы. В дыхательном аппарате со сжатым кислородом регенерация воздуха осуществляется благодаря двум сбалансированным процессам: поглощению выделяемого человеком диоксида углерода и подаче кислорода редуктором из баллона в воздухопроводную систему аппарата. Защитная способность по диоксиду углерода зависит от конструкции регенеративного патрона и свойств поглотителя, а именно от его удельной сорбционной емкости. Гарантированное время защитного действия возможно обеспечить только в том случае, если различные партии серийно выпускаемого поглотителя имеют стабильное значение удельной сорбционной емкости.

НИИГД «Респиратор» проанализированы значения этого параметра для известкового химического поглотителя ХП-И, изготовленного ООО «Донхиминновации» в период с 2017 по 2022 г. Полученные результаты позволяют определить направления дальнейшего совершенствования данного сорбента.

Анализ последних исследований. Химические поглотители на основе гидроксида кальция (известковые) имеют широкое распространение и

применяются в дыхательных аппаратах изолирующего типа, герметичных спасательных объектах и убежищах, наркотно-дыхательных аппаратах и барокамерах для очистки газовой среды от диоксида углерода.

Поглотитель имеет стехиометрическую емкость, которую рассчитывают, исходя из его состава и уравнений химических реакций.



Скорость процесса взаимодействия хемосорбента с диоксидом углерода CO_2 (v) можно описать уравнением Брэдли, Колвина и Юма [1]

$$v = 1 - Ae^{-kt},$$

где A – коэффициент;

k – константа скорости процесса, 1/мин;

t – время, мин.

Энергию активации процесса хемосорбции E_{akt} , Дж/моль, определяют из уравнения Аррениуса

$$E_{akt} = -RT \ln \frac{k}{B},$$

где R – газовая постоянная, равная 8,31441 Дж/(моль·К);

T – температура, К;

B – предэкспонента.

Исследуется влияние разных компонентов на сорбционные свойства этих поглотителей. В гранулы поглотителя ХП-И вводят химические вещества, повышающие сорбционную емкость поглотителя или прочностные характеристики гранулы [2]. Наиболее часто в качестве активных компонентов применяют помимо гидроксидов кальция, натрия, калия и лития также оксид и гидроксид магния, гидроксид бария, цеолиты. Кроме того, для поддержания на необходимом уровне влажности сорбента в состав поглотителя вводят неорганические гидраты, такие как гексагидрат хлорида кальция, гидрат хлорида магния, а также органические вещества – глицерин, пропиленгликоль, полиэтиленгликоль и др. [3].

В настоящее время многие торговые марки выпускают поглотители на основе гидроксида кальция. Они различаются только наличием в их составе небольшого количества (до 5 %) упрочняющих, структурирующих, влагоудерживающих химических добавок либо размерами гранул и таблеток. Динамическая активность по диоксиду углерода современных поглотителей фактически не превышает 90...100 дм³/кг [4].

При совершенствовании дыхательных аппаратов со сжатым кислородом один из важнейших параметров, который необходимо оценивать и контролировать при серийном производстве, – удельная сорбционная емкость ХП-И.

Результаты исследований. В ходе проведенных исследований ХП-И определяли сорбционную емкость, сопротивление воздушному потоку, прочность на истирание, влажность и другие показатели поглотителя. Исследования проводили в условном патроне согласно ГОСТ 6755-88 на динамической установке с «искусственными легкими» по открытой схеме дыхания (условный патрон представляет собой многократно переснаряжаемый регенеративный цилиндрический прямоточный патрон с площадью поперечного сечения 9400 мм² и высотой цилиндрической части (190 ± 0,5) мм). Эксперимент имитировал среднюю физическую нагрузку человека: легочная вентиляция 30 дм³/мин, подача СО₂ 1,2 дм³/мин. Исследования проводили в течение 120 мин, при этом фиксировали значения поданного, непоглощенного и поглощенного объемов диоксида углерода. Сорбционную емкость определяли как частное отношение поглощенного объема диоксида углерода к массе сорбента в условном патроне. Результаты исследований ХП-И статистически обработали и определили доверительный интервал этого показателя для различных партий поглотителя.

Среднюю квадратичную ошибку S вычисляли по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}},$$

где \bar{x} – среднее значение удельной сорбционной емкости поглотителя ХП-И, дм³/кг;

x_i – удельная сорбционная емкость отдельной партии поглотителя ХП-И, дм³/кг;

n – количество анализируемых партий.

Доверительный интервал значения сорбционной емкости ε определяли при доверительной вероятности 0,95 по формуле

$$\varepsilon = \pm tS,$$

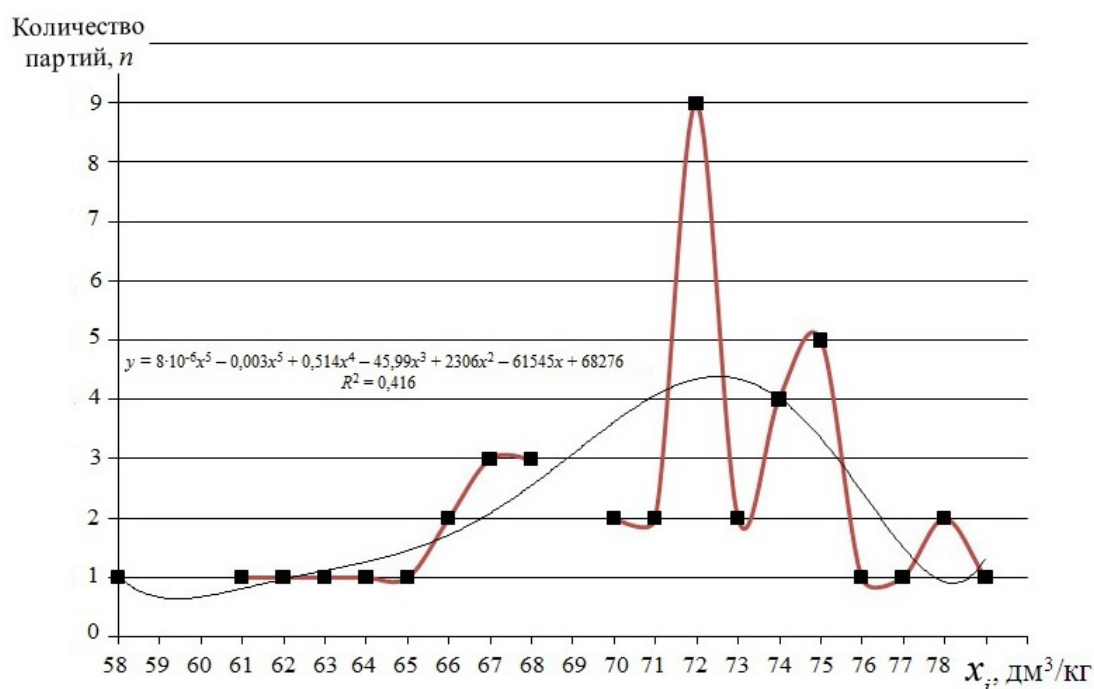
где t – коэффициент Стьюдента.

Отклонение фактического значения удельной сорбционной емкости ХП-И в конкретной партии от среднего может быть значительным. Вычислим отношение доверительного интервала к среднему значению сорбционной емкости m , %, по формуле

$$m = \frac{2tS}{\bar{x}} 100.$$

При средней дыхательной нагрузке и доверительной вероятности 0,95 на 120-й мин испытаний $m = 24,24$ %. Столь высокое среднее значение отношения m свидетельствует о недостаточной воспроизводимости сорбционных свойств в разных партиях ХП-И, что связано, по-видимому, с неудовлетворительным качеством сырья и особенностями технологического процесса изготовления поглотителя ХП-И.

По результатам анализа удельной сорбционной емкости ХП-И построен график распределения количества партий в зависимости от удельной сорбционной емкости поглотителя, определенной до 120-й мин (см. рисунок), из которого видно, что большая часть партий имеет сорбционную емкость более 66 $\text{дм}^3/\text{кг}$ (следует отметить, что данную сорбционную емкость определяли до 120-й мин эксперимента, при определении ее до проскока 0,5 % величина была бы выше).



Распределение количества партий поглотителя ХП-И по удельной сорбционной емкости x_i , $\text{дм}^3/\text{кг}$

Большинство партий поглотителя с сорбционной емкостью ниже 72 $\text{дм}^3/\text{кг}$ были изготовлены в 2018–2019 гг.; несмотря на более низкие показатели сорбционной емкости, они соответствовали требованиям ГОСТ 6755-88. Повышение сорбционной емкости поглотителя, изготовленного после 2020 г., обусловлено улучшением технологии производства и применением более качественного исходного сырья.

Всего было исследовано 28 партий, изготовленных одним производителем. При анализе графика распределения количества партий по удельной сорбционной емкости очевидны отдельные пики значений, которые могут быть обусловлены недостаточным размером выборки и определенными флуктуациями качества

сорбента, определяемыми производственными факторами (изменение качества исходного сырья, степень следования персоналом технологической карте и т.д.).

Нестабильность поглотительной способности ХП-И приводит к увеличению массы дыхательного аппарата, так как при его разработке необходимо ориентироваться на минимальное значение удельной сорбционной емкости поглотителя ХП-И.

Согласно ГОСТ 6755-88 испытания ХП-И проводят до 120-й мин. Это позволяет определять качество ХП-И и возможность его применения в дыхательных аппаратах, однако более полная картина о качестве поглотителя складывается при определении и сравнении удельной сорбционной емкости разных партий поглотителя, измеренной в точке некоторого проскока (0,5 %). Поэтому для более полной оценки качества ХП-И считаем целесообразным проводить испытания до проскока 0,5 %, а не завершать их через 120 мин. При разработке новых дыхательных аппаратов и регенеративных патронов к ним также следует ориентироваться на значение удельной сорбционной емкости поглотителя.

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о необходимости совершенствования поглотителя ХП-И и технологии его производства для стабилизации качества и повышения удельной сорбционной емкости – одного из основных параметров сорбента. При сравнительных испытаниях ХП-И целесообразно проводить их до достижения определенного значения проскока диоксида углерода в воздухе на выходе из патрона.

Список литературы / References

1. Вихляева, М.П. Исследование кинетики поглощения диоксида углерода известковым хемосорбентом / М.П. Вихляева, С.И. Дворецкий // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 882 – 888.

Vikhlyaeva M.P., Dvoretiskii S.I. *Issledovanie kinetiki pogloshheniya dioksida ugleroda izvestkovym khemosorbentom* [Investigation of kinetics of carbon dioxide sorption by lime chemisorbent]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 882-888. (In Russian).

2. Получение и свойства смешанного щелочного химического поглотителя диоксида углерода / В.В. Самонин, В.В. Далидович, Е.А. Спиридонова [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88, № 6. – С. 902 – 906.

Samonin V.V., Dalidovich V.V., Spiridonova E.A. [et al.]. *Poluchenie i svoistva smeshannogo shhelochnogo khimicheskogo poglotitelya dioksida ugleroda* [Generation and characteristics of mixed alkaline chemical absorbent of carbon dioxide]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Applied chemistry journal*, 2015, vol. 88, no. 6, pp. 902-906. (In Russian)

3. Суворова, Ю.А. Влияние состава известкового химического поглотителя на его сорбционные и прочностные характеристики / Ю.А. Суворова,

А.А. Тарова, И.В. Рязанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 318 – 325.

Suvorova Yu.A., Tarova A.A., Ryazanov I.V. *Vliyanie sostava izvestkovogo khimicheskogo poglotitelya na ego sorbtionnye i prochnostnye kharakteristiki* [Effect of chemical lime absorbent composition on its sorption and strength characteristics]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 318-325. (In Russian).

4. Тенденции и пути совершенствования известковых хемосорбентов. Основные направления повышения эксплуатационных и хемосорбционных характеристик / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.Б. Путин [и др.] // Российский химический журнал. – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 120 – 129.

Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Putin S.B. [et al.]. *Tendentsii i puti sovershenstvovaniya izvestkovykh khemosorbentov. Osnovnye napravleniya povysheniya ekspluatatsionnykh i khemosorbtsionnykh kharakteristik* [Trends and ways of improvement of lime chemisorbents. Main directions of enhancement of operational and chemisorption characteristics]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal – Russian chemical journal*, 2013, vol. 57, no. 1, pp. 120-129. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 07.04.2021

Tatyana Viktorovna Knyazeva, head of the Minister's office; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

*The Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters*

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone: (+38 062) 340-62-80

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

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

Viktor Ivanovich Frantsev, advanced engineer; 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

CONTROL OF THE XII-II ABSORBENT PROTECTIVE CAPACITY

Purpose. Investigation of the sorption capacity of the XII-II chemical lime absorbent for improvement of protective characteristics of breathing apparatuses.

Methods. Experimental and computational methods of investigations of the XII-II absorbent.

Results. The confidence interval of the sorption capacity has been computed for the XII-II chemical lime absorbent produced in the Donetsk People's Republic.

Scientific novelty. For the first time it has been proposed to determine a validity of the protective capacity of the XII-II absorbent at the breakthrough volume ratio of carbon dioxide equal to 0.5 % instead of investigating it according to GOST 6755-88.

Practical value. The obtained results of the investigations make it possible to confirm the compliance of the XII-II chemical lime absorbent manufactured in the DPR with the requirements of regulatory documents with the purpose of its further improvement.

Keywords: *chemical lime absorbent; breathing apparatus; protective capacity; sorption; sorbent; carbon dioxide; specific sorption capacity.*

УДК [622.822.22:614.841.13-035.3]:622.41

Виктория Петровна Орликова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: v.obep.2018@mail.ru;
Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.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

ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Цель. Установить функциональную зависимость состава газовой смеси от температуры разложения древесины для разработки критерия ее идентификации при подземных пожарах в угольных шахтах.

Методы. Экспериментальные исследования, математическая обработка полученных данных и аналитический метод оценивания известных критериев для идентификации горения древесины.

Результаты. Разработана методика экспериментальных исследований процесса термодеструкции древесины и проведен анализ образующихся газов. На примере оксида углерода рассмотрена динамика его объемной доли за время проведения эксперимента и установлены функциональные зависимости от температуры протекания процесса. Исследованы зависимости удельной массовой скорости выделения оксидов углерода и метана при деструкции и проанализированы коэффициенты, основанные на соотношении различных газов, образующихся в результате окисления древесины.

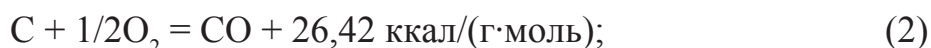
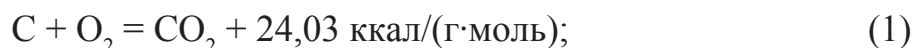
Научная новизна. На основании проведенных исследований определены средние значения коэффициентов, характеризующих процесс термического разложения древесины.

Практическая значимость. Экспериментальные исследования продуктов термодеструкции шахтной крепи позволят разработать критерий для идентификации древесины при подземном пожаре.

Ключевые слова: горение; термодеструкция; пожарные газы; горючее вещество; крепь; идентификация; шахтный воздух; критерий.

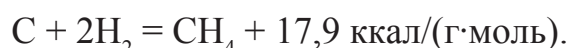
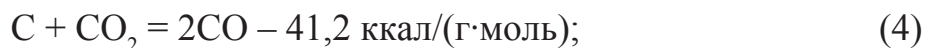
Постановка задачи. Для крепления горных выработок угольных шахт широко используют древесину преимущественно хвойных пород, обладающих более высокими механическими свойствами. Древесина как крепежный материал обладает достаточной прочностью и упругостью, легко обрабатывается, но в то же время является пожароопасной [1]. От соприкосновения с горячей крепью легко воспламеняется угольная пыль и мелочь, что приводит к увеличению масштаба и сложности подземного пожара.

Возникновение и развитие пожара в горной выработке зависит от таких факторов, как природа и количество горючего материала, устройство системы вентиляции, распространение токсичных продуктов горения и место очага. Из практики горноспасательных работ известно, что наиболее опасные и тяжелые по своим последствиям пожары возникают в проветриваемых выработках с деревянной крепью. Вентиляционный поток при движении по горящему пространству нагревается породами на участке выгоревшей крепи, а затем в зоне древесного угля, при этом концентрация кислорода уменьшается за счет следующих взаимодействий [2, 3]:



В результате экзотермических реакций температура горючих веществ достигает высоких значений, при этом температура воздуха за очагом пожара возрастает за счет конвективной и лучистой теплоты, переносимой воздушным потоком.

Обедненный кислородом разогретый воздух и образовавшиеся газы перемещаются дальше по выработке, где CO_2 восстанавливается до CO при контакте с раскаленным углем и древесиной. Химические реакции, протекающие в этой зоне, можно записать в виде



Теплота, выделяющаяся при реакциях (1) – (3) в зоне окисления, нейтрализуется эндотермическими реакциями (4) и (5) в зоне восстановления. Следовательно, по увеличению концентраций CO , H_2 и CH_4 в пробах воздуха можно определить переход реакции от окисления к восстановлению, за которой следует тенденция к снижению температуры [3].

Участие древесины в подземном пожаре сопровождается интенсивным выделением токсичных газов, концентрация которых зависит от температуры очага. Например, при температуре 150...200 °С из древесины выделяются диоксид и оксид углерода в соотношении 2:1, а дальнейшее повышение температуры приводит к образованию водорода и различных углеводородов [4].

Таким образом, основная опасность подземных пожаров с участием древесины заключается как в большой скорости их распространения и, следовательно, в возможности теплового поражения горнорабочих, так и в отравлении людей токсичными компонентами продуктов сгорания. В условиях аварийной ситуации одним из источников информации является состав пожарных газов, поэтому исследование продуктов термодеструкции древесины, используемой для крепления горных выработок, и разработка расчетного метода ее идентификации актуальны.

Анализ последних исследований. Элементный массовый состав всех пород древесины примерно одинаков: углерод 49...50 %, кислород 42...44 %,

водород 6...7 %, неорганическая часть 0,1...2 % (зола, состоящая из оксидов металлов и неметаллов). Древесина содержит также 0,1...1,0 % связанного азота, из которого при горении образуются оксиды NO_x , оказывающие вредное воздействие на здоровье человека [4].

Перечисленные химические элементы создают в древесине три основные группы соединений типа натуральных полимеров: целлюлозу 39...58 %, гемицеллюлозу 15...38 % и лигнин 17...34 %, которые отличаются по термостабильности.

Термическое разложение древесины начинается с разрушения гемицеллюлоз при достижении температуры 225 °С из-за высокой дефектности коротких полимерных цепей, а именно с пентозных частей гемицеллюлоз. Распад лигнина начинается при 200 °С вследствие гетеро- и гемолитической диссоциации химических связей между его структурными единицами, но наиболее активно этот процесс протекает в диапазоне 250...500 °С с образованием газов, основные из которых CO (50 %) и CH_4 (35...40 %). Целлюлоза разлагается в области температур 325...375 °С, при этом выделяется более 60 % CO_2 [4, 5]. Зная качественный и количественный газовый состав продуктов термодеструкции древесины, можно с достаточной для практики точностью оценить участие этого материала в пожаре.

Поэтому **цель работы** – установить функциональную зависимость состава газовой смеси от температуры разложения древесины для разработки критерия ее идентификации при пожаре.

Результаты исследований. Для экспериментальных исследований процесса горения древесины в лабораторных условиях разработана методика определения концентраций газообразных веществ (оксида углерода, диоксида углерода, метана), образующихся при термодеструкции образца. Кроме того, в газовой смеси определяют концентрацию кислорода, израсходованного в процессе окисления, и потерю массы образца древесины за время проведения эксперимента. В качестве объекта исследования выбрана сосна, используемая для крепления горных выработок.

Концентрацию газов определяют в диапазоне фиксированных температур 200...600 °С на лабораторной установке термического разложения веществ (рис. 1).

В муфельную электропечь, предварительно нагретую до заданной температуры, помещают корзинку кубической формы с размером ребра 50 мм с исследуемым образцом древесины, который выдерживают 30 мин, а затем измеряют концентрации изучаемых газов и рассчитывают потерю массы. Через 5, 10 и 20 мин проводят промежуточные измерения для рассмотрения динамики разложения исследуемого вещества.

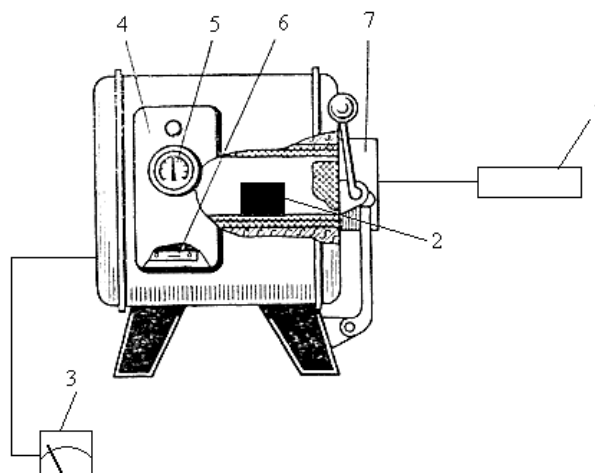


Рис. 1. Схема установки термического разложения веществ:
 1 – аспиратор газовой смеси; 2 – пробирка с образцом; 3 – милливольтметр;
 4 – блок управления; 5 – реле температуры; 6 – подключение к сети переменного тока 220 В; 7 – муфельная электропечь

Массовую концентрацию газа C_m , мг/м³, в образующейся смеси рассчитывают по формуле

$$C_m = \frac{C_0 M_a P T_0}{100 V_m P_0 T_l},$$

где C_0 – объемная доля газа, %;

M_a – молярная масса газа, мг/моль;

P и T_l – давление, кПа, и температура, °С, в лаборатории;

P_0 – давление при стандартных условиях, равное 101,3 кПа;

T_0 – температура при стандартных условиях, равная 20 °С;

V_m – молярный объем газа, равный 0,0224 м³/моль.

После окончания испытаний и охлаждения образца древесины рассчитывают потерю массы Δm , %, по формуле

$$\Delta m = \frac{m_H - m_K}{m_H} \cdot 100, \quad (6)$$

где m_H и m_K – начальная и конечная масса образца древесины, г.

С учетом времени термодеструкции определяют удельную массовую скорость выделения газа C_y , мг/(м³·мин), по формуле

$$C_y = C_m / \tau, \quad (7)$$

где τ – время термодеструкции образца древесины, мин.

На примере образования оксида углерода рассмотрено изменение его объемной доли в продуктах термодеструкции образца древесины за

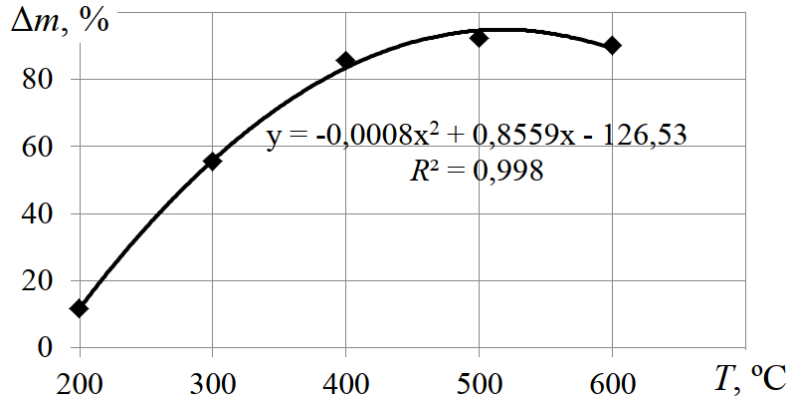


Рис. 4. Зависимость потери массы образца от температуры

Аппроксимация результатов динамики оксида углерода при 300, 500 и 600 °С позволила с высокой достоверностью установить функциональные зависимости объемной доли этого газа от продолжительности термодеструкции. При 200 и 400 °С через 10 мин проведения испытания определены максимальные значения СО, которые отличаются между собой в 85 раз за счет распада лигнина и целлюлозы при более высокой температуре. Однако для дальнейшего исследования процесса термодеструкции древесины рассмотрены данные, полученные в течение 30 мин проведения эксперимента, так как за этот период происходит усреднение концентрации в объеме муфельной печи.

В исследуемом температурном интервале можно отметить практически симбатное уменьшение концентрации кислорода с нарастанием диоксида углерода, образующегося в газовой смеси, которое с высокой достоверностью описано полиномиальной и логарифмической зависимостями (рис. 5, а). Максимальное значение удельной массовой скорости выделения оксида углерода и метана, рассчитанное по формуле (7), зафиксировано при 300 °С (рис. 5, б), при этом CH_4 при 200 °С не обнаружен.

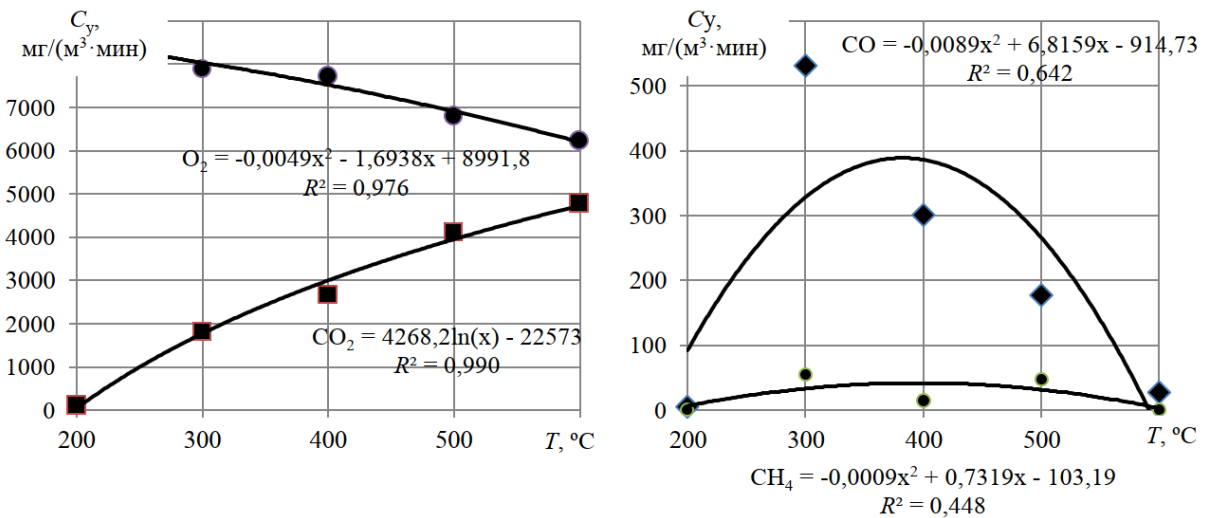


Рис. 5. Зависимость удельной массовой скорости выделения газов при различной температуре деструкции:

а – ● – O₂; ■ – CO₂; б – ◆ – CO; ▲ – CH₄

На основании результатов экспериментального исследования термодеструкции древесины рассмотрим возможность ее идентификации путем установления коэффициентов, основанных на газовом анализе и не зависящих от разбавления пробы свежим воздухом, [3, 6, 7]

$$K = \frac{(\text{CO}_2 - \text{CO}_2^{\text{H}})}{(\text{O}_2^{\text{H}}\text{N}_2 / \text{N}_2^{\text{H}} - \text{O}_2)};$$

$$GR = \frac{\text{CO}}{(\text{O}_2^{\text{H}} \cdot \text{N}_2 / \text{N}_2^{\text{H}} - \text{O}_2)};$$

$$K_p = \frac{0,5\text{CO} + (\text{O}_2^{\text{H}}\text{N}_2 / \text{N}_2^{\text{H}} - \text{O}_2) - 1,03(\text{CO}_2 + \text{CO} - \text{CO}_2^{\text{H}})}{0,97(\text{CO}_2 + \text{CO} - \text{CO}_2^{\text{H}})},$$

где CO , CO_2 , O_2 и N_2 – объемная доля газов в исследуемой смеси, %;

O_2^{H} , N_2^{H} и CO_2^{H} – начальные концентрации газов, принятые равными 20,96, 79 и 0,04 % соответственно.

Полученные значения коэффициентов K , GR , K_p (рис. 6) иллюстрируют разные подходы к их расчету и объясняют разбег значений, однако при этом можно отметить их сходственное изменение с увеличением температуры разложения древесины за 30 мин проведения испытаний. При 300 °C установлены максимальные значения рассматриваемых коэффициентов, а после 400 °C, когда при высоких температурах разлагается большая часть древесины, K , GR и K_p изменяются незначительно. В области температур 300...600 °C определены средние значения коэффициентов, которые изменяются следующим образом: $K = 3,95$; $GR = 1,13$; $K_p = -0,63$.

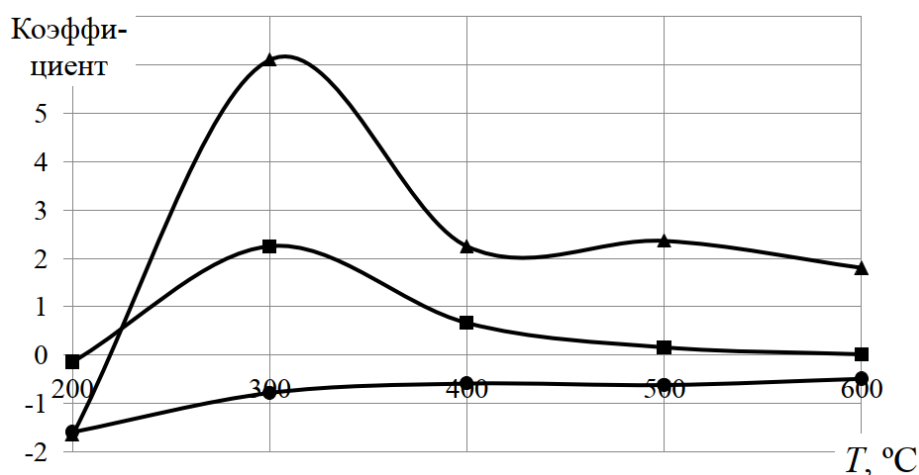


Рис. 6. Значения коэффициентов при различной температуре:

▲ – K ; ■ – GR ; ● – K_p

Необходимо отметить, что коэффициенты K и GR основаны на отношении концентраций оксида или диоксида углерода и кислорода, израсходованного

на образование этих оксидов по реакциям (1) и (2). Коэффициент K_p учитывает совместное присутствие оксидов углерода (продуктов реакции окисления) в газоздушном смеси и основан на их соотношении CO/CO_2 . Использование концентрации CO_2 для идентификации древесины достаточно точно подтверждено установленной функциональной зависимостью от температуры, но в реальных условиях достоверность может быть снижена из-за высокой растворимости в воде газа и способности его к поглощению твердыми пористыми веществами.

Вывод. Разработана методика экспериментальных исследований процесса термодеструкции древесины и проведен анализ образующихся газов. На примере оксида углерода рассмотрена динамика его объемной доли за время проведения эксперимента и установлены функциональные зависимости от температуры протекания процесса. Исследованы зависимости удельной массовой скорости выделения оксидов углерода и метана при различной температуре деструкции и определены коэффициенты, основанные на реакции окисления древесины. Апробация полученных результатов на данных газового анализа аварийных проб позволит разработать критерий идентификации горючего вещества в очаге пожара.

Список литературы / References

1. Портола, В.А. Пожарная безопасность горных предприятий / В.А. Портола. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2008. – 158 с.
Portola V.A. *Pozharnaya bezopasnost' gornyykh predpriyatii* [Fire safety of mining enterprises]. Kemerovo, GU KuzGTU Press, 2008, 158 p. (In Russian).
2. Лобазнов, А.В. Разработка способа и средств обнаружения начальной стадии подземных пожаров: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Лобазнов. – М., 2011. – 23 с.
Lobaznov A.V. *Razrabotka sposoba i sredstv obnaruzheniya nachal'noi stadii podzemnykh pozharov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of method and means for detecting the initial stage of underground fires: Cand. tech. sci. diss. abstract]. Moscow, 2011, 23 p. (In Russian).
3. Sahay N., Sinha A., Haribabu B. [et al.]. *Dealing with open fire in an underground coal mine by ventilation control techniques* // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2014, vol. 114, pp. 445-453. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v114n06p445.pdf>.
4. Хошев, Ю.М. Дровяные печи. Процессы и явления / Ю.М. Хошев. – М., 2014. – 392 с.
Khoshev Yu.M. *Drovyanye pechi. Protsessy i yavleniya* [Wood-fired stoves. Processes and phenomena]. Moscow, 2014, 392 p. (In Russian).
5. Асеева, Р.М. Горение и пожарная опасность древесины / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов: науч.-техн. журн. – М., 2012. – Т. 21, № 1. – С. 19 – 32.

Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Gorenie i pozharnaya opasnost' drevesiny* [Combustion and fire hazard of wood]. *Pozharovzryvoopasnost' veshhestv i materialov: nauch.-tekhn. zhurn.* [Fire and explosion hazard of substances and materials: scientific-technical journal]. Moscow, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19-32. (In Russian).

6. 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 (Donetsk branch) Publ., 2013, 792 p. (In Russian).

7. Методика распознавания вида сгорающих веществ при пожарах в выработанных пространствах угольных шахт: утв. Всесоюзным управлением военизированных горноспасательных частей 27.06.1986. – Донецк: ВНИИГД, 1986. – 25 с.

Metodika raspoznavaniya vida sgorayushhikh veshhestv pri pozharakh v vyrabotannykh prostranstvakh ugol'nykh shakht: utv. Vsesoyuznym upravleniem voenizirovannykh gornospasatel'nykh chastei 27.06.1986 [Methodology of identification of a type of burning materials during fires in mined-out spaces of coal mines: approved by the All-Union Department of Para-military Mine-rescue units on June 27, 1986]. Donetsk, VNIIGD Publ., 1986, 25 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 21.03.2022

Viktoria Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: v.obep.2018@mail.ru;

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

GAS ANALYSIS OF WOOD THERMAL DECOMPOSITION PRODUCTS

Purpose. To establish a functional dependence of gas mix composition on temperature of wood decomposition for development of a criterion of its identification in underground fire in coal mines.

Methods. Experimental investigations, mathematical processing of the obtained data and analytical method for assessing the known criteria for identification of wood combustion.

Results. The methodology for experimental investigations of the process of wood thermal decomposition has been developed, and the analysis of the generated gases has been carried out. Using the example of carbon oxide the dynamics of its volume ratio within the period of experiment conduction has been examined, and the functional dependences on the temperature of the proceeding process have been established. The dependences of the specific mass rate of emission of carbon oxides and methane during decomposition have been investigated, and coefficients based on the ratio of various gases generated as a result of wood oxidation have been analyzed.

Scientific novelty. Based on the conducted investigations the average values of the coefficients characterizing the wood thermal decomposition process have been determined.

Practical value. The experimental investigations of the products of the barring thermal decomposition will make it possible to develop the criterion for identification of wood during the underground fire.

Keywords: *combustion; thermal decomposition; fire gases; flammable substance; barring; identification; mine air; criterion.*

УДК 543.544.943.3:547.53

Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Олег Владимирович Храпоненко, науч. сотр; e-mail: olghrap@mail.ru;
Оксана Николаевна Щербакова, вед. инж.; e-mail: astra-jasmine-@mail.ru;
Алексей Владимирович Сиверский, инж.; e-mail: alekseysiverskiy@gmail.com
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-56

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОБАХ, ОТОБРАННЫХ С МЕСТА ПОЖАРА

Цель. Разработать методику качественного индивидуального обнаружения бензина, керосина, дизельного топлива в пробах, отобранных с места пожара, методом тонкослойной хроматографии для повышения достоверности идентификации.

Методы. Экспериментальные исследования с использованием тонкослойной хроматографии и сравнительный анализ.

Результаты. Разработана методика качественного обнаружения наличия бензина, керосина, дизельного топлива в пробах, изъятых с места пожара. Выбран оптимальный состав основной подвижной фазы, разработана контрольная подвижная фаза. Проведена оптимизация параметров, отвечающих за разделение компонентов пробы, что позволило достоверно различать хроматограммы исследуемых веществ. Определены критерии идентификации исследуемых веществ.

Научная новизна. Впервые установлены закономерности для индивидуальной идентификации в пробах бензина, керосина и дизельного топлива. Применение двух подвижных фаз (основной и контрольной) значительно повысит достоверность идентификации данных веществ.

Практическая значимость. Методика позволяет оперативно и достоверно обнаруживать наличие исследуемых компонентов в пробах, отобранных с места пожара, при проведении пожарно-технических исследований. Получены эталонные хроматограммы разделения бензина, керосина, дизельного топлива при использовании основной и контрольной подвижных фаз.

Ключевые слова: *инициаторы горения; бензин; керосин; дизельное топливо; неподвижная жидкая фаза; хроматографическая пластинка; относительная подвижность пятен.*

Постановка проблемы. В большинстве случаев при совершении поджогов возникновение пожаров начинается с возгорания инициаторов горения, то есть с легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, которые являются вещественными доказательствами при проведении пожарно-технических экспертиз.

В результате исследований [1 – 4] установлено, что наиболее распространенные инициаторы горения при поджогах – бензин, керосин и дизельное топливо, что обусловлено возможностью свободного приобретения населением аналогичных веществ и широкой областью их применения в быту. Это обусловило выбор трех перечисленных веществ для разработки методики их идентификации.

Тип примененного нефтепродукта можно установить методом тонкослойной хроматографии, который характеризуется простотой техники выполнения работы, невысокой стоимостью и доступностью оборудования, экспрессностью, экономичностью, хотя он и уступает методу аккумулятивной газовой хроматографии в отношении предела обнаружения веществ. Его можно применять в качестве самостоятельного метода исследования или как предшествующий методу газовой хроматографии для получения предварительных данных и выбора направления дальнейших исследований.

Кроме того, тонкослойную хроматографию часто используют как метод фракционирования соединений с целью их последующего спектрального анализа [5, 6].

Для большинства лабораторий всегда актуальна потребность в доступном, недорогом, универсальном методе установления причин возникновения пожаров при проведении исследований.

Анализ последних исследований и публикаций. Литературные данные о методиках обнаружения таких горючих жидкостей, как бензин, керосин и дизельное топливо, предназначены для определения только группового состава моторных топлив (бензина и группы керосина и дизельного топлива). Хроматограммы проявляют в них с использованием относительно дорогого оборудования и малодоступных реактивов. К настоящему времени применяемые методики, состав моторных топлив, ассортимент пластинок для хроматографии подверглись значительным преобразованиям, как следствие – изменилось хроматографическое поведение образцов моторных топлив. В связи с этим назрела необходимость разработки современной методики определения типа светлых нефтепродуктов с использованием метода тонкослойной хроматографии.

Цель исследования. Разработать методику качественного индивидуального обнаружения бензина, керосина, дизельного топлива в пробах, отобранных с места пожара, методом тонкослойной хроматографии для повышения достоверности идентификации.

Метод исследования. Метод тонкослойной хроматографии основан на селективном разделении многокомпонентных смесей вследствие их различной сорбируемости при движении вдоль слоя сорбента в потоке подвижной фазы и последующем проявлении полученных хроматограмм [7, 8, 9].

При проведении тонкослойной хроматографии для разделения веществ используют хроматографическую пластинку, представляющую собой основу (подложку), на которую нанесен тонкий слой сорбента. В качестве подвижной фазы применяют одно- или многокомпонентные составы из смеси нескольких растворителей.

Анализ смеси веществ проводят по следующей схеме: на пластинку сорбента на небольшом расстоянии от края наносят на линию старта каплю разделяемой смеси, пластинку подсушивают и помещают в хроматографическую

камеру с подвижной фазой. Последняя под действием капиллярных сил поднимается по сорбенту, вместе с ней с различной скоростью перемещаются определяемые вещества. Скорость перемещения компонентов характеризуется их коэффициентами распределения: чем меньше коэффициент распределения, тем быстрее вещество передвигается по сорбенту.

Зоны разделяемых веществ представляют собой пятна, которые могут быть видимыми и невидимыми; в последнем случае хроматограмму проявляют (делают видимой), обрабатывая специфическим реагентом.

Изложение основного материала и полученные научные результаты.

При проведении исследований были выбраны материалы и оборудование; определен объем подвижной фазы для хроматографической камеры; выбран растворитель для нанесения пробы; определены объем пробы и степень ее разведения; выбраны окрашивающие составы, пригодные для исследования определяемых горючих жидкостей, наиболее подходящие для разработки методики подвижные фазы; проведена их оптимизация и оптимизация условий хроматографирования.

Получены хроматограммы горючих жидкостей – бензина, керосина, дизельного топлива – в разных подвижных фазах, при которых анализируемым веществам характерно разное хроматографическое поведение (окраска, форма, количество, месторасположение пятен).

Выбрана трехкомпонентная подвижная фаза (изооктан-толуол-этилацетат), позволяющая идентифицировать исследуемые вещества.

Проведена оптимизация состава основной подвижной фазы (по соотношению ее трех компонентов). Полученные результаты использованы для разработки методики обнаружения и исследования остатков горючих жидкостей на основе тонкослойной хроматографии.

На основе полученных экспериментальных данных разработана методика обнаружения в пробах остатков бензина, керосина и дизельного топлива, в отличие от известных методик позволяющая индивидуально идентифицировать каждое вещество в диапазоне его концентраций в пробе 12,5...100 %, что соответствует степени разведения от 1:7 до неразбавленной. Для повышения чувствительности метода применяют предварительное концентрирование проб с контролем диапазона получаемых концентраций, что позволяет снизить порог обнаружения веществ до 0,125 % или до степени разведения 1:700.

Выполнение измерений проводят при соблюдении определенных технических условий (табл. 1).

Перед началом анализа пластинки подготавливают для хроматографии, очищают от загрязняющих веществ и активируют. Для извлечения и нанесения пробы используют растворители – петролейный эфир или гексан. При высокой концентрации пробу наносят однократно, при низкой – пробу концентрируют. Диаметр образуемого пятна при нанесении должен находиться в пределах (4 ± 1) мм.

Таблица 1

Технические условия выполнения анализа

Наименование условий	Значение условий
Способ хроматографирования	Восходящая хроматография
Состав основной подвижной фазы	Изооктан-толуол-этилацетат (10,0:3,5:0,1)
Состав контрольной подвижной фазы	Изооктан
Объем подвижной фазы для анализа, мл	68
Тип хроматографических пластинок	«Сорбфил» ПТСХ-АФ-А (10×15), (10×10), «Сорбфил» ПТСХ-АФ-А-УФ (10×15), (10×10)
Объем одного нанесения пробы, мкл	0,5
Наносимый объем вещества сравнения, мкл	0,5
Расстояние между точками нанесения проб, см	1,5
Расстояние от нижнего края пластинки до линии старта, см	1,0
Тип хроматографической камеры	N-камера
Размеры камеры (внутренние), мм	Длина – 160; ширина – 80; высота – 108
Способ сушки пластинок после хроматографирования	На открытом воздухе или устройством конвективного нагрева пластинок (феном)
Температура сушки пластинок после хроматографирования	Комнатная
Способ проявления	Химический

Глубина погружения нижнего края пластинки в подвижную фазу должна составлять (4 ± 1) мм. Основную подвижную фазу готовят, смешивая изооктан, толуол и этилацетат в объемных соотношениях 10,0:3,5:0,1 соответственно. Полученную подвижную фазу наливают в хроматографическую камеру и сразу накрывают крышкой. В качестве контрольной подвижной фазы используют изооктан, а в качестве сравнения – зимнее дизельное топливо. Его наносят и хроматографируют одновременно с пробой.

N-камера классического исполнения служит хроматографической камерой. Она должна располагаться строго горизонтально по уровню, быть герметичной, с притертой крышкой, смазанной вакуумной смазкой. Перед хроматографированием камеру насыщают парами подвижной фазы в течение одного часа.

Анализируемую пробу и пробу вещества сравнения наносят на линию старта расчерченной хроматографической пластинки микрошприцем или

капилляром. После нанесения пробы и вещества сравнения растворитель свободно испаряется до исчезновения следов мокрого пятна.

Хроматографическую пластинку под углом около 75° помещают в хроматографическую камеру, на дно которой за 60 мин до начала хроматографирования наливают подвижную фазу. Подвижная фаза под действием капиллярных сил поднимается по пластинке, проходит через слой сорбента, на который нанесены проба и вещество сравнения. После достижения фронтом подвижной фазы высоты 8 см от стартовой линии процесс хроматографирования прекращают. Пластинку вынимают из камеры, сушат на открытом воздухе под таким же наклоном в течение 10 мин, а затем проявляют полученную хроматограмму раствором.

В качестве раствора-проявителя используют формалитовую смесь – 2 %-й раствор формалина в концентрированной серной кислоте: 73 мг (приблизительно 1 капля) 40 %-го формалина, растворенного в 2 мл концентрированной серной кислоты. Формалитовая смесь – очень чувствительный реагент на ароматические углеводороды и образует с ними яркие цветные пятна.

Согласно методике идентификацию бензина, керосина и дизельного топлива проводят по следующим параметрам:

- количество пятен на хроматограмме;
- форма пятен;
- окраска пятен;
- R_{st} – относительная подвижность верхнего пятна пробы.

В соответствии с ГОСТ 28366-89 «Реактивы. Метод тонкослойной хроматографии» относительную подвижность R_{st} верхнего пятна исследуемой пробы по отношению к верхнему пятну вещества сравнения рассчитывают следующим образом:

$$R_{st} = \frac{l}{l_{st}},$$

где l – расстояние от стартовой линии до центра пятна пробы (пробег пятна пробы), мм;

l_{st} – расстояние от стартовой линии до центра пятна вещества сравнения (пробег пятна вещества сравнения), мм.

Качественный анализ исследуемых веществ осуществляют путем сравнения хроматограмм проб неизвестного состава с характеристиками хроматограмм определяемых веществ (бензина, керосина, дизельного топлива), полученных предварительно при неизменных технических условиях анализа.

Характеристики хроматографических пятен определяемых веществ при заданных в методике параметрах и разведении, не превышающем значение 1:7, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика хроматографических пятен определяемых веществ
для основной подвижной фазы

Наименование вещества	Характеристики пятен определяемых веществ				
	Количество пятен	Номер пятна (от линии старта)	Форма, расположение	Окраска пятна	Доверительный интервал относительной подвижности верхних пятен (по дизельному топливу)
Бензин	2	1	несколько растянуто от старта	коричнево-желтая	0,939...1,086
		2	округлая	коричнево-красная, снизу серовато-голубая	–
Керосин	1	1	верх не округлый, от приплюснутой до слегка вогнутой, бобовидная форма менее выражена, чем у дизельного топлива	красно-коричневая, центральная часть (бобовидная) более темная, верхняя – более светлая, низ сероватый	0,927...1,078
Дизельное топливо	2	1	несколько растянуто от старта	коричнево-желтая	0,936...1,082
		2	верх не округлый, от приплюснутой до вогнутой, пятно имеет бобовидную форму разной величины	красно-коричневая, центральная часть (бобовидная) более темная, верхняя – более светлая, низ сероватый	

После определения характеристик хроматограммы анализируемой пробы проводят сравнение их с данными табл. 2 по количеству, форме и окраске пятен. При выявлении соответствия с одним из определяемых веществ рассчитывают относительную подвижность верхнего пятна пробы по верхнему пятну вещества сравнения, хроматографируемого одновременно с пробой на одной пластинке. Полученное значение относительной подвижности пробы R_{st} сравнивают с доверительным интервалом относительной подвижности предполагаемого вещества по данным табл. 2. Вещество считают идентифицированным при совпадении всех четырех параметров.

При невозможности однозначной идентификации пробы с одним из определяемых веществ (при наличии определенного сходства) проводят хроматографирование пробы в контрольной подвижной фазе – изооктане – совместно с определяемыми веществами. В контрольной фазе веществам характерно другое хроматографическое поведение (форма, местонахождение, количество пятен, окраска).

Если хроматографическое поведение пробы и одного из определяемых веществ частично совпадает в основной подвижной фазе и полностью совпадает по первым трем параметрам в контрольной фазе, то пробу считают идентифицированной с этим веществом.

Выводы. Разработана методика обнаружения остатков горючих и легковоспламеняющихся веществ (источников пожаров) с использованием тонкослойной хроматографии, которая позволяет повысить достоверность и определить наличие в пробах остатков моторных топлив, а также идентифицировать их тип.

Список литературы / References

1. Чешко, И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / под науч. ред. канд. юрид. наук Н.А. Андреева. – 2-е изд., стереотип. – СПб.: СПБИБ МВД России, 1997. – 562 с.

Cheshko I.D. *Ekspertiza pozharov (ob'ekty, metody, metodiki issledovaniya)*. 2-e izd., stereotip. / pod nauch. red. kand. yurid. nauk N.A. Andreeva [Fire expertise (objects, methods, methodologies of investigation). The 2nd stereotype edition under scientific editorship of candidate of juridical sciences Andreev N.A.]. St. Petersburg, SPbIPB MVD Rossii Press, 1997, 562 p. (In Russian).

2. Техническое обеспечение расследования поджогов, совершенных с применением инициаторов горения / И.Д. Чешко [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2002. – 131 с.

Cheshko I.D. [et al.]. *Tekhnicheskoe obespechenie rassledovaniya podzhogov, sovershennykh s primeneniem initsiatorov goreniya* [Technical support of investigation of arsons committed with the use of accelerants]. Moscow, VNIIPPO Publ., 2002, 131 p. (In Russian).

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

Kutuev P.Kh., Cheshko I.D., Golyaev V.G. *Obnaruzhenie i issledovanie sledov legkovosplamenyayushhikh i goryuchikh zhidkостей v veshhestvennykh dokazatel'stvakh, izyemaemykh s mesta pozhara* [Detection and investigation of traces of flammable and combustible liquids in physical evidences collected from a place of fire]. Moscow, VNIIPPO Publ., 1985, 49 p. (In Russian).

4. Стручкова, М.Д. Обнаружение и классификация инициаторов горения при исследовании объектов пожарно-технической экспертизы / М.Д. Стручкова, С.Е. Чемезова // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: мат-лы XI междунар. науч.-практ. конф. – М.: НИЦ «Академический», 2017. – С. 23 – 126.

Struchkova M.D., Chemezova S.E. *Obnaruzhenie i klassifikatsiya initsiatorov goreniya pri issledovanii ob"ektov pozharno-tekhnicheskoi ekspertizy* [Detection and classification of accelerants in investigation of objects of fire-and-technical examination]. *Aktual'nye napravleniya fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy: mat-ly XI mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Topical trends of fundamental and applied investigations: materials of the 11th international scientific and practical conference]. Moscow, NITs "Akademicheskii" Publ., 2017, pp. 23-126. (In Russian).

5. Мартынов, В.Ф. Исследование дизельного топлива методом тонкослойной хроматографии в экспертных целях / В.Ф. Мартынов, Ю.Н. Бельшина // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: науч.-аналит. журн. – 2012. – № 4. – С. 135 – 139.

Martynov V.F., Bel'shina Yu.N. *Issledovanie dizel'nogo topliva metodom tonkosloinoi khromatografii v ekspertnykh tselyakh* [Investigation of diesel fuel applying the thin-layer chromatography for the expert purposes]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii: nauch.-analit. zhurn. – Bulletin of the Saint Petersburg State Fire Safety University of EMERCOM of Russia: scientific-analytical journal*, 2012, no. 4, pp. 135-139. (In Russian).

6. Гусев, К.Г. Изучение сохранности образцов нефтепродуктов на поверхности хроматографических пластин при их исследовании в целях экологических и пожарно-технических экспертиз / К.Г. Гусев, И.О. Хаустов, Ф.А. Дементьев // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2015. – № 2. – С. 29 – 32.

Gusev K.G., Khaustov I.O., Dement'ev F.A. *Izuchenie sokhrannosti obraztsov nefteproduktov na poverkhnosti khromatograficheskikh plastin pri ikh issledovanii v tselyakh ekologicheskikh i pozharno-tekhnicheskikh ekspertiz* [Study of preservation of oil products samples on chromatographic plates surface during their investigation for purposes of environmental and fire and technical expert evaluations]. *Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti – Supervising activity and forensic inquiry in safety system*, 2015, no. 2, pp. 29-32. (In Russian).

7. Куліков, А.Ю. Тонкошарова хроматографія / А.Ю. Куліков. – Харків: Харківський нац. унів. імені В.Н. Каразіна, 2011. – 259 с.

Kulikov A.Yu. *Tonkosharova khromatohrafiia* [Thin-layer chromatography]. Kharkov, Kharkivs'kyi nats. univ. imeni V.N. Karazina Press, 2011, 259 p. (In Ukrainian).

8. Тонкослойная хроматография. Теоретические основы и практическое применение / Е.Г. Сумина [и др.]. – Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 2012. – 128 с.

Sumina E.G. [et al.]. *Tonkosloinaya khromatografiya. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Thin-layer chromatography. Theoretical bases and practical application]. Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi universitet im. N.G. Chernyshevskogo Press, 2012, 128 p. (In Russian).

9. Гейсс, Ф. Основы тонкослойной хроматографии. Планарная хроматография / Ф. Гейсс; под ред. В.Г. Березкина: в 2 т. – М.: Химия, 1999. – 753 с.

Geiss F., Beryozkin V.G. [ed.]. *Osnovy tonkosloinoi khromatografii. Planarnaya khromatografiya. V 2 t.* [Basics of thin-layer chromatography. Planar chromatography. In two volumes]. Moscow, Khimiya Publ., 1999, 753 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 14.04.2022

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Oleg Vladimirovich Khraponenko, scientific associate; e-mail: olghrap@mail.ru;
Oksana Nikolaevna Shcherbakova, advanced engineer; e-mail: astra-jasmine-@mail.ru;
Aleksey Vladimirovich Siverskiy, engineer; e-mail: alekseysiverskiy@gmail.com
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) 332-78-56

DETECTION OF FLAMMABLE LIQUIDS IN SAMPLES COLLECTED FROM A PLACE OF FIRE

Purpose. To develop a methodology for qualitative individual detection of benzene, kerosene, diesel fuel in the samples collected from the place of fire applying the thin-layer chromatography method for identification accuracy improvement.

Methods. Experimental investigations applying the thin-layer chromatography and comparative analysis.

Results. The methodology of qualitative detection of benzene, kerosene, diesel fuel presence in the samples collected from the place of fire has been worked out. The optimum composition of the primary mobile phase has been selected, the control mobile phase has been developed. The optimization of parameters responsible for division of the sample components has been conducted making it possible to differentiate accurately the chromatograms of substances under investigation. The criteria of identification of substances under investigation have been determined.

Scientific novelty. For the first time the regularities for the individual identification in benzene, kerosene and diesel fuel samples have been established. The application of two mobile phases (the primary and control ones) will significantly increase the accuracy of identification of the given substances.

Practical value. The methodology makes it possible to detect urgently and accurately the presence of the components under investigation in the samples collected from the place of fire during conduction of fire and technical investigations. The reference chromatograms of benzene, kerosene and diesel fuel separation have been obtained utilizing the primary and control mobile phases.

Keywords: *accelerants; benzene; kerosene; diesel fuel; liquid stationary phase; chromatographic plate; relative mobility of spots.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 622.45:622.831.322

Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;

Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. комп.; e-mail: avrstla@mail.ru;

Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru;

Владимир Владимирович Захлебин, инж. I кат.; e-mail: avarvent@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*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ В ШАХТАХ ПОСЛЕ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ

Цель. На основе научно обоснованных расчетов и компьютерных моделей шахтных вентиляционных сетей разработать рекомендации по проветриванию аварийных участков для обеспечения безопасности ведения аварийно-спасательных работ в шахтах после внезапных выбросов угля, породы и газа.

Методы. Аналитический и теоретический методы исследования, а также метод компьютерного моделирования воздухо- и газораспределения по сети шахты в аварийных условиях.

Результаты. С учетом закономерностей изменения аэродинамического сопротивления горных выработок и вентиляционных сооружений после внезапных выбросов угля, породы и газа разработаны способ и порядок усиления проветривания аварийного участка путем перевода режима вентилятора главного проветривания на более высокую аэродинамическую характеристику. Обосновано применение прогрессивных схем проветривания при проектировании новых выемочных участков шахт.

Научная новизна. Предложены способы и алгоритм расчета проветривания аварийных участков шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа, отличающиеся от известных возможностью на основе компьютерной модели шахтной вентиляционной сети более достоверно прогнозировать воздухо- и газораспределение в зависимости от объемов выброшенной горной массы в выработку.

Практическая значимость. Разработанные рекомендации могут быть основой нормативного документа, регламентирующего режим проветривания аварийных участков после внезапных выбросов угля, породы и газа при ведении горноспасательных работ для обеспечения безопасности работников шахты и горноспасателей.

Ключевые слова: шахта; горноспасательная служба; аварийно-спасательные работы; внезапные выбросы угля, породы и газа; проветривание выработок; обеспечение безопасности.

Постановка проблемы. Один из самых опасных видов аварий в шахтах – внезапные выбросы угля, породы и газа. Согласно статистике [1] за период с 2000 по 2020 г. в условиях шахт произошло 46 внезапных выбросов, что по частоте возникновения составляет 2,2 % аварий и аварийных ситуаций от общего количества и 6,2 % подземных аварий. Угледобывающая промышленность несет значительный материальный ущерб, имеют место человеческие жертвы среди

работников шахт вследствие физического травмирования людей выброшенной горной массой, нарушения проветривания выработок шахты и формирования в них непригодной для дыхания среды. Помимо этого, ведение аварийно-спасательных работ в загазованных выработках аварийного участка сопряжено с вероятностью взрыва метановоздушной смеси.

Анализ последних исследований и публикаций. Особенности проявления внезапных выбросов угля, породы и газа, а также другие вопросы частично рассмотрены в работах [2, 3]. Однако вопросы проветривания выработок аварийного участка после выбросов для обеспечения безопасности работников шахты и горноспасателей недостаточно изучены, что обуславливает актуальность и необходимость проведения настоящих исследований и разработки соответствующих рекомендаций.

Цель статьи – на основе научно обоснованных расчетов и компьютерных моделей шахтных вентиляционных сетей разработать рекомендации по проветриванию аварийных участков для обеспечения безопасности ведения аварийно-спасательных работ в шахтах после внезапных выбросов угля, породы и газа.

Материалы и результаты исследований. Проведенные исследования и научно-технический анализ позволили установить, что наибольшее количество внезапных выбросов происходит при сплошной системе разработки в краевых частях очистных забоев и в забоях подготовительных выработок. На этих объектах зачастую находится значительное количество работников шахт, которые выполняют работы по проведению и креплению выработок, выемке угля, уборке горной массы и др.

Один из основных и надежных способов обеспечения безопасности работ после внезапных выбросов в шахтах – восстановление и усиление проветривания выработок, в том числе увеличение подачи воздуха на аварийный участок с целью его разгазирования. Это способствует решению задачи спасения людей, снижения концентраций метана в выработках с исходящей струей воздуха, времени загазования выработок, вероятности взрывов метана на месте ведения аварийно-спасательных работ и в прилегающих выработках, предотвращения возможности самовозгорания выброшенного угля, что позволяет повысить безопасность ведения аварийно-спасательных работ.

Анализ выбросов и шахтных вентиляционных сетей позволил установить, что подачу необходимого количества воздуха для улучшения проветривания и снижения концентраций метана на аварийном участке и в выработках с исходящей струей воздуха после внезапного выброса можно обеспечить за счет:

- снижения аэродинамического сопротивления горных выработок путем раскрытия дверей регуляторов расхода воздуха, имеющихся в выработке аварийного участка с исходящей струей;

- увеличения аэродинамического сопротивления вентиляционных шлюзов, обеспечивающих воздухом аварийный участок, расположенных между свежей и исходящей струями;
- снижения подачи воздуха на второстепенные соседние объекты, расположенные параллельно аварийному участку (поддерживаемые выработки, различные камеры, не имеющие источников газовыделения);
- использования в отдельных случаях фактических внутренних резервов воздуха на других параллельных газообильных объектах вентиляционной сети (очистные и подготовительные забои) при фактическом значении объемной доли метана в исходящей струе регулируемого участка значительно меньше допустимой нормы;
- перевода режима работающего вентилятора главного проветривания (далее – ВГП) на более высокую аэродинамическую характеристику или организации совместной параллельной работы действующего и резервного вентиляторов;
- использования вентиляторов местного проветривания с трубопроводами определенной длины и диаметра в качестве средства разгазирования выработок и положительного регулирования;
- использования трубопроводов сжатого воздуха для местного проветривания и обеспечения дыхания работников шахты, застигнутых в аварийном участке;
- усиления параметров систем дегазации и (или) газоотсоса при применении комплексной дегазации для увеличения отвода части выделившегося метана;
- ликвидации завалов и обрушений в выработках аварийного участка, уборки выброшенного выбросом угля, проведения выработок небольшого сечения в выброшенном угле для ускорения поиска пострадавших и усиления проветривания участка за счет общешахтной депрессии;
- комбинации вышеперечисленных способов.

Раскрытие дверей регуляторов расхода воздуха, имеющих на аварийном участке или по ходу движения исходящей вентиляционной струи, – наиболее простой, быстро вводимый в действие, безопасный и эффективный способ увеличения подачи воздуха на аварийный участок.

Эффективность способа достаточно велика, если аэродинамическое сопротивление регулятора значительно превышает аэродинамическое сопротивление выработки, в которой он установлен. При открытии дверей общее аэродинамическое сопротивление выработки с регулятором может уменьшиться до 4...10 раз по сравнению с его значением в нормальном режиме проветривания, а расход воздуха на аварийном участке может увеличиваться на 30...70 %. При этом остаются неизменными схема проветривания, предназначение выработок и направление движения воздуха в них, что обеспечивает безопасный порядок выхода горнорабочих в выработки со свежей

вентиляционной струей. Кроме того, увеличивается эффективность отвода метана из выброшенного угля по вентиляционной выработке.

Аэродинамические сопротивления одиночного регулятора при раскрытых дверях и различном сечении выработки, где он установлен, приведены в таблице, а изменение его аэродинамического сопротивления при раскрытом состоянии дверей с окном регулятора – на рис. 1.

Аэродинамическое сопротивление одиночного регулятора расхода воздуха при раскрытом состоянии дверей

Площадь проема регулятора, м ²	Аэродинамическое сопротивление одиночного регулятора при раскрытом состоянии дверей и поперечном сечении выработки, м ²											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,3	63,7	67,9	71	73,4	75,2	76,7	78,0	79,0	80,0	80,7	81,4	82
1,5	41,6	45,1	47,6	49,5	51,1	52,3	53,4	54,2	55,0	55,6	55,2	56,7
2,0	19,8	22,2	24,0	25,4	26,5	27,4	28,1	28,7	29,3	29,7	30,1	30,5
3,0	6,0	7,3	8,4	9,2	9,9	10,4	10,9	11,3	11,6	11,9	12,2	12,4
3,8	0,7	1,7	2,6	4,8	5,3	5,7	6,0	6,3	6,6	6,8	7,0	7,2
5,0	–	1,2	1,6	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6

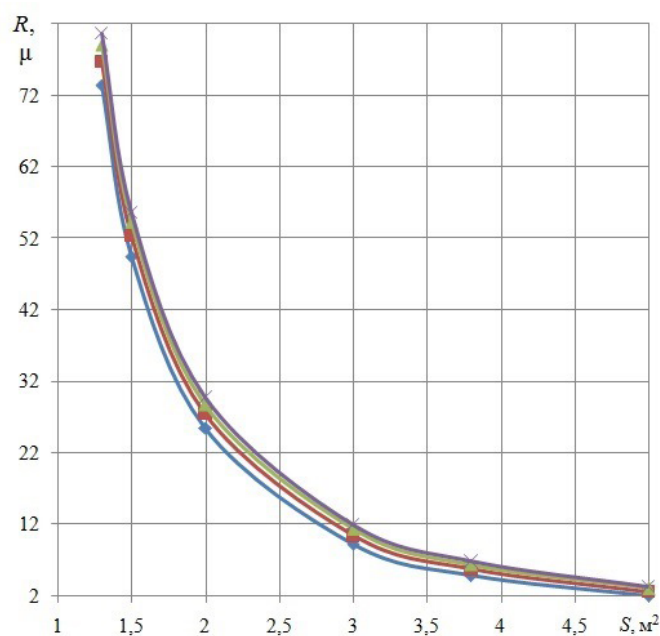


Рис. 1. Изменение значения аэродинамического сопротивления регулятора (на примере выработок с поперечным сечением 8, 10, 12 и 14 м²) при раскрытом состоянии дверей с окном регулятора:

— 8 м² — 10 м² — 12 м² — 14 м²

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении сечения дверей с окном регулятора аэродинамическое сопротивление проема резко уменьшается, незначительно зависит от поперечного сечения выработки, а определяется главным образом площадью дверей регулятора.

Аэродинамическое сопротивление одиночного регулятора в раскрытом состоянии двери при поперечном сечении выработки более 16,0 м² следует рассчитывать по формуле

$$R_{\text{ор}} = \frac{0,147}{S_{\text{в}}^2 \left(\frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{ор}}} - 0,65 \right)^2},$$

где $R_{\text{ор}}$ – аэродинамическое сопротивление одиночного регулятора при раскрытом состоянии двери, 10⁻² Па·с²/м⁶;

$S_{\text{в}}$ – поперечное сечение выработки в свету, м²;

$S_{\text{ор}}$ – поперечное сечение дверей одиночного регулятора, м².

Все возможные варианты проветривания и их эффективность должны заблаговременно рассчитываться на персональных электронно-вычислительных машинах, в том числе в аварийных ситуациях с использованием результатов аэрогазового контроля, выполняемого горноспасателями опытным путем при ликвидации аварии (последствий внезапного выброса).

На основании проведенных ранее исследований [4] установлено, что один из способов усиления проветривания аварийного участка – регулирование режима работы ВГП. Применение данного способа основано на выполнении следующего алгоритма.

Определяют величину резервов воздуха на ВГП графическим методом и путем расчета вентиляционной сети шахты на персональных электронно-вычислительных машинах. При графическом методе аэродинамическую характеристику вентиляционной сети определяют по депрессионной съемке или по параметрам режима работы ВГП.

На аэродинамическую характеристику вентилятора следует нанести аэродинамическую характеристику вентиляционной сети (рис. 2, кривая 1).

Используя аэродинамические характеристики ВГП и вентиляционной сети, необходимо найти точку их пересечения и значение фактической подачи воздуха вентилятором. Для этого на ось абсцисс из точки пересечения характеристик (рис. 2, точка А) опускают перпендикуляр и определяют фактическую подачу воздуха ВГП (рис. 2, точка $Q_{\phi 1}$). Из пересечения аэродинамической характеристики вентиляционной сети с максимальной аэродинамической характеристикой работы ВГП (рис. 2, точка В) опускают на ось абсцисс второй перпендикуляр и определяют максимальную подачу воздуха ВГП (рис. 2, точка Q_1) на данную вентиляционную сеть.

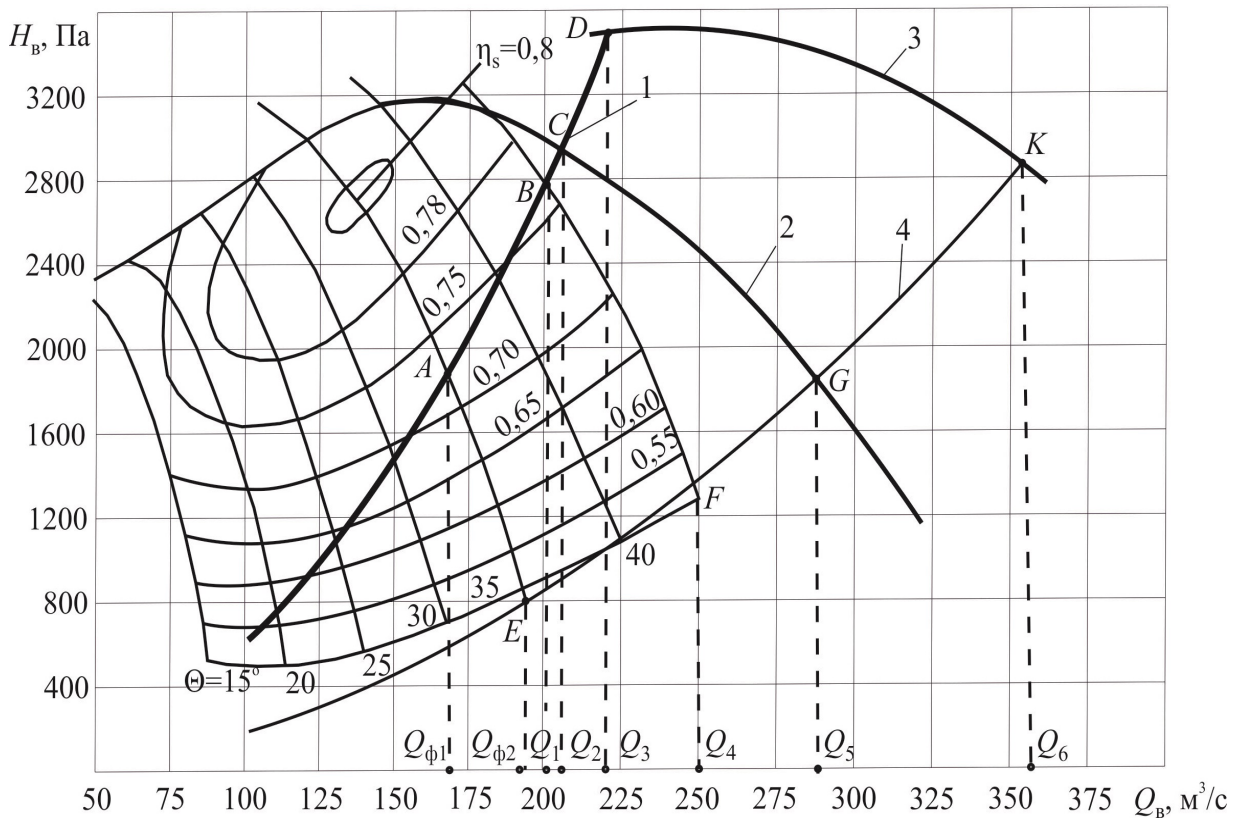


Рис. 2. Определение резерва воздуха при работе вентилятора на разных аэродинамических характеристиках и аэродинамических характеристиках рабочего и резервного ВПП при их совместной работе:

1 – аэродинамическая характеристика ВПП; 2 – аэродинамическая характеристика при совместной работе на действующей характеристике ВПП; 3 – аэродинамическая характеристика вентиляторов при совместной работе ВПП на максимальных характеристиках

Резерв воздуха на ВПП $Q_{рез}$, m^3/c , следует определять по разности расходов воздуха при работе ВПП на максимальной и действующей аэродинамической характеристике ВПП по формуле

$$Q_{рез} = Q_1 - Q_{\phi 1},$$

где Q_1 – расход воздуха ВПП при работе на максимальной аэродинамической характеристике, m^3/c ;

$Q_{\phi 1}$ – расход воздуха ВПП при работе на действующей аэродинамической характеристике, m^3/c .

Для определения резерва воздуха на выемочном участке необходимо использовать коэффициент резерва и увеличения расхода воздуха $k_{ув}$, который определяют по формуле

$$k_{ув} = \frac{Q_1}{Q_{\phi 1}}.$$

Расчет основан на положении, что увеличение подачи воздуха во всех ветвях вентиляционной сети пропорционально его изменению на ВГП.

Для дополнительной подачи воздуха на выемочный участок может быть задействован резервный ВГП (совместная параллельная работа). Для устойчивой совместной параллельной работы резервный и действующий вентиляторы должны иметь одинаковую аэродинамическую характеристику и одинаковые параметры. При включении резервного вентилятора в работу может потребоваться небольшое оперативное регулирование параметров одного ВГП для устойчивости их работы.

Возможный расход воздуха определяют построением совместной аэродинамической характеристики работы двух ВГП (рис. 2, кривая 2). Для этого последовательно суммируют производительность рабочего и резервного ВГП при одинаковых депрессиях и находят точку пересечения суммарной аэродинамической характеристики ВГП с аэродинамической характеристикой вентиляционной сети (рис. 2, кривая 1, точка *C*). Опустив из точки *C* перпендикуляр на ось абсцисс, находят максимальный расход воздуха (точка Q_2), подаваемый вентиляторами в действующих режимах при их совместной работе.

В случае недостаточной подачи воздуха рабочий и резервный ВГП переводят на совместную работу при их максимальной аэродинамической характеристике (рис. 2, кривая 3) и из точки *D* пересечения аэродинамической характеристики вентиляционной сети и совместной аэродинамической характеристики двух ВГП на максимальных характеристиках опускают перпендикуляр на ось абсцисс, при этом получают максимальный расход воздуха (точка Q_3), который может обеспечить совместная работа ВГП на максимальных аэродинамических характеристиках.

Помимо вышеизложенного, одно из мероприятий по обеспечению безопасности работников шахт и горноспасателей, а также по сокращению количества внезапных выбросов – применение прогрессивных схем проветривания выемочных участков.

В настоящее время в условиях действующих шахт при отработке пластов, опасных по газодинамическим явлениям, применяют в основном возвратноточные схемы проветривания с последовательным разбавлением вредностей типа 1В-Н-в-вт, которые характеризуются:

- максимальным количеством потенциально опасных мест происхождения выбросов угля, породы и газа;
- малой нагрузкой на очистной забой из-за применения способа последовательного разбавления вредностей;
- местными скоплениями метана и др.

Однако при проектировании схем проветривания выемочных участков на выбросоопасных пластах первостепенное значение имеют схемы с подачей

свежего воздуха к очистному забою по двум выработкам. Данные схемы позволяют обеспечить оперативный выход шахтеров в выработки со свежей струей воздуха и повысить безопасность ведения аварийно-спасательных работ.

Для этого рекомендуется использовать прогрессивные схемы проветривания, в том числе прямоточные схемы проветривания с подачей свежего воздуха к лаве по двум выработкам. Они имеют высокую надежность и устойчивость проветривания, обеспечивают обособленное от лавы проведение и проветривание подготовительных забоев, полное обособленное разбавление вредных веществ (газ, пыль) и теплоты, выделяющихся из всех источников на выемочном участке (из отбитого и транспортируемого угля, выработанного пространства), максимальную нагрузку на очистной забой по газовому фактору и др.

На безопасность ведения аварийно-спасательных работ также влияет устойчивость проветривания участков в связи с ростом концентрации метана после выброса, динамического и гравитационного напоров метана. Гравитационный напор и аэродинамическое сопротивление участка выработки с выброшенным углем следует определять в соответствии с методикой из работы [4]. Фактическое влияние гравитационного напора метана в каждом конкретном случае может быть установлено включением его значения в ветвь сети, где он возник, и моделированием воздухораспределения по выработкам шахты.

При моделировании воздухораспределения необходимо учитывать величину депрессии естественной тяги шахты h_e , мм вод. ст., которую следует определять посредством замеров, исходя из результатов депрессионной съемки, или рассчитывать по приближенной формуле

$$h_e = 0,0047H(T_{\text{исх}} - T_{\text{п}}),$$

где H – глубина ведения горных работ, м;

$T_{\text{исх}}$ – средняя температура воздуха в выработках с исходящей струей, °С;

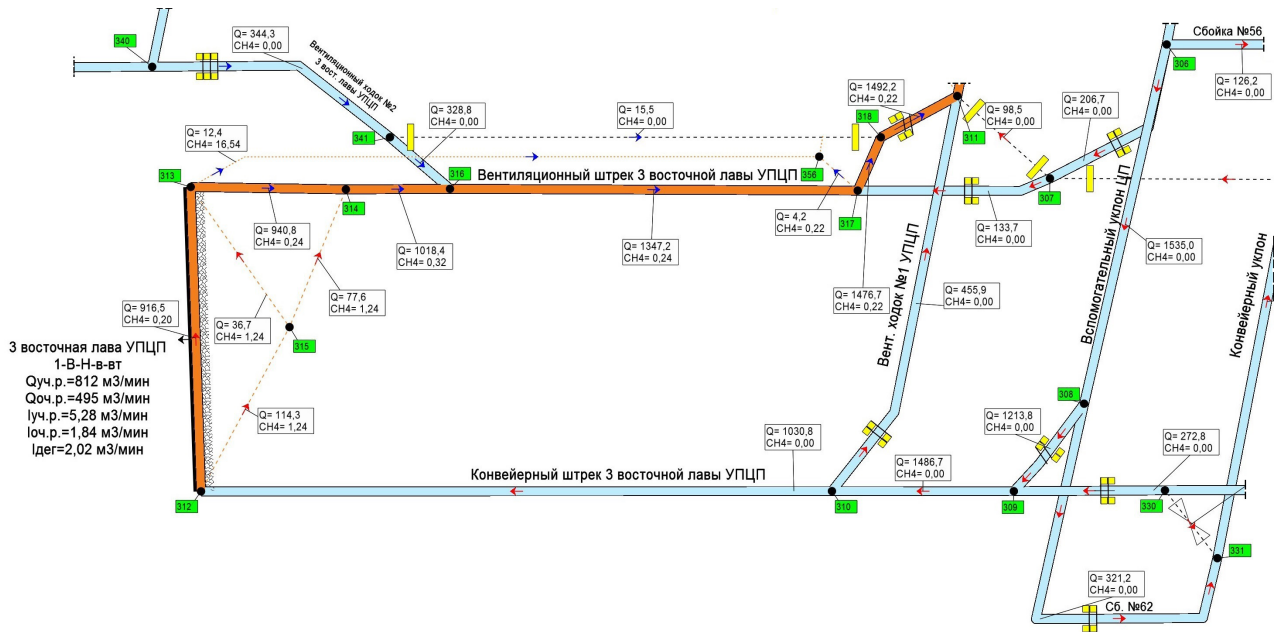
$T_{\text{п}}$ – средняя температура воздуха в выработках с поступающей струей, °С.

В качестве примера на основе компьютерной модели [5] шахтной вентиляционной сети Филиала «Шахта имени А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК» выполнен расчет воздухо- и газораспределения на условно аварийном участке 3 восточной лавы уклонного поля центральной панели при моделировании внезапного выброса в нижней нише.

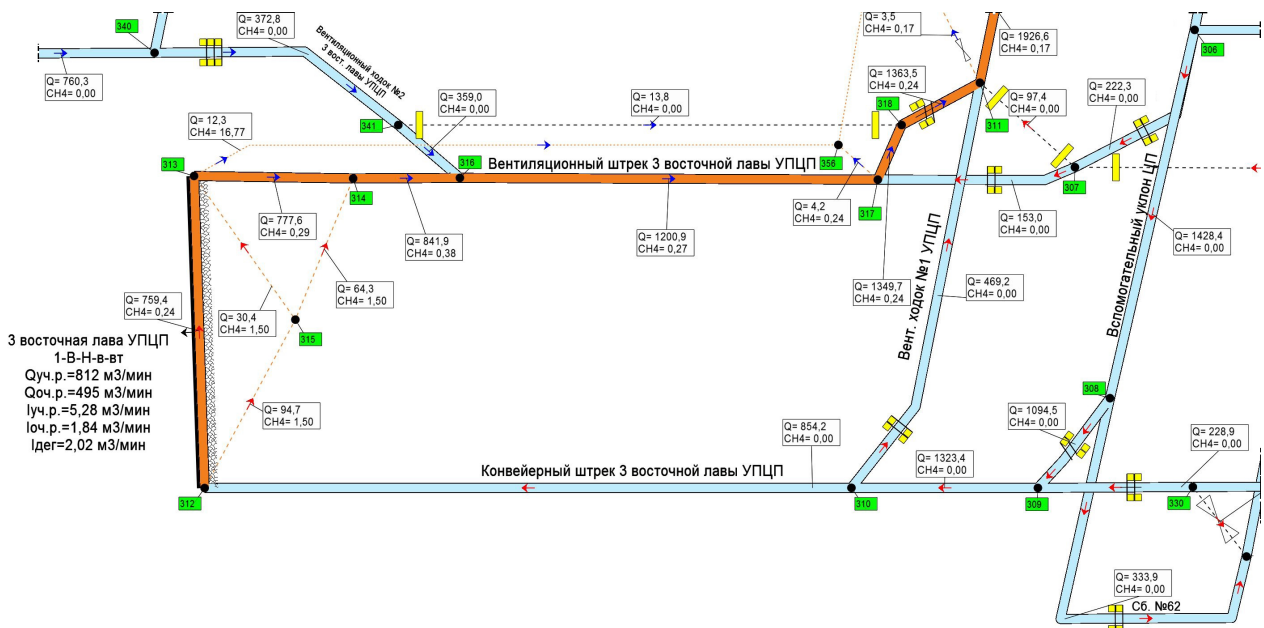
Результаты расчета вентиляционной сети условно аварийного участка на компьютерной модели представлены на рис. 3: нормальный режим, а также при перекрытии поперечного сечения выработки выброшенной горной массой на 50 и 75 %.

Использование компьютерных моделей шахтных вентиляционных сетей и проведение соответствующих расчетов позволяет выполнить более достоверный прогноз воздухо- и газораспределения на аварийном участке шахты при различных объемах выброшенной горной массы и разработать соответствующие мероприятия по ведению аварийно-спасательных работ.

а



б



В

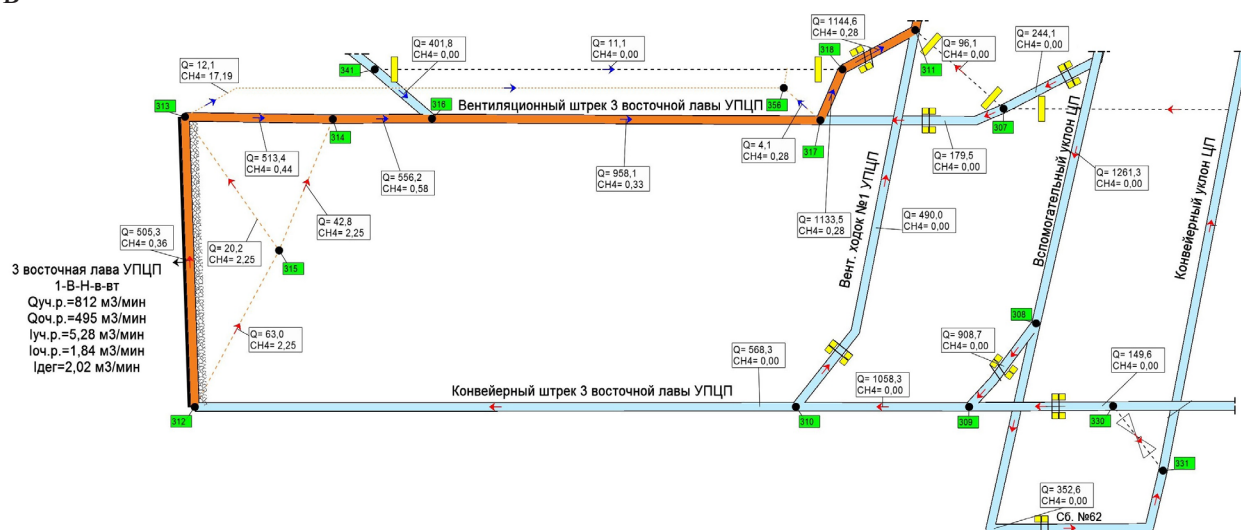


Рис. 3. Результаты расчета воздухо- и газораспределения на компьютерной модели вентиляционной сети условно аварийного участка:

- а – воздухо- и газораспределение по участку в нормальном режиме;
 б – воздухо- и газораспределение по участку при перекрытии выброшенной горной массой на 50 % поперечного сечения выработки; в – воздухо- и газораспределение по участку при перекрытии выброшенной горной массой на 75 % поперечного сечения выработки

Выводы. На основе научно обоснованных расчетов с использованием компьютерных моделей шахтных вентиляционных сетей и учетом закономерностей изменения аэродинамического сопротивления горных выработок и вентиляционных сооружений после внезапных выбросов угля, породы и газа разработаны рекомендации по проветриванию аварийных участков.

Предложены способ и порядок усиления проветривания аварийного участка путем переключения режима работы ВГП на более высокую аэродинамическую характеристику. Обосновано применение прогрессивных схем проветривания при проектировании новых выемочных участков шахт.

Обоснованное ведение расчетов воздухо- и газораспределения аварийного участка шахты должно основываться на компьютерных моделях вентиляционных сетей.

Список литературы / References

1. Агарков, А.В. Об аварийности в угольных шахтах и применении системы дистанционного контроля состава шахтной среды при проведении горноспасательных работ / А.В. Агарков // Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. ГОУ ВПО «ДонНТУ». – Донецк, 2019. – № 5. – С. 294 – 313. – URL: <http://ed.donntu.org/books/19/cd8966.pdf> (дата обращения: 01.04.2022).

Agarkov A.V. *Ob avariinosti v ugol'nykh shakhtakh i primenenii sistemy distantsionnogo kontrolya sostava shakhtnoi sredy pri provedenii gornospasatel'nykh rabot* [On emergency rate in coal mines and application of remote control system of mine environment monitoring during conduction of mine-rescue operations]. *Innovatsionnye tekhnologii razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: sb. nauch. tr. GOU VPO "DonNTU"* [Innovative technologies of mineral deposits development: collection of scientific papers of GOU VPO "DonNTU"]. Donetsk, 2019, no. 5, pp. 294-313. Available at: <http://ed.donntu.org/books/19/cd8966.pdf> (accessed: 01.04.2022). (In Russian).

2. Левкин, Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / Н.Б. Левкин. – Донецк: Донбасс, 2002. – 393 с.

Lyovkin N.B. *Predotvrashhenie avarii i travmatizma v ugol'nykh shakhtakh Ukrainy* [Prevention of accidents and traumatism in Ukraine's coal mines]. Donetsk, Donbass Publ., 2002, 393 p. (In Russian).

3. Большинский, М.И. Газодинамические явления в шахтах / М.И. Большинский, Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Севастополь: Вебер, 2003. – 284 с.

Bol'shinskii M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. *Gazodinamicheskie yavleniya v shakhtakh* [Gas-dynamic phenomena in mines]. Sevastopol', Veber Publ., 2003, 284 p. (In Russian).

4. Симонов, А.М. Проветривание аварийных участков шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа / А.М. Симонов, Н.В. Карнаух, А.В. Агарков // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 3(58). – С. 68 – 79.

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Agarkov A.V. *Provetrivanie avariinykh uchastkov shakht posle vnezapnykh vybrosov uglya, porody i gaza* [Ventilation of emergency areas of mines after sudden outbursts of coal, rock and gas]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 3(58), pp. 68-79. (In Russian).

5. Кобылкин, С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дис. ... д-ра техн. наук / С.С. Кобылкин. – М.: НИТУ «МИСиС», 2018. – 322 с.

Kobylkin S.S. *Metodologicheskie osnovy sistemnogo proektirovaniya ventilyatsii shakht: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Methodological fundamentals of system mine ventilation design: Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, NITU "MISiS" Press, 2018, 322 p. (In Russian).

Aleksandr Mikhailovich Simonov, head of department; e-mail: avrstla@mail.ru;
Nikolay Viktorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: avrstla@mail.ru;
Aleksandr Vladislavovich Agarkov, advanced engineer; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru;
Vladimir Vladimirovich Zakhlebin, engineer of the 1st category; e-mail: avarvent@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

PROVISION OF SAFETY OF EMERGENCY OPERATIONS CARRYING-OUT IN MINES AFTER SUDDEN OUTBURSTS

Purpose. To develop guidelines for ventilation of emergency areas for provision of safety of emergency operations carrying-out in mines after sudden outbursts of coal, rock and gas on the basis of scientifically grounded calculations and computer simulations of mine ventilation networks.

Methods. Analytical and theoretical methods of investigations as well as the method of computer simulation of air- and gas-distribution in the mine network in emergency conditions.

Results. The method and procedure for strengthening the ventilation of the emergency area by switching the main fan mode on higher aerodynamic characteristic have been worked out factoring in the regularities of change in aerodynamic resistance of mine workings and ventilation constructions after the sudden outbursts of coal, rock and gas. The application of progressive ventilation schemes in design of new working areas of mines has been substantiated.

Scientific novelty. The methods and algorithm of calculation for ventilation of the emergency areas of mines after sudden outbursts of coal, rock and gas have been proposed; they differ from known ones by a possibility based on a computer simulation of the mine ventilation network to predict more accurately the air- and gas-distribution depending on the amount of rock mass ejected into a mine working.

Practical value. The elaborated recommendations may lay a foundation for a regulatory document administering the mode of emergency areas ventilation after the sudden outbursts of coal, rock and gas during carrying-out of the mine-rescue operations for providing the safety of miners and mine-rescuers.

Keywords: *mine; mine-rescue service; emergency operations; sudden outbursts of coal, rock and gas; ventilation of mine workings; accident prevention.*

УДК [622.012.2:005.416]:622.861

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

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

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

Людмила Михайловна Попова, вед. инж.; 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) 332-78-44, 332-78-49*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЛИКВИДИРУЕМЫХ ШАХТАХ ДНР

Цель. Исследование проблем техногенной безопасности на ликвидируемых шахтах ДНР на основе анализа аварийности и производственного травматизма для выявления и идентификации опасностей и причин чрезвычайных ситуаций с последующей разработкой корректирующих мероприятий по повышению уровня техногенной безопасности.

Методы. Аналитические исследования статистических данных о состоянии охраны труда и промышленной безопасности на угольных шахтах, находящихся на стадиях консервации и ликвидации, с использованием системного анализа и математической обработки результатов исследования.

Результаты. Выполнена идентификация опасностей, воздействующих на шахтера вследствие чрезвычайной ситуации на ликвидируемой шахте, и предложены предупреждающие меры по их купированию.

Научная новизна. Впервые обоснован системный подход к идентификации опасностей и причин чрезвычайных ситуаций на ликвидируемых шахтах ДНР.

Практическая значимость. Повышение безопасности условий труда на ликвидируемых шахтах путем прогнозирования опасностей и реализации мероприятий по их устранению или снижению до приемлемого уровня.

Ключевые слова: ликвидируемые шахты; охрана труда; техногенная безопасность; чрезвычайная ситуация; производственный травматизм; причины чрезвычайных ситуаций; идентификация опасностей; корректирующие мероприятия; приемлемый риск.

Постановка проблемы. Анализ состояния угольной промышленности Донецкой Народной Республики показывает, что за последние годы в силу целого ряда объективных и субъективных причин существенно изменилась структура шахтного фонда. Количество шахт, осуществляющих добычу угля, начиная с 2014 года и по настоящее время сократилось более чем в 2 раза – с 33 до 14. За этот же период количество шахт, прекративших добычу угля и находящихся на разных стадиях ликвидации, увеличилось с 53 до 72.

В процессе перевода угольных предприятий из разряда действующих в разряд ликвидируемых существенно изменяется количество промышленно-производственного персонала в целом по отрасли, а также из расчета на одну шахту.

Снижение общей численности работающих на ликвидируемых шахтах более чем в 6,6 раза и почти девятикратное снижение численности из расчета на одну шахту априори должно привести к сокращению количества случаев производственного травматизма на ликвидируемых шахтах, что подтверждают статистические данные. За период с 1 января 2014 по 1 декабря 2021 г. на предприятиях по добыче угля произошло 2522 случая производственного травматизма, в том числе 123 случая со смертельным исходом. Общее число дней нетрудоспособности вследствие травмирования работников составило 83624. Для сравнения, на ликвидируемых шахтах за этот же период травмировано 148 работников (в 17 раз меньше), из них смертельно – 15 человек (в 8,2 раза меньше), а количество дней нетрудоспособности составило 4329 (в 19,3 раза меньше). Однако сравнительный анализ абсолютного количества случаев производственного травматизма на действующих угольных предприятиях и ликвидируемых шахтах не отражает объективного состояния промышленной безопасности и охраны труда на этих предприятиях. Более объективную картину состояния производственного травматизма на угольных предприятиях различного статуса представляют относительные показатели, которые достовернее характеризуют уровень промышленной безопасности.

Существующая в Донецкой Народной Республике нормативно-техническая документация недостаточна для практического использования при анализе опасностей и оценке риска чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) на ликвидируемых шахтах. Функционирующая в настоящее время в угольной отрасли система управления промышленной безопасностью и охраной труда устанавливает одинаковые требования для угледобывающих предприятий и для ликвидируемых шахт. В системе управления промышленной безопасностью и охраной труда не учтены существенные различия в целях и задачах функционирования действующих и ликвидируемых шахт, технологических процессах, структурах штата персонала предприятия.

Как следствие, проблематика в вопросах промышленной безопасности и охраны труда на угольных предприятиях, находящихся в процессе ликвидации, исследована недостаточно, не в полной мере обеспечено безопасное функционирование этих объектов.

Анализ последних исследований. По результатам исследований определено, что в процессе оценки рисков негативных событий в ходе ликвидации угледобывающих предприятий в Украине, России, Чехии основное внимание уделяется проблемам экологических и социально-экономических последствий [1 – 5]. Производственный травматизм на ликвидируемых шахтах практически не рассматривается ввиду значительно меньшего количества случаев по сравнению с действующими угольными предприятиями. В отличие от действующих шахт на ликвидируемых угольных предприятиях не ведется добыча угля и нет выхода товарной продукции. Поэтому ЧС местного уровня, если они не привели к ущербу здоровью работников, зачастую

не документируются, и наиболее характерным показателем состояния промышленной безопасности и охраны труда на ликвидируемых шахтах остается производственный травматизм.

Проведенный анализ статистических данных по уровню производственного травматизма на ликвидируемых шахтах показал, что 68 % ЧС возникает по организационным причинам, 26 % – по психофизиологическим и всего 6 % – по техническим. То есть более 90 % ЧС происходит в результате принятых персоналом ошибочных решений вследствие недостатка информации или ее неадекватного анализа и оценки, без прямого воздействия природных, технических и технологических факторов.

Цель работы – анализ производственного травматизма на ликвидируемых шахтах ДНР, установление и идентификация опасностей и причин ЧС, присущих шахтам, находящимся на различных стадиях ликвидации.

Результаты исследования. В угольной отрасли для оценки состояния охраны труда применяют следующие коэффициенты, характеризующие уровень производственного травматизма:

$k_{\text{чо}}$ – коэффициент частоты производственного травматизма на 1 тыс. работающих;

$k_{\text{ст}}$ – коэффициент частоты смертельного травматизма на 1 млн т добычи;

$k_{\text{т}}$ – коэффициент тяжести, рассчитываемый по формуле

$$k_{\text{т}} = \frac{S_{\text{нт}}}{(N_{\text{пт}} - N_{\text{ст}})},$$

где $S_{\text{нт}}$ – количество дней нетрудоспособности вследствие несчастных случаев на производстве;

$N_{\text{пт}}$ – общее количество случаев производственного травматизма;

$N_{\text{ст}}$ – количество случаев производственного травматизма со смертельным исходом.

Для ликвидируемых шахт коэффициент $k_{\text{ст}}$ неприменим, поэтому для более объективной оценки уровня смертельного травматизма на них и сравнения с аналогичным показателем на действующих шахтах целесообразно применять коэффициент частоты смертельного травматизма на 1 тыс. работающих $k_{\text{чс}}$, который рассчитывают по формуле

$$k_{\text{чс}} = \frac{N_{\text{ст}}}{P},$$

где P – общая численность работников предприятия, тыс. чел.

Проведенный сравнительный анализ уровня производственного травматизма на действующих и ликвидируемых шахтах ДНР за последние 8 лет показал следующее.

$k_{\text{чо}}$ для действующих шахт составляет 9,24, а для ликвидируемых – 2,67, то есть меньше в 3,46 раза (абсолютный показатель меньше в 17 раз).

Динамика уровня общего производственного травматизма, характеризуемая коэффициентом частоты, свидетельствует о тенденции снижения этого показателя на действующих шахтах и его значительном росте в 4,4 раза на ликвидируемых шахтах.

Среднее значение коэффициента частоты смертельного травматизма на 1 тыс. работающих за восемь лет на действующих шахтах всего в 1,78 раза выше аналогичного коэффициента на ликвидируемых шахтах (0,41 против 0,23). Динамика изменения коэффициента частоты производственного травматизма со смертельным исходом на 1 тыс. работающих за 2014 – 2021 гг. представлена на рис. 1.

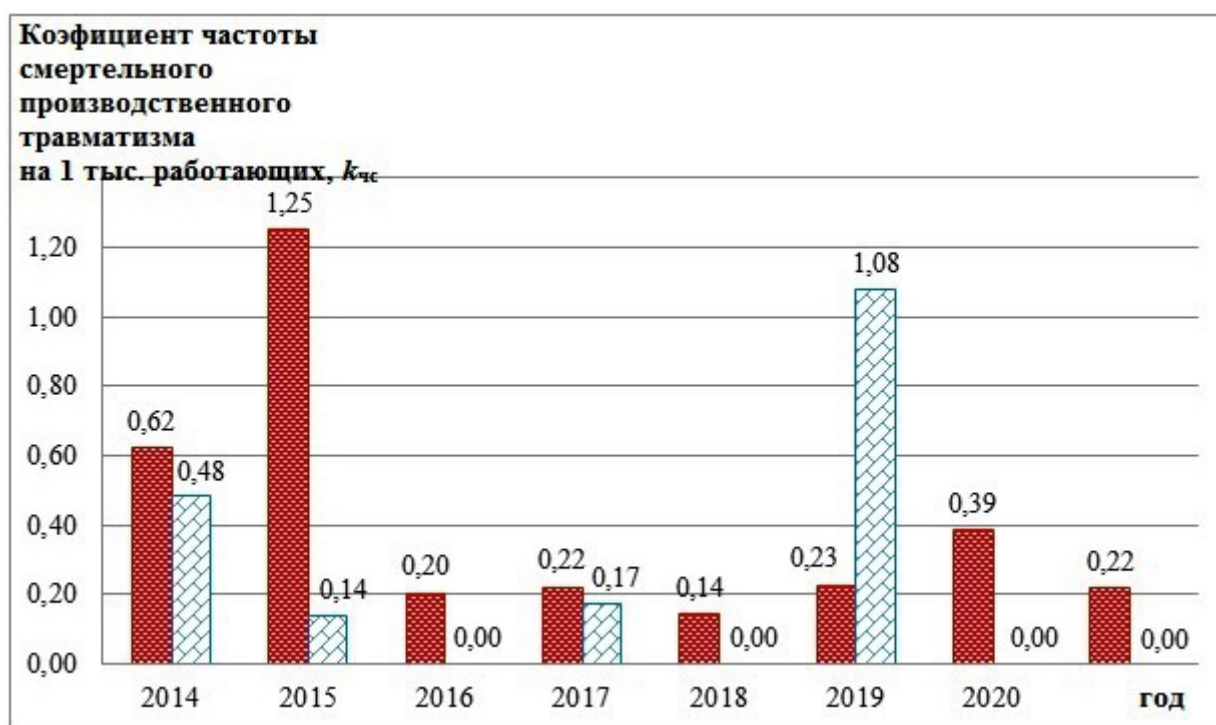


Рис. 1. Динамика изменения коэффициента частоты производственного травматизма со смертельным исходом на шахтах:
■ – действующих; ▨ – ликвидируемых

Анализ динамики изменения $k_{\text{чс}}$ свидетельствует о высокой степени неопределенности при оценке риска смертельного травматизма на ликвидируемых шахтах и неравномерности распределения события во времени. Неопределенность – следствие достаточной уникальности события, ограниченного ареалом и временным отрезком анализируемой информации. Высокие значения $k_{\text{чс}}$ для ликвидируемых шахт, иногда превышающие аналогичные показатели для действующих шахт, можно объяснить низкой численностью персонала при общей уникальности события.

Еще более показателен для оценки состояния охраны труда на предприятиях угольной отрасли коэффициент тяжести $k_{\text{т}}$, характеризующий среднее время потери трудоспособности, включая реабилитацию после производственной

травмы. Этот коэффициент практически одинаков для действующих и ликвидируемых шахт (даже с небольшим превышением по ликвидируемым шахтам) – 34,24 против 35,94 (рис. 2).

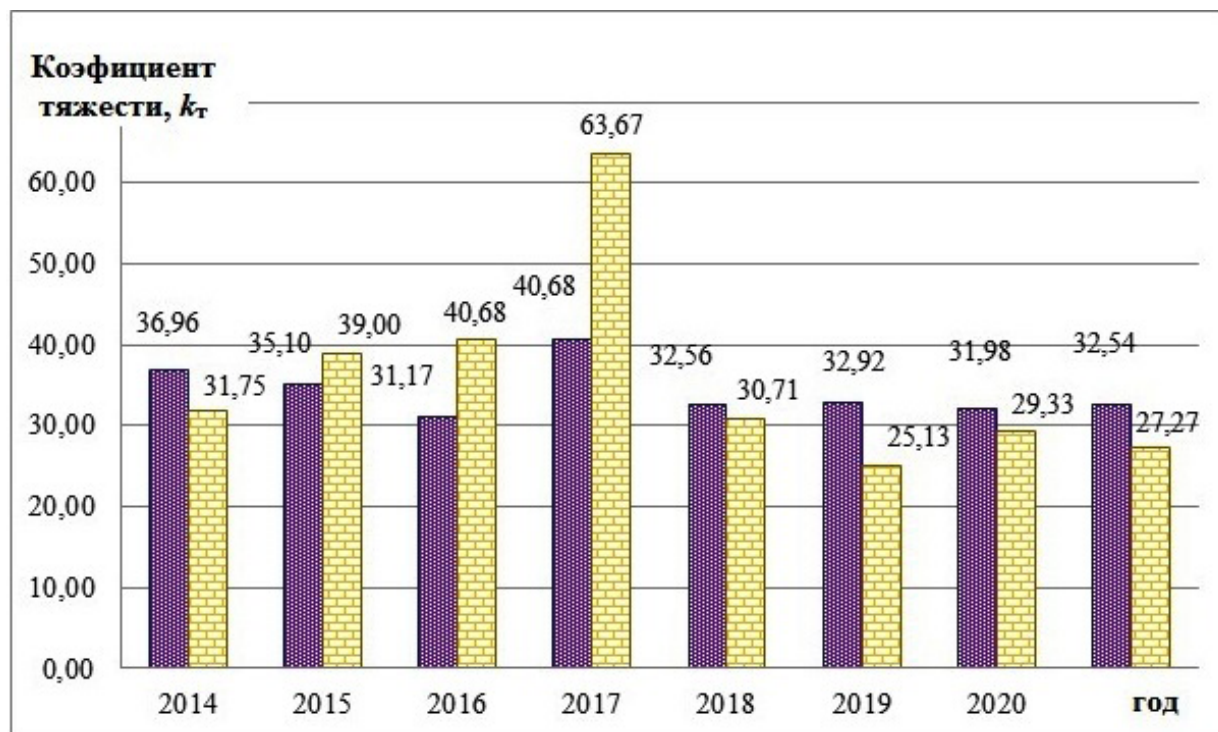


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента тяжести на шахтах:

■ – действующих; ■ – ликвидируемых

В общей оценке состояния охраны труда на предприятии коэффициент тяжести наиболее объективно характеризует степень воздействия негативных событий на трудовые ресурсы предприятия вне зависимости от вида опасности.

Равнозначные значения коэффициента тяжести свидетельствуют о том, что значительные отличия технологических процессов, а также реакция окружающей среды на эти процессы не дают оснований полагать, что прекращение технологических процессов по добыче угля автоматически снижает риски ЧС на ликвидируемых шахтах.

Поскольку опасности на действующих предприятиях по добыче угля и на шахтах, находящихся на разных стадиях ликвидации, существенно отличаются, то основная задача при оценке рисков ЧС на ликвидируемых шахтах состоит в выявлении и идентификации этих опасностей. Решение этой задачи с помощью существующих методик позволит выполнить оценку рисков ЧС на ликвидируемых шахтах, определить и применить соответствующие барьеры, препятствующие возникновению и развитию ЧС, а также разработать мероприятия по минимизации их последствий.

Наиболее эффективный инструмент решения данной задачи – системный подход, принципиальная особенность которого состоит в рассмотрении

промышленного объекта, в данном случае – ликвидируемой шахты, как сложной биосоциотехнической системы с многообразными внутрисистемными связями между ее подсистемами («Ч» – персонал, «Т» – технические устройства, «С» – рабочая среда) и их отдельными компонентами, а также возможность учета неопределенности поведения подсистем, их компонентов и системы в целом.

В процессе идентификации опасностей на ликвидируемых шахтах следует учитывать отличия в технологических процессах на шахтах, находящихся на разных стадиях ликвидации. В зависимости от решаемых задач на них используют различные схемы водоотлива.

Подземный водоотливной комплекс применяют для шахт, подлежащих «сухой» консервации (ликвидации), а поверхностный водоотливной комплекс с погружными насосами – когда уровень воды в ликвидируемой шахте необходимо поддерживать на определенной (проектной) отметке. В этом случае монтаж и оборудование погружных насосных агрегатов предусматривают непосредственно с поверхности, без доступа людей в шахту.

При идентификации потенциальных причин ЧС на шахтах с подземным водоотливным комплексом и сетью подземных горных выработок рассматривают следующие горно-геологические и горно-технические факторы:

1) в случаях взрывов, вспышек (горения) горючих газов:

- опасность проникновения горючих газов из выработанного пространства или изолированных горных выработок;

- состояние барьерных целиков у старых горных работ;
- обеспеченность шахты воздухом;
- категория устойчивости проветривания шахты;
- наличие и работоспособность аппаратуры аэрогазового контроля;
- состояние электрооборудования и кабельного хозяйства;
- несанкционированное использование открытого пламени;

2) в случаях эндогенных и экзогенных пожаров:

- наличие несписанных изолированных пожарных участков и состояние изоляционных сооружений;

- наличие вскрытых шахтопластов, склонных к самовозгоранию;
- наличие мониторинга эндогенной пожароопасности на шахте;
- состояние противопожарной защиты шахты;
- ведение огневых работ;
- наличие горных выработок с горючей крепью;
- применение в горных выработках легковоспламеняющихся веществ;
- состояние электрооборудования и кабельного хозяйства;
- достаточность технического обслуживания электрооборудования;

3) в случаях прорывов воды или пульпы в горные выработки:

- соответствие систем водоотлива проектным решениям;
- состояние мониторинга уровня затопления;
- состояние барьерных целиков у затопленных старых горных работ;

- наличие затопленных смежных шахтопластов;
- наличие гидрологических связей между горизонтами и поверхностью;
- наличие затопленных разведочных скважин и горных выработок с выходом на поверхность;

4) в случаях обвалов и обрушений горных пород:

- наличие мониторинга состояния крепления выработок;
- своевременность ремонта горных выработок;
- наличие и укомплектованность штата горнорабочих по ремонту горных выработок;

5) в случаях нарушения режимов проветривания и загазирования горных выработок:

- состояние вентиляционных сооружений;
- наличие мониторинга состояния проветривания горных выработок;
- наличие мониторинга работы вентилятора главного проветривания;

6) в случаях разрушения (повреждения) сооружений, технических объектов и устройств:

- наличие мониторинга состояния сооружений, технических объектов и устройств;

- достаточность технического обслуживания и ремонтов;

7) в случаях ошибочных действий персонала:

- уровень профессиональной подготовки;
- укомплектованность штатов;
- повышенная влажность воздуха;
- повышенный уровень шума на рабочих местах;
- повышенный уровень вибрации;
- недостаточная освещенность рабочего места;
- повышенная запыленность рабочей зоны;
- наличие и исправность средств индивидуальной защиты;
- наличие и исправность предохранительных и ограждающих устройств, защит и блокировок, предупредительной сигнализации, визуальной информации и т.п.;

- состояние путей передвижения.

Потенциальные причины ЧС на шахтах с поверхностным водоотливным комплексом следующие:

1) в случаях пожара:

- противопожарное состояние объекта;
- ведение огневых работ;
- неисправность или нарушение эксплуатационных норм устройств отопления;

2) в случаях разрушения (повреждения) строительных конструкций, технических объектов и устройств:

- наличие мониторинга состояний сооружений, технических объектов и устройств;

- достаточность технического обслуживания и ремонтов;

3) в случаях ошибочных действий персонала, причины ЧС аналогичны шахтам с подземным водоотливным комплексом.

Выводы. В результате проведенных исследований и системного анализа производственного травматизма на ликвидируемых шахтах ДНР определены потенциальные опасности и причины ЧС на этих предприятиях.

Список литературы / References

1. Билык, Е.С. О проблемах, возникающих при закрытии угольных шахт, и некоторые взгляды на пути их разрешения в современных условиях / Е.С. Билык, И.А. Дедич, А.О. Сердюков [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2007/fgtu/kozir/library/index5.htm> (дата обращения: 19.04.2022).

Bilyk E.S., Dedich I.A., Serdyukov A.O. *O problemakh, vznikayushhikh pri zakrytii ugol'nykh shakht, i nekotorye vzglyady na puti ikh razresheniya v sovremennykh usloviyakh* [On problems that arise during liquidation of coal mines and some views on ways to solve them in present-day conditions]. Available at: <http://masters.donntu.org/2007/fgtu/kozir/library/index5.htm> (accessed 19.04.2022). (In Russian).

2. Оценка воздействия процессов ликвидации угольных шахт на экологическую ситуацию в российском Донбассе / М.Д. Молев, С.А. Масленников, И.А. Занина, А.Г. Илиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 7. – С. 148 – 157.

Molev M.D., Maslennikov S.A., Zanina I.A., Iliiev A.G. *Otsenka vozdeistviya protsessov likvidatsii ugol'nykh shakht na ekologicheskuyu situatsiyu v rossiiskom Donbasse* [Assessment of effect of processes of coal mines liquidation on environmental situation in Russian Donbass]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 148-157. (In Russian).

3. Солдатов, В.И. Закрытие шахт – государственная проблема / В.И. Солдатов, В.П. Гонtarevский, Л.М. Брайнин // Уголь Украины. – 1997. – № 1. – С. 32 – 35.

Soldatov V.I., Gontarevskiy V.P., Brainin L.M. *Zakrytie shakht – gosudarstvennaya problema* [Closure of mines is a state problem]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 1997, no. 1, pp. 32-35. (In Russian).

4. Попов, В.Н. Меры по смягчению социальных последствий реструктуризации угольной промышленности в угледобывающих странах с переходной экономикой / В.Н. Попов // Уголь. – 2002. – № 1. – С. 8 – 10.

Popov V.N. *Mery po smyagcheniyu sotsial'nykh posledstviy restrukturizatsii ugol'noi promyshlennosti v ugledobyvayushhikh stranakh s perekhodnoi ekonomikoi* [Measures on mitigation of social consequences of restructuring the coal industry in coal-mining countries with transition economy]. *Ugol' – Coal*, 2002, no. 1, pp. 8-10. (In Russian).

5. Циганек, И. Проблемы ликвидации вертикальных стволов угольных шахт / И. Циганек, И.Ф. Ярембаш, В.И. Пилюгин // Уголь Украины. – 1998. – № 2. – С. 54 – 56.

Tsiganek I., Yarembash I.F., Pilyugin V.I. *Problemy likvidatsii vertikal'nykh stvolov ugol'nykh shakht* [Problems of liquidation of vertical plumb shafts of coal mines]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 1998, no. 2, pp. 54-56. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 26.04.2022

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

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

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

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

Lyudmila Mikhailovna Popova, advanced engineer; 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) 332-78-49

INVESTIGATION OF TECHNOGENIC SAFETY PROBLEMS AT THE DPR MINES UNDER LIQUIDATION

Purpose. Investigation of the technogenic safety problems at the DPR mines under liquidation on the basis of analysis of accident rate and industrial injuries for exposure and identification of hazards and causes of emergency situations with further development of correcting measures for technogenic safety improvement.

Methods. Analytical investigations of statistical data on occupational and industrial safety at the coal mines being in the stages of conservation and liquidation applying the system analysis and mathematical processing of the investigation results.

Results. The identification of hazards affecting a miner as a result of the emergency situation in the mine under liquidation has been fulfilled and the preventive measures for their reduction have been proposed.

Scientific novelty. The novel system approach to the identification of hazards and causes of emergencies at the DPR mines under liquidation has been substantiated.

Practical value. Improvement of working conditions safety at the mines under liquidation by predicting the hazards and implementing the measures for their elimination or reduction down to the acceptable level.

Keywords: *mines under liquidation; occupational safety; technogenic safety; emergency situation; occupational injuries; causes of emergency situations; identification of hazards; correcting measures; acceptable risk.*

УДК 614.842.612 "Тонкораспыленная вода"

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-41*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФЛЕГМАТИЗАЦИИ ВОДЯНЫМ ПАРОМ ОЧАГА ГОРЕНИЯ

Цель. Исследование процессов флегматизации водяным паром при тушении тонкораспыленной водой локальных очагов горения в аварийном помещении.

Методы. Используются закономерности теплообмена тонкораспыленной воды с пожарными газами.

Результаты. Установлены параметры подачи тонкораспыленной воды на основании зависимостей от времени нагрева и испарения капель воды при ликвидации локальных очагов горения.

Научная новизна. Впервые получены закономерности определения расстояния для тушения пожара с наиболее эффективным использованием воды.

Практическая значимость. Результаты могут быть использованы при проектировании первичных средств пожаротушения тонкораспыленной водой и разработке технических приемов тушения пожаров этими средствами.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода; пожаротушение; время испарения; время нагревания; размер очага; средства тушения; флегматизация; водяной пар.

Постановка проблемы. В настоящее время до 90 % всех пожаров в мире ликвидируют традиционным методом с использованием воды [1]. Водяное пожаротушение при всех своих достоинствах (сравнительно небольшая стоимость, доступность, экологическая безопасность) имеет существенные недостатки: большие удельные расходы на тушение, нанесение дополнительного и весьма ощутимого ущерба при заливке водой помещений и повреждении материальных ценностей.

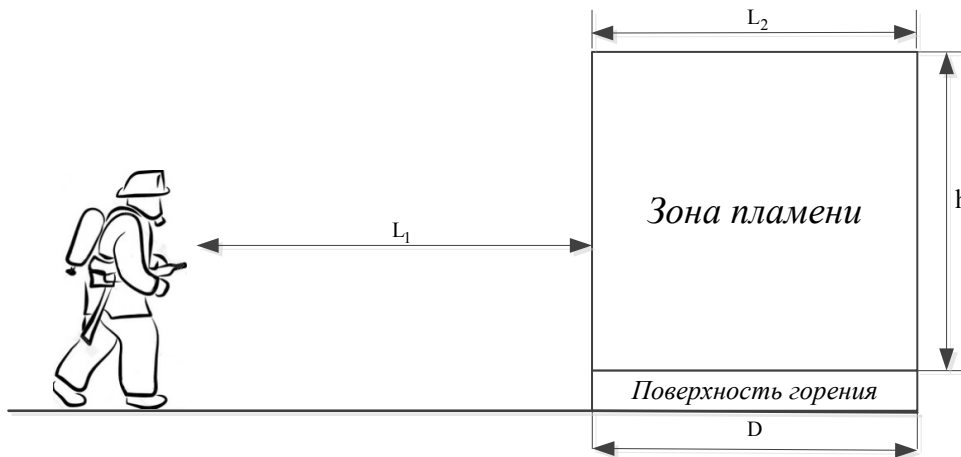
Альтернатива – использование тонкораспыленной воды. Теоретические исследования основных параметров тушения очагов горения тонкораспыленной водой, особенности ее подачи на очаг до настоящего времени недостаточно описаны, что затрудняет разработку новых первичных средств тушения.

Анализ последних публикаций. Параметры тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой рассмотрены в работах [1 – 7], однако еще не разработана методика, учитывающая условия протекания пожара в замкнутом пространстве и параметры подачи тонкораспыленной воды при тушении пожаров. В некоторых работах ставят под сомнение возможность объемного пожаротушения тонкораспыленной водой, хотя экспериментально доказано наличие такого эффекта у мелкодисперсных водных капель [8].

В работе [1] исследован механизм огнетушащего действия тонкораспыленной воды и разработана методика расчета ее подачи (интенсивность подачи воды и время тушения, средний диаметр капли), однако не все особенности тушения учтены и исследованы. Таким образом, для повышения эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой необходимо подробно исследовать все особенности ее применения при ликвидации локальных очагов горения.

Цель – исследование процессов флегматизации водяным паром при тушении тонкораспыленной водой локальных очагов горения в аварийном помещении.

Изложение основного материала. Схема подачи тонкораспыленной воды на локальный очаг пожара в аварийном помещении представлена на рисунке.



Ликвидация локального очага горения тонкораспыленной водой

Очаг пожара представим в виде газовой колонки (вертикальный цилиндр диаметром D и высотой $h = 0,8D$). Температура в очаге пожара T_{ϕ} , К. Среднеобъемная температура в аварийном помещении \bar{T} , К.

В работе [1] получена формула для расчета времени нагрева капли тонкораспыленной воды до температуры кипения, исходя из предположения, что нагрев протекает на участке от точки вылета из первичного средства тушения (огнетушителя) до очага горения,

$$\tau_{\text{н}} = \frac{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} d_{\text{к}}}{6\alpha} \ln \left(\frac{\bar{T} - T_{\text{к0}}}{\bar{T} - T_{\text{кип}}} \right),$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³;

$c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

$d_{\text{к}}$ – средний размер капель, м;

$T_{\text{к0}}$ – начальная температура капли, К;

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

α – коэффициент теплоотдачи поверхности капли, Вт/(м²·К);

τ_n – время нагревания капли до температуры кипения $T_{\text{кип}}$, с.

Принимаем текущую скорость капли V_k , м/с, равной ее средней скорости \bar{V}_k , м/с, определенной по формуле (1)

$$V_k = \bar{V}_k,$$

$$\bar{V}_k = \frac{V_{k0} + V_{\text{кн}}}{2}, \quad (1)$$

где V_{k0} – начальная скорость капли, м/с;

$V_{\text{кн}}$ – конечная скорость капли, м/с.

Для испаряющейся капли $V_{\text{кн}} = 0$.

Начальную скорость вылета капли из распылителя определяют выражением [8]

$$V_{k0} = \sqrt{120\Delta p},$$

где Δp – избыточное давление в корпусе первичного средства тушения (огнетушителя), Па;

120 – числовой коэффициент, м/кг.

Для минимизации расхода тонкораспыленной воды на тушение локального очага горения ее подачу следует организовать так, чтобы капли воды нагревались до температуры кипения при их движении от распылителя до очага пожара. Тогда

$$\bar{V}_k = \frac{V_{k0} + V_{\text{кн}}}{2} = \frac{\sqrt{120\Delta p}}{2} = \sqrt{30\Delta p}.$$

Расстояние, пройденное каплей при ее нагреве до температуры кипения,

$$L_1 = \frac{\sqrt{30\Delta p} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} d_{\text{к}}}{6\alpha} \ln \left(\frac{\bar{T} - T_{\text{к0}}}{\bar{T} - T_{\text{кип}}} \right).$$

Таким образом, подачу тонкораспыленной воды на локальный очаг пожара следует начинать с расстояния L , м/с, не менее

$$L \geq L_1.$$

При подаче тонкораспыленной воды в локальный очаг пожара необходимо учитывать ограничения по размеру капли. Исходящие из очага пожара конвективные потоки пожарных газов, движущиеся со скоростью до 7,7 м/с при развитом пожаре [3], выносят из зоны горения мелкие капли (диаметром

менее 20 мкм). Тонкораспыленной в соответствии с НПБ 88-2001 «Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования» считается распыленная вода со средним диаметром капель не более 150 мкм.

Таким образом, механизм флегматизации, то есть вытеснения из зоны горения кислорода паром, становится доминирующим для капель тонкораспыленной воды диаметром $20 < d_k < 150$ мкм.

Время полного испарения капли [1]

$$\tau_{ис} = \frac{\rho_v R_v d_k^2}{2(T_{\phi} - T_{кип})}.$$

Наиболее эффективное тушение происходит при полном испарении капли тонкораспыленной воды в локальном очаге горения. Следовательно, длина участка испарения L_2 , м, составляет

$$L_2 = \tau_{ис} \bar{V}_k.$$

Длина участка испарения не должна превосходить диаметр газовой колонки локального очага горения:

$$D \geq \frac{\rho_v R_v d_k^2 \sqrt{30\Delta p}}{2\lambda(T_{\phi} - T_{кип})}.$$

В рассматриваемой модели локального очага пожара (см. рисунок) конвективный поток пожарных газов поднимается вверх и увлекает за собой водяной пар, пронизывающий зону пламенного горения. При этом не успевшие испариться капли воды оседают на горящую поверхность и, охлаждая ее, способствуют процессу тушения.

Выводы. Подача тонкораспыленной воды с заданного расчетного расстояния обеспечивает интенсивное парообразование и флегматизацию зоны горения.

Список литературы / References

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

Kolyada A.Yu., Dikenshteyn I.F., Timoshenko D.A. *Parametry tusheniya pozharov tonkoraspylyonnoi vodoi* [Parameters of extinguishing the fires with atomized water]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2022, no. 1(59), pp. 34-43. (In Russian).

2. Чагина, Л.В. Система пожаротушения тонкораспыленной водой как перспектива водного пожаротушения / Л.В. Чагина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – № 1. – С. 105 – 108.

Chagina L.V. *Sistema pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody kak perspektiva vodnogo pozharotusheniya* [System of atomized water fire suppression as a prospect of water fire-extinguishment]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* – Contemporary technologies in construction industry. Theory and practice, 2022, no. 1, pp. 105-108. (In Russian).

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

Tsarichenko S.G. *Nekotorye voprosy pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Some issues of atomized water fire-extinguishment]. *Sredstva spaseniya. Protivopozharnaya zashhita* – Means of rescue. Fire protection, 2004, no. 10, pp. 203-205. (In Russian).

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

Dushkin A.L., Lovchinskii S.E. *Vzaimodeistvie plameni goryuchej zhidkosti s tonkoraspylyonnoi vody* [Interaction of flammable liquid flame with atomized water]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2011, vol. 20, no. 11, pp. 53-55. (In Russian).

5. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин, С.Е. Ловчинский, Н.Н. Рязанцев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 3. – С. 60 – 69.

Dushkin A.L., Lovchinskii S.E., Ryazantsev N.N. [et al.]. *Osobennosti pozharotusheniya v zamknutom ob'yome tonkoraspylyonnoi vody* [Specifics of atomized water fire suppression in confined volume]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 60-69. (In Russian).

6. Думилин, А.И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой / А.И. Думилин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 4. – С. 85 – 90.

Dumilin A.I. *Parametry tusheniya plameni goryuchikh zhidkostej raspylyonnoi vody* [Parameters of extinguishing the flame of flammable liquids with atomized water]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 85-90. (In Russian).

7. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 5. – С. 74 – 78.

Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Chislennaya otsenka optimal'nykh razmerov kapel' vody v usloviyakh eyo raspyleniya sredstvami pozharotusheniya*

v pomeshheniyakh [Numerical evaluation of optimum dimensions of drops of water in conditions of atomizing it by fire extinguishing means in premises]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74-78. (In Russian).

8. Коляда, А.Ю. Методика расчета параметров локализации пожаров в горных выработках / А.Ю. Коляда, Ю.Н. Ющенко, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2015. – № 52. – С. 99 – 111.

Kolyada A.Yu., Yushchenko Yu.N., Dikenshteyn I.F. *Metodika raschyota parametrov lokalizatsii pozharov v gornykh vyrabotkakh* [Methodology for calculating parameters of fire containment in mine workings]. *Nauchnyi vestnik NIIGD “Respirator”*: sb. nauch. tr. [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: collection of scientific papers]. Donetsk, 2015, no. 52, pp. 99-111. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 16.05.2022

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

Dmitry Sergeevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.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) 332-78-41

INVESTIGATION OF PROCESSES OF PHLEGMATIZING A SEAT OF FIRE BY WATER VAPOR

Purpose. Investigation of processes of phlegmatization by water vapor during suppressing the local seats of fire with atomized water in emergency premises.

Methods. The regularities of heat and mass transfer of the atomized water with fire gases have been applied.

Results. The parameters of the atomized water delivery have been derived on the basis of dependences on heating period and evaporation of water drops during liquidation of local seats of combustion.

Scientific novelty. The novel regularities for determining the distance for suppressing a fire with the most effective utilization of water have been obtained.

Practical value. The results may be applied in designing the primary means of fire extinguishment with atomized water and in developing the techniques of extinguishing the fires by these means.

Keywords: atomized water; fire extinguishment; evaporation time; heating period; seat of fire size; firefighting means; phlegmatization; water vapor.

УДК 614.841.245

Владелен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Александр Андреевич Березин, инж.; e-mail: fire408@mail.ru;

Дмитрий Алексеевич Политучий, нач. испытательной пожарной лаборатории; e-mail: ipldnr@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,

пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-80; 332-78-79

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ И ИЗЪЯТИЮ ФРАГМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С МЕСТА ПОЖАРА

Цель. Обоснование практической значимости систематизации сведений о порядке осмотра и изъятия фрагментов электроустановок с места пожара.

Методы. Анализ научно-технической литературы, обобщение опыта инструментальных исследований фрагментов электроустановок, изъятых с места пожара.

Результаты. Обоснована разработка алгоритма, который дополнит действующие положения об организации работы органов дознания и повысит эффективность исследований по установлению причин пожаров.

Научная новизна. Впервые разработан алгоритм осмотра и изъятия фрагментов электроустановок с места пожара.

Практическая значимость. В служебной деятельности органов дознания применение Методических рекомендаций по выявлению и изъятию фрагментов электроустановок с места пожара обеспечивает достоверность выявления имеющих доказательное значение для установления причины пожара фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы.

Ключевые слова: *Методические рекомендации; аварийные режимы работы; осмотр места пожара; электроустановка; пожарно-техническая экспертиза.*

Постановка задачи. При проверке заявления, сообщения о пожаре специалисты должны осмотреть, выявить и зафиксировать следы и обстоятельства, которые связаны с пожаром и имеют доказательное значение для установления объективной причины его возникновения [1].

В ходе осмотра места происшествия (см. рисунок) дознаватели изымают предметы, вещества и материалы, которые могут содержать следы и признаки преступления, быть признаны вещественными доказательствами в уголовном деле и иметь значение для всестороннего, полного и объективного исследования обстоятельств дела, выявления виновных лиц и установления причины пожара.

Инструментальные исследования изменения свойств материалов вследствие внутреннего или внешнего теплового воздействия на поверхности фрагментов электроустановок, изъятых с места пожара для выявления признаков, характерных для аварийных режимов их работы (короткое замыкание, перегрузка по току, большое переходное сопротивление и их совокупность), – один из основных методов определения причинно-следственной связи между аварийными режимами работы и возникновением пожара.



Блок-схема алгоритма осмотра и изъятия фрагментов электроустановок с места пожара

При ознакомлении с протоколами и схемами осмотра места происшествия, заключениями о причинах пожаров специалистами НИИГД «Респиратор» установлено отсутствие единообразия описания фрагментов электроустановок. В протоколах осмотра места происшествия и направлениях на проведение пожарно-технического исследования часто использованы термины, которые могут быть истолкованы неоднозначно.

Кроме того, при составлении заключений о технической причине пожара и проведении инструментальных исследований специалисты сталкиваются с ситуациями, когда в качестве вещественных доказательств с места пожара изымают пожарный мусор с фрагментами электроустановок, на поверхности которых отсутствуют визуальные признаки аварийных режимов работы.

При проведении следственных действий по обнаружению, изъятию, фиксации и осмотру вещественных доказательств большое значение имеет их единообразное описание с применением терминов, понятий, наименований, используемых в соответствующей области, так как только при соблюдении определенного алгоритма можно обеспечить правильное и однозначное понимание зафиксированных сведений об объектах, представить изменения, выявленные при обследовании места пожара.

Поскольку знать, понимать и безошибочно применять соответствующую терминологию невозможно, необходимо использовать специальные справочные пособия, содержащие сведения о конструктивных особенностях фрагментов электроустановок.

В результате проведения информационно-аналитических исследований литературных источников [2 – 8] специалистами установлено, что сведения о порядке выявления и изъятия фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы с места происшествия недостаточно информативны, поэтому они требуют систематизации и дополнений при описании конструктивных особенностей электроустановок.

В связи с этим разработаны Методические рекомендации по выявлению и изъятию фрагментов электроустановок с места пожара (далее – Методические рекомендации), в которых подробно изложен порядок выявления фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы и изъятия их с места пожара.

Цель работы – обоснование практической значимости систематизации сведений о порядке осмотра и изъятия фрагментов электроустановок с места пожара.

Изложение основного материала. Осмотр места пожара – основное следственное действие при расследовании пожара, которое осуществляют на основании и в порядке, предусмотренных ст. 206, 207 Уголовно-процессуального кодекса Донецкой Народной Республики [9], в которых обязанности по производству следственных действий, в том числе и осмотра, возлагаются на следователей, дознавателей и иных должностных лиц, которым орган дознания делегирует соответствующие полномочия.

Общая задача осмотра места происшествия – установление фактических данных о произошедших событиях.

Частные задачи осмотра места происшествия [10]:

- изучение и фиксация обстановки места происшествия, установление характера воздействия на окружающую среду;
- обнаружение, фиксация и изъятие вещественных доказательств.

Осмотр места происшествия включает не только наблюдение, но и выполнение различных измерений и вычислений, сравнение осматриваемых объектов между собой, описание и фиксацию следов преступления и иных вещественных доказательств, которые обнаружили дознаватель и другие участники осмотра.

Результаты осмотра места происшествия позволяют правильно определить направления расследования, составить представление о механизме расследуемого события.

Непрофессионально проведенный осмотр места происшествия снижает достоверность расследования причин возникновения пожара.

При проведении осмотра устанавливаются и заносятся в протокол осмотра места происшествия следующие сведения о состоянии электроустановок [2]:

- внешние визуальные признаки, характерные для аварийных режимов работы;
- особенности прокладки кабельных изделий относительно строительных конструкций;
- типы и технические характеристики;
- технические характеристики коммутационных электрических аппаратов, положение их рукояток («Вкл.», «Откл.»);
- расположение электроустановок с признаками аварийных режимов работы относительно очага пожара;
- другие сведения, учитывающие технические особенности электроустановок.

Изъятию подлежат все выявленные в ходе осмотра в очаге пожара фрагменты электроустановок с признаками аварийных режимов работы [2].

На основании опыта установления причинно-следственной связи между аварийными режимами работы и возникновением пожаров систематизированы основные положения по выявлению и изъятию фрагментов электроустановок:

- изъятие и упаковку осуществляют, исходя из принципа необходимой достаточности, обеспечивая сохранность изымаемых вещественных доказательств как объектов исследования;
- при наличии локальных оплавлений на концах токопроводящих жил кабельных изделий длина изымаемых фрагментов должна составлять не менее 50 мм;
- при протяженных оплавлениях на поверхности токопроводящих жил кабельных изделий участок оплавлений должен изыматься, обеспечивая сохранность всего участка;
- токопроводящие жилы кабельных изделий, подсоединенные к контактными соединениям фрагментов электроустановок, должны изыматься по длине не менее 50 мм от мест контактных соединений, не допуская перегиба токопроводящих жил кабельных изделий вблизи мест оплавлений и мест подсоединения к контактными соединениям;
- о воздействии высокой температуры пожара на поверхности токопроводящих жил кабельных изделий свидетельствуют спекание проволок, повышенная хрупкость при изгибе, изменение поперечного сечения токопроводящих жил кабельных изделий по длине;
- при оценке состояния поверхности изоляции токопроводящих жил кабельных изделий учитывается, что при высоком термическом воздействии поверхность изоляции высыхает, трескается и приобретает значительную хрупкость (осыпается при небольшом нажатии);
- при аварийных режимах работы оплавления на поверхности фрагментов электроустановок являются локальными или протяженными;
- осмотр поверхности фрагментов электроустановок позволяет оценить условия, при которых происходили аварийные режимы, а также условия термического воздействия на поверхности фрагментов электроустановок;
- возникающие на поверхности электроустановок признаки аварийных режимов работы зависят от интенсивности, стабильности, длительности и

направленности термического воздействия, условий теплоотвода из зоны нагрева.

На основании опыта проведения пожарно-технических исследований и составления технических заключений, анализа литературных источников [2 – 8], конструктивных особенностей электроустановок определены основные визуальные признаки, характерные для аварийных режимов работы электроустановок (короткое замыкание, большое переходное сопротивление, перегрузка по току), которые структурированы и классифицированы в соответствующих разделах Методических рекомендаций по типу электрооборудования (коммутационная аппаратура, электронагревательные приборы, электробытовая техника и т.д.).

Разработанные и утвержденные в установленном порядке Методические рекомендации содержат:

- термины и определения;
- общие положения об осмотре места происшествия;
- сведения о порядке сбора информации об электроустановках на этапе подготовки к осмотру, а также о действиях, выполняемых на стадии осмотра места происшествия;
- сведения о порядке выявления и изъятия фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы.

Выводы. Методические рекомендации дополняют действующие положения об организации работы органов дознания по проверке заявлений, сообщений о пожарах и проведению дознания по делам о пожарах и нарушениях требований пожарной безопасности, что позволяет повысить уровень знаний специалистов органов дознания.

Применение органами дознания МЧС ДНР Методических рекомендаций при проведении осмотра места происшествия обеспечивает:

- достоверное выявление фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы, имеющих значимость для установления причины пожара;
- изъятие фрагментов электроустановок в объеме, необходимом и достаточном для установления причинно-следственной связи между возникновением аварийных режимов работы в электроустановках и пожаром.

Список литературы / References

1. Порядок организации органов государственного пожарного надзора: Приказ МЧС ДНР от 27.02.2020 № 55. – Донецк, 2020. – 77 с.

Poryadok organizatsii organov gosudarstvennogo pozharnogo nadzora: Prikaz MChS DNR ot 27.02.2020 № 55 [Procedure of organization of the state fire supervision agencies: Decree of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of February 27, 2020 № 55]. Donetsk, 2020, 77 p. (In Russian).

2. Чешко, И.Д. Осмотр места пожара / И.Д. Чешко, Н.В. Юн, В.Г. Плотников. – М.: ФГУ ВНИИПО, 2004. – 503 с.

Cheshko I.D., Yun N.V., Plotnikov V.G. *Osmotr mesta pozhara* [Inspection of a place of fire]. Moscow, FGU VNIPO Publ., 2004, 503 p. (In Russian).

3. Методические рекомендации по определению вида короткого замыкания: утв. МЧС ДНР 05.11.2015. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 29 с.

Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu vida korotkogo замыканиya: utv. MChS DNR 05.11.2015 [The Methodological recommendations on determination of short-circuit failure type: as amended by the MChS of the DPR on November 5, 2015]. Donetsk, NIIGD “Respirator” Publ., 2016, 29 p. (In Russian).

4. Методические рекомендации по определению признаков большого переходного сопротивления и температуры нагревания электроустановок: утв. МЧС ДНР 14.03.2016. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 32 с.

Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu priznakov bol'shogo perekhodnogo soprotivleniya i temperatury nagrevaniya elektroustanovok: utv. MChS DNR 14.03.2016 [The Methodological recommendations on determination of high transition resistance and temperature of heating of electrical installations: as amended by the MChS of the DPR on March 14, 2016]. Donetsk, NIIGD “Respirator” Publ., 2016, 32 p. (In Russian).

5. Атлас по определению признаков аварийных режимов работы электрооборудования: утв. МЧС ДНР 18.10.2018. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2018. – 154 с.

Atlas po opredeleniyu priznakov avariinykh rezhimov raboty elektrooborudovaniya: utv. MChS DNR 18.10.2018 [The Atlas for determination of marks of emergency operation modes of the electric equipment: as amended by the MChS of the DPR on October 18, 2018]. Donetsk, NIIGD “Respirator” Publ., 2018, 154 p. (In Russian).

6. Мельник, А.А. Справочник дознавателя ФПС МЧС России / А.А. Мельник, Р.Ф. Ворошилов, Ж.С. Калюжина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – 162 с.

Mel'nik A.A., Voroshilov R.F., Kalyuzhina Zh.S. *Spravochnik doznatelya FPS MChS Rossii. 2-e izd. pererab. i dop.* [Inquiry officer's reference book of the Federal Fire Safety Service of EMERCOM of Russia. The 2nd revised and supplemented edition]. Krasnoyarsk, FGBOU VO Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii Press, 2019, 162 p. (In Russian).

7. Маковкин, А.В. Изучение состояния электрооборудования при осмотре места пожара / А.В. Маковкин, С.И. Зернов, В.Н. Кабанов. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1988. – 48 с.

Маковкин А.В., Зернов С.И., Кабанов В.Н. *Izuchenie sostoyaniya elektrooborudovaniya pri osmotre mesta pozhara* [Survey of condition of electrical equipment during examination of a place of fire]. Moscow, VNIИ MVD SSSR Publ., 1988, 48 p. (In Russian).

8. Маковкин, А.В. Проведение экспертных исследований по установлению причинно-следственных связей аварийных процессов в электросети с возникновением пожара / А.В. Маковкин, В.М. Струков, В.Н. Кабанов. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1988. – 98 с.

Makovkin A.V., Strukov V.M., Kabanov V.N. *Provedenie ekspertnykh issledovaniy po ustanovleniyu prichinno-sledstvennykh svyazei avariinykh protsessov v elektroseti s vozniknoveniem pozhara* [Conduction of expert investigations for ascertainment of cause-and-effect relationships of emergency processes in an electrical grid in occurrence of fire]. Moscow, VNII MVD SSSR, 1988, 98 p. (In Russian).

9. Уголовно-процессуальный кодекс Донецкой Народной Республики: принят Постановлением Народного Совета от 24.08.2018. – Донецк, 2018. – 283 с.

Ugolovno-protsessual'nyi kodeks Donetskoj Narodnoi Respubliki: prinyat Postanovleniem Narodnogo Soveta ot 24.08.2018 [Code of Criminal Procedure of the Donetsk People's Republic: as amended by the Decree of People's Council of August 24, 2018]. Donetsk, 2018, 283 p. (In Russian).

10. Криминалистическая тактика / А.Г. Филиппов [и др.]; под общ. ред. А.Г. Филиппова. – М.: Издательство Юрайт, 2021. – 207 с.

Filippov A.G. (general ed.) [et al.]. *Kriminalisticheskaya taktika* [Forensic tactics]. Moscow, Urait Publ., 2021, 207 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грекова
Дата поступления рукописи 24.04.2022

Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Aleksandr Andreyevich Berezin, engineer; e-mail: fire408@mail.ru;

Dmitry Alekseyevich Polituchiy, head of fire testing laboratory; e-mail: ipldnr@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) 332-78-80

PRACTICAL VALUE OF METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS ON DETECTION AND COLLECTION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS FRAGMENTS AT A PLACE OF FIRE

Purpose. Substantiation of the practical value of systematization of data on procedure of inspection and collection of the electrical installations fragments at the place of fire.

Methods. Analysis of scientific and technical literature, generalization of experience on the instrumental investigations of the electrical installations fragments collected at the place of fire.

Results. The development of the algorithm has been substantiated which will supplement the existing regulations on organization of inquiry bodies work and increase the efficiency of investigations for ascertainment of causes of fires.

Scientific novelty. The novel algorithm of inspection and collection of the electrical installations fragments at the place of fire has been developed.

Practical value. The application of the Methodological recommendations on detection and collection of electrical installations fragments at the place of fire in the official activities by the bodies of inquiry provides the accuracy of detecting the testimonial electrical installations fragments with visual marks of emergency operation modes for ascertainment of the cause of fire.

Keywords: *methodological guidelines; emergency operation modes; inspection of a place of fire; electrical installation; fire and technical examination.*

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 адрес электронной почты;
- 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
2022, № 2(59)

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 07.06.2022.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-60

Объем 11,11 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 15 июня 2022 г.