



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

№ 3(58)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 3(58). – 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 | Ю.Ф. Булгаков                                |
| д-р техн. наук | С.П. Греков                                  |
| д-р техн. наук | С.Е. Гулько                                  |
| д-р техн. наук | А.Ф. Долженков                               |
| д-р техн. наук | С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)        |
| д-р техн. наук | В.Г. Игишев (Российская Федерация)           |
| д-р техн. наук | В.А. Канин                                   |
| д-р техн. наук | А.П. Ковалев                                 |
| д-р техн. наук | В.П. Коптиков (Российская Федерация)         |
| д-р техн. наук | К.Н. Лабинский                               |
| д-р техн. наук | Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)           |
| д-р техн. наук | Г.П. Стариков                                |
| д-р мед. наук  | В.В. Черкесов                                |
| д-р хим. наук  | В.В. Шаповалов                               |

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 4 от 29.07.2021).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

# **SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”**

Scientific-technical journal

No. 3(58)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2021. – No. 3(58). – 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.) | Yu.F. Bulgakov                          |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.P. Grekov                             |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.Ye. Gul'ko                            |
| Dr. Sci. (Tech.) | A.F. Dolzhenkov                         |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus) |
| Dr. Sci. (Tech.) | V.G. Igishev (Russian Federation)       |
| Dr. Sci. (Tech.) | V.A. Kanin                              |
| Dr. Sci. (Tech.) | A.P. Kovalyov                           |
| Dr. Sci. (Tech.) | V.P. Koptikov (Russian Federation)      |
| Dr. Sci. (Tech.) | K.N. Labinskiy                          |
| Dr. Sci. (Tech.) | D.Yu. Paleyev (Russian Federation)      |
| Dr. Sci. (Tech.) | G.P. Starikov                           |
| Dr. Sci. (Med.)  | V.V. Cherkesov                          |
| Dr. Sci. (Chem.) | V.V. Shapovalov                         |

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 4 from 29.07.2021).

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

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

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

**СОДЕРЖАНИЕ*****I. Пожарная и промышленная  
безопасность*****Агеев В.Г., Пефтибай Г.И.,  
Галухин Н.А.**Генератор ультразвуковых колебаний  
для распыления пожаротушащей  
жидкости

7

**Греков С.П., Орликова В.П.**Определение коэффициентов диффузии  
кислорода в поры угля на основе  
изотерм адсорбции

17

**Лебедева В.В.**Полимерная композиция для получения  
огнезащитного материала

24

**Коврижкин О.И.**Методика расчета подачи  
газообразного азота в изолированную  
тупиковую горную выработку

32

***II. Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях*****Гулько С.Е., Мавроди А.В.**Влияние дегазации на  
метановыделение из сближенных  
пластов

42

**Агеев В.Г., Коляда А.Ю.**Параметры локализации подземных  
пожаров распыленной водой

50

**Иваненко А.Ф., Мухин П.Е.,  
Попова Л.М., Омелаева А.А.**Анализ нормативно-методической  
базы оценки рисков возникновения  
чрезвычайных ситуаций на  
предприятиях угольной отрасли

60

**TABLE OF CONTENTS*****I. Fire and industrial safety*****Ageyev V.G., Peftibay G.I.,  
Galukhin N.A.**Ultrasonic vibration generator  
for spraying a fire-extinguishing liquid

7

**Grekov S.P., Orlikova V.P.**Determination of coefficients of oxygen  
diffusion into coal pores on the basis of  
adsorption isotherms

17

**Lebedeva V.V.**Polymeric composition for production  
of a fire-retardant material

24

**Kovrizhkin O.I.**Methodology of calculation of feeding  
the gaseous nitrogen into an isolated blind  
mine working

32

***II. Safety in emergencies*****Gulko S.Ye., Mavrodi A.V.**Degassing effect on methane release  
out of contiguous coal seams

42

**Ageyev V.G., Kolyada A.Yu.**Parameters of fine-sprayed water  
containment of underground fires

50

**Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye.,  
Popova L.M., Omelaeva A.A.**Analysis of regulatory and procedural  
basis of risk assessment of emergencies  
occurrence at coal industry enterprises

60

**Симонов А.М., Карнаух Н.В.,  
Агарков Ал.В.**

Проветривание аварийных участков  
шахт после внезапных выбросов угля,  
породы и газа

68

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

**Долженков А.Ф., Князева Т.В.,  
Мороз Т.О.**

Обоснование подходов к оценке  
эффективности средств  
индивидуальной защиты спасателей

80

**Лебедева В.В., Щербакова О.Н.**

Влияние состава многокомпонентных  
сорбентов на их сорбционную емкость

88

**Шаповалов В.В., Ганнова Ю.Н.,  
Шаповалова Т.В., Берестовая А.А.**

Адсорбенты диоксида серы на основе  
СаО и СаСО<sub>3</sub>, активированные  
нитратом лития

96

**Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А.**

Разработка объемного метода анализа  
поглотителей диоксида углерода

107

**Simonov A.M., Karnaukh N.V.,  
Agarkov Al.V.**

Ventilation of accident areas of mines  
after sudden coal, rock and gas outbursts

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

**Dolzhenkov A.F., Knyazeva T.V.,  
Moroz T.O.**

Substantiation of approaches to evaluation  
of rescuers' personal protective equipment  
effectiveness

**Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N.**

Influence of multicomponent sorbents  
composition on their sorption capacity

**Shapovalov V.V., Gannova Yu.N.,  
Shapovalova T.V., Berestovaya A.A.**

Sorbents of sulphur dioxide based on CaO  
and CaCO<sub>3</sub> activated by lithium nitrate

**Pletenetskiy R.S., Zborshchik L.A.**

Development of volumetric method  
of analysis of carbon dioxide sorbents

## І. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [614.844.2:62-182.3/.4]:532.525.3

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

*Георгий Иванович Пефтибай, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;*

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36*

### ГЕНЕРАТОР УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ПОЖАРОТУШАЩЕЙ ЖИДКОСТИ

**Цель.** Обоснование параметров газоструйного генератора ультразвуковых колебаний для построения его конструктивной схемы.

**Методы.** Аналитические расчеты конструктивных параметров резонатора Гартмана, термодинамических и конструктивных параметров газодинамического сопла.

**Результаты.** Определены термодинамические параметры газодинамического сопла: температура, давление, скорость, плотность, местная скорость звука. Показано, что на срезе сопла скорость газа достигает скорости звука и возбуждает резонатор Гартмана. По расчетным данным построены конструктивные схемы газодинамического сопла и резонатора Гартмана.

**Научная новизна.** Обоснованы параметры газоструйного генератора ультразвуковых колебаний, в котором отсутствует подвижный клапан, а резонатор Гартмана снабжен острыми кромками.

**Практическая значимость.** Разработаны схемы сопла и резонатора Гартмана, полученные размеры позволяют выполнить чертежи макетного образца пожаротушащей установки.

**Ключевые слова:** генератор; термодинамические параметры; конструктивные параметры; сопло; резонатор.

**Постановка проблемы.** Ранцевые (переносные) и мобильные (передвижные) пожаротушащие установки предназначены для тушения локальных очагов пожара в начальной стадии возгорания. В связи с ограниченными запасами пожаротушащей жидкости (воды) и энергоносителя (сжатого газа) к вышеупомянутым пожаротушащим установкам предъявляют повышенные требования в отношении эффективности использования воды по сравнению с традиционными. Анализ современных тенденций позволяет выделить два основных направления улучшения использования воды [1]:

- совершенствование способов распыления воды и доставки её в очаг пожара;
- улучшение смачиваемости воды.

Оба направления совершенствования использования воды для пожаротушения дополняют друг друга и позволяют получить при совместном применении аддитивный эффект.

Реализация преимуществ «улучшенной» воды напрямую зависит от конструкции ствола по двум причинам. Во-первых, в стволе происходит

дробление воды на отдельные капли, что увеличивает площадь поверхности испарения воды и, как следствие, интенсифицирует охлаждение пламенной зоны и горящей поверхности. Во-вторых, каплям сообщается импульс, необходимый для обеспечения высокой проникающей способности через конвективный барьер пожара, что приводит к реализации основного механизма тушения – поверхностного охлаждения горящего материала.

Обоснованные конструктивные параметры генератора ультразвуковых колебаний для распыления воды позволят сократить время тушения пожара и расход воды, уменьшить экономический ущерб от пожара.

**Анализ последних исследований.** Вопросы улучшения эффективности использования пожаротушащей жидкости путем ее температурной активации рассмотрены в работах [1, 2]. Температурная активация воды осуществляется за счет нагрева пресной воды до температуры выше 100 °С под давлением выше атмосферного. При истечении из ствола резко уменьшается статическое давление, и часть воды за счет вскипания диспергируется на капли размером 10...50 мкм, что позволяет осуществить объемное пожаротушение в замкнутых помещениях. Недостаток заключается в сложности получения термоактивированной воды.

Сверхзвуковое газовое распыление жидкости для получения тонкораспыленной воды предложено получать за счет подачи ее в сверхзвуковую часть газодинамического сопла [3]. Струйки воды через жиклеры подаются перпендикулярно вектору скорости газового потока. При взаимодействии газового потока со струйками воды происходят каплеобразование и разгон капель за счет передачи им кинетической энергии газового потока. Предложенный способ расчета сверхзвукового распылителя не учитывает влияния капельной жидкости на параметры двухфазного потока.

В работе [4] предложен принцип распыления воды за счет соударения двух потоков: жидкого диска, сформированного при соударении потока воды с поперечной преградой, и капельным потоком, образующимся за счет неустойчивости Рэлея – Плато в цилиндрическом отрезке струи. Недостаток состоит в том, что оросители, реализующие рассмотренный принцип, эффективно работают только в вертикальном положении, что ограничивает область применения.

В статье [5] рассмотрены механизмы тушения пожара тонкораспыленной водой, дано сравнение эффективности работы устройств с различными способами пожаротушения тонкораспыленной водой.

В работе [6] предложено пожаротушащее устройство, генерирующее газокapельный поток за счет ультразвукового распыления жидкости, однако отсутствует расчет основных конструктивных узлов ствола.

**Цель работы** – определение конструктивных и термодинамических параметров газоструйного генератора ультразвуковых колебаний.

**Результаты исследования.** Предложенная в работе [6] конструктивная схема ствола пожаротушащей установки содержит специфический узел, определяющий качество распыляемой жидкости: однородность и дисперсность

капельного потока. Распыление жидкости осуществляется за счет воздействия ультразвуковых колебаний на струйки воды с последующим распадом последних на капли. Источник ультразвуковых колебаний – газоструйный генератор Гартмана (рис. 1), включающий газодинамическое сопло и резонатор Гартмана.

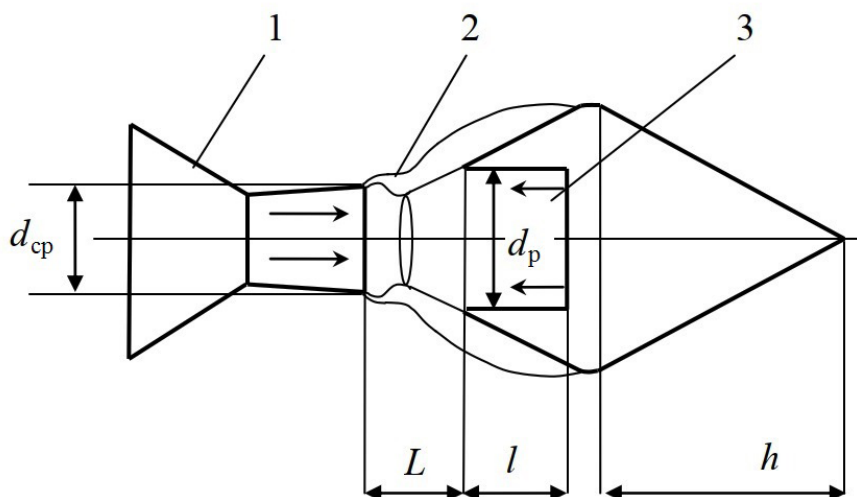


Рис. 1. Конструктивная схема генератора Гартмана:

1 – газодинамическое сопло; 2 – ударные волны; 3 – резонатор Гартмана;

$d_{cp}$  – диаметр среза сопла;  $d_p$  – диаметр резонатора Гартмана;

$L$  – расстояние между срезом сопла и кромкой резонатора Гартмана;

$l$  – глубина резонатора;  $h$  – высота конуса центрального тела

Расчет параметров генератора Гартмана состоит в определении термодинамических и конструктивных характеристик газодинамического сопла и резонатора Гартмана.

Основное назначение газодинамического сопла – создание сверхзвукового газового потока для возбуждения резонатора Гартмана.

Из газовой динамики известно, что единственный тип сопла, способного создавать сверхзвуковой газовый поток, – комбинированное сопло Лавалья, состоящее из сужающейся и расширяющейся частей. Простейшее комбинированное (коническое) сопло представляет собой два конуса, соединенные узкой частью. Диаметр наиболее узкой части газодинамического сопла называется критическим, соответственно, сечение – критическое. В критическом сечении газодинамического сопла достигается звуковая скорость газа, а в расширяющейся части – сверхзвуковая.

Режим течения газа определим путем сравнения отношения

$$B_i = P_i / P_o$$

с критическим отношением

$$B_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_o} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где  $B_i$  – перепад давления в  $i$ -м сечении газодинамического сопла;  
 $B_{кр}$  – критическое отношение (критический перепад давления)  
 в критическом сечении газодинамического сопла;  
 $P_i$  – давление в  $i$ -м сечении газодинамического сопла, Па;  
 $P_o$  – давление в начале газодинамического сопла, Па;  
 $P_{кр}$  – давление в критическом сечении газодинамического сопла, Па;  
 $k$  – показатель адиабаты, для воздуха равный 1,4.

Если подставить  $k = 1,4$  в выражение для  $B_{кр}$ , то получим, что  $B_{кр} = 0,528$ . Таким образом, критический перепад давления в газодинамическом сопле не зависит от его конструкции, а определяется свойствами газа.

Расчет диаметра критического сечения газодинамического сопла выполним следующим образом:

- находим перепад давления  $B_{вых}$  у газодинамического сопла

$$B_{вых} = \frac{P_{вых}}{P_o} = 0,528,$$

где  $P_{вых}$  – давление на выходе газодинамического сопла, Па;

- находим критическое давление  $P_{кр}$ , Па,

$$P_{кр} = B_{кр} P_o = 0,528 \cdot 10^6; \quad (1)$$

- критическую температуру  $T_{кр}$ , К, определяем по формуле

$$T_{кр} = T_o B_{кр}^{\frac{k}{k-1}} = 293 \cdot 0,528^{0,2857} = 244, \quad (2)$$

где  $T_o$  – температура на входе в газодинамическое сопло, К;

- удельный объем газа  $V_{кр}$ , м<sup>3</sup>/кг, в критическом сечении вычисляем по формуле

$$V_{кр} = \frac{RT_{кр}}{P_{кр}} = \frac{287 \cdot 244}{0,528 \cdot 10^6} = 0,1326, \quad (3)$$

где  $R = 287$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

- плотность газа  $\rho_{кр}$ , кг/м<sup>3</sup>, в критическом сечении находим по формуле

$$\rho_{кр} = \frac{1}{V_{кр}} = 7,54; \quad (4)$$

- критическую скорость газа  $v_{кр}$ , м/с, находим по преобразованной формуле [3]

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R (T_o - T_{кр})} = 313,75; \quad (5)$$

- площадь критического сечения  $f_{кр}$ , м<sup>2</sup>, определяем из уравнения

массового расхода газа

$$f_{кр} = \frac{G_{\Gamma}}{\rho_{кр} v_{кр}} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{7,54 \cdot 313,75} = 5,07 \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где  $G_{\Gamma} = 12 \cdot 10^{-3}$  – массовый расход газа, кг/с.

Зная площадь критического сечения, находим соответствующий критический диаметр  $d_{кр}$ , м,

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4}{\pi} f_{кр}} = 2,54 \approx 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2,6 \text{ мм}. \quad (7)$$

Так как на выходе газодинамического сопла должна быть обеспечена сверхзвуковая скорость, то диаметр среза газодинамического сопла  $d_{ср}$ , м, может быть принят равным  $d_{кр}$  (с учетом потерь на трение примем  $d_{ср} = 2,7$  мм).

Для расчета параметров газа в промежуточных сечениях задаемся следующими значениями перепадов давления  $B_i$  в  $i$ -м сечении газодинамического сопла: 1,000; 0,990; 0,950; 0,900; 0,800; 0,528; 0,500, а вычисления давления  $P_i$ , температуры  $T_i$ , относительного объема  $V_i$ , плотности  $\rho_i$ , скорости  $v_i$ , местной скорости звука  $a_i$ , м/с, числа Маха  $M_i$ , поперечного сечения  $f_i$  и диаметра  $d_i$  в  $i$ -м сечении газодинамического сопла выполним по формулам (1) – (7). Местную скорость звука и число Маха вычислим по формулам

$$a_i = \sqrt{kRT_i}; \quad M_i = \frac{v_i}{a_i}.$$

Результаты расчета сведены в таблицу.

Параметры газа и газодинамического сопла в промежуточных сечениях

| Параметры                    | Сечение |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------------------------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                              | Вход    | Номер сечения        |                      |                      |                      |                      |                      |
|                              |         | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                    |
| $B_i$                        | 1,000   | 0,990                | 0,950                | 0,900                | 0,800                | 0,528                | 0,500                |
| $P_i$ , МПа                  | 1,000   | 0,990                | 0,950                | 0,900                | 0,800                | 0,528                | 0,500                |
| $T_i$ , К                    | 293,00  | 292,15               | 288,74               | 284,31               | 274,90               | 244,13               | 240,36               |
| $V_i$ , м <sup>3</sup> /кг   | 0,8409  | 0,0847               | 0,0872               | 0,0906               | 0,0986               | 0,1327               | 0,1380               |
| $\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup> | 11,90   | 11,81                | 11,46                | 11,03                | 10,14                | 7,54                 | 7,25                 |
| $v_i$ , м/с                  | 0,00    | 41,32                | 92,51                | 132,13               | 190,69               | 313,75               | 325,20               |
| $a_i$ , м/с                  | 0,00    | 342,62               | 340,61               | 337,99               | 332,35               | 313,20               | 310,77               |
| $M_i$                        | –       | 0,12                 | 0,27                 | 0,39                 | 0,57                 | 1,00                 | 1,04                 |
| $f_i$ , м <sup>2</sup>       | –       | $2,46 \cdot 10^{-5}$ | $1,13 \cdot 10^{-5}$ | $0,82 \cdot 10^{-5}$ | $0,62 \cdot 10^{-5}$ | $0,51 \cdot 10^{-5}$ | $0,51 \cdot 10^{-5}$ |
| $d_i$ , м                    | –       | $5,59 \cdot 10^{-3}$ | $3,80 \cdot 10^{-3}$ | $3,20 \cdot 10^{-3}$ | $2,80 \cdot 10^{-3}$ | $2,60 \cdot 10^{-3}$ | $2,60 \cdot 10^{-3}$ |

По расчетным данным таблицы на рис. 2 изображены газодинамическое сопло и соответствующие его сечению газодинамические параметры.

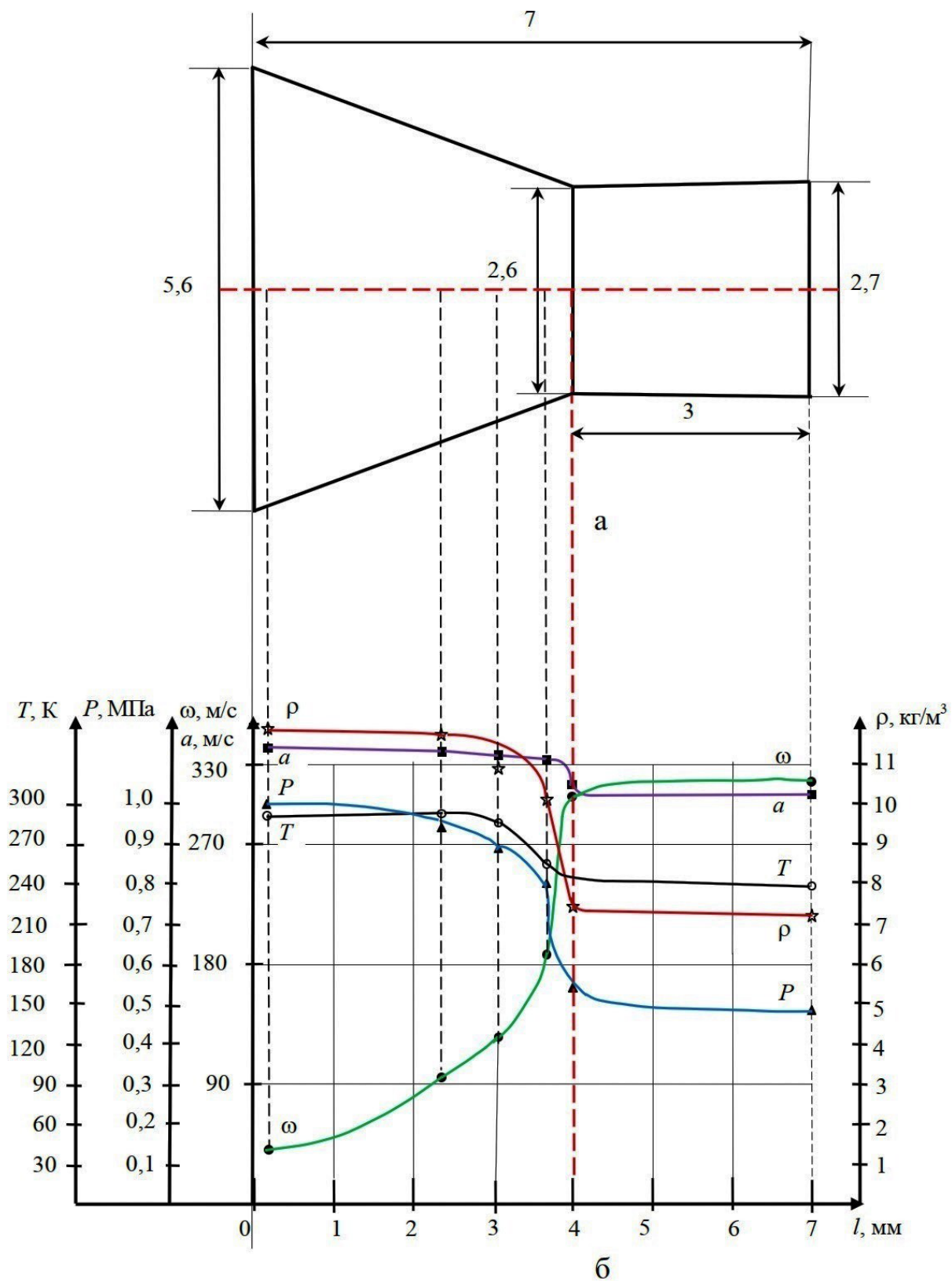


Рис. 2. Газодинамическое сопло:

а – газодинамическое сопло; б – графики термодинамических параметров  $\rho$ ,  $a$ ,  $P$ ,  $T$ ,  $\omega$

Из графика (рис. 2) видно, что в газодинамическом сопле происходит преобразование энтальпии в кинетическую энергию газа. Плотность, температура, статическое давление газа и местная скорость звука вдоль газодинамического сопла уменьшаются, а скорость газового потока – увеличивается до значения звуковой скорости.

Конструкцию другого элемента генератора Гартмана – резонатора – выбираем с острыми кромками для повышения устойчивости работы при давлении до 1 МПа. Согласно исследованиям Буше, мощность излучения колебаний увеличивается в два раза по сравнению с классическим гартмановским прототипом, если выполняется соотношение

$$d_p / d_{cp} \approx 1,33, \quad (8)$$

где  $d_p$  – диаметр резонатора Гартмана, м.

Тогда  $d_p = 1,33d_{cp} = 1,33 \cdot 2,7 = 3,6$  мм. Наиболее благоприятные условия генерации ультразвуковых колебаний, полученные Гартманом, возникают при

$$d_p = l, \quad (9)$$

где  $l$  – глубина резонатора, м.

Таким образом, глубина резонатора Гартмана (высота кромок) равна 2,7 мм.

Частоту излучения акустических волн  $f$ , Гц, приближенно определяем по формуле Гельмгольца [7]

$$f = \frac{0,25a_c}{l + 0,3d_p}, \quad (10)$$

где  $a_c$  – местная скорость звука на выходе газодинамического сопла, м/с.

Подставляя в формулу (10) значения для  $l$  из (9) с учетом соотношения (8) и упрощая выражение, получим

$$f = \frac{a_0}{5,2d_p}.$$

С учетом того, что  $a_0 = 310,77$  м/с,  $d_p = 3,6 \times 10^{-3}$  м, получаем  $f = 4611$  Гц. Следует иметь в виду, что полученное значение частоты колебаний – это основная частота резонатора Гартмана. Кроме основной частоты в спектре присутствуют частоты от звукового до ультразвукового диапазона.

Частота колебаний, получаемых согласно формуле (10), чувствительна к акустической нагрузке, то есть зависит от расположения предметов в зоне излучения генератора Гартмана. Такими предметами могут быть струйки воды, подаваемые в зону излучения для разрушения на капли. Количество струек, диаметр и геометрическое расположение влияют на частоту излучения генератора Гартмана. В настоящее время неизвестны теоретические или экспериментальные исследования, которые учитывали бы влияние струек воды на частоту излучаемых колебаний.

Расстояние между срезом сопла и кромкой резонатора Гартмана  $L$ , м, выбираем из условия [7]

$$0,43d_{\text{ср}}M_{\text{ср}}\sqrt{kn} < L < 0,86d_{\text{ср}}M_{\text{ср}}\sqrt{kn},$$

где  $M_{\text{ср}}$  – число Маха на срезе газодинамического сопла;  
 $n = P_{\text{ср}} / P_{\text{и}}$  – отношение давлений;  
 $P_{\text{ср}}$  – давление на срезе газодинамического сопла, Па;  
 $P_{\text{и}}$  – давление в камере излучения, Па.

Подставляя численные значения, получаем

$$1,75 \cdot 10^{-3} < L < 3,5 \cdot 10^{-3}.$$

**Выводы.** Получены числовые значения параметров основных узлов газоструйного генератора ультразвуковых колебаний, на основании которых построены конструктивные схемы газодинамического сопла и резонатора Гартмана.

#### Список литературы / References

1. Роенко, В.В. Температурно-активированная вода – новое слово в развитии техники пожаротушения / В.В. Роенко, Е.Д. Додонов // Системы безопасности – 2005: материалы 14-й науч.-техн. конф. – М., 2005. – С. 224 – 229.

Roenko V.V. *Temperaturno-aktivirovannaya voda – novoe slovo v razvitii tekhniki pozharotusheniya* [Temperature activated water is the advance in development of the firefighting technology]. *Sistemy bezopasnosti – 2005: materialy 14-i nauch.-tekhn. konf.* [Security systems-2005: materials of the 14<sup>th</sup> scientific-technical conference]. Moscow, 2005, pp. 224-229. (In Russian).

2. Роенко, В.В. Применение температурно-активированной воды для тушения пожаров турбинных масел на объектах теплоэнергетики / В.В. Роенко, А.В. Пряничников, Е.Б. Бондарев // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып. 4(62). – С. 84 – 93.

Roenko V.V., Pryanichnikov A.V., Bondarev E.B. *Primenenie temperaturno-aktivirovannoi vody dlya tusheniya pozharov turbinnykh masel na ob'ektakh teploenergetiki* [Utilization of temperature activated water for extinguishing the fires of turbine oils at heat power industrial objects]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti – Technosphere safety technologies*, 2015, issue 4(62), pp. 84-93. (In Russian).

3. Андрюшкин, А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монография / А.Ю. Андрюшкин. – СПб.: БГТУ, 2012. – 400 с.

Andryushkin A.Yu. *Formirovanie dispersnykh sistem sverkhzvukovym*

*gazodinamicheskim raspyleniem: monografiya* [Formation of dispersion systems by ultrasound gas-dynamic spraying: monograph]. Sankt-Petersburg, BG TU Press, 2012, 400 p. (In Russian).

4. Дауэнгауэр, С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С.А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 78 – 81.

Dauengauer S.A. *Pozharotushenie tonkoraspylyonnoi vody: mekhanizmy, osobennosti, perspektivy* [Fire extinguishing with fine-air water spraying: mechanisms, specific features, prospects]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2004, no. 6, pp. 78-81. (In Russian).

5. Цариченко, С.Г. Некоторые вопросы пожаротушения тонкораспыленной водой [Электронный ресурс]. – URL: <https://docplayer.ru/29358012-Nekotorye-voprosy-pozharotusheniya-tonkoraspylennoy-vodoy.html> (дата обращения: 04.06.2021).

Tsarichenko S.G. *Nekotorye voprosy pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [*Elektronnyi resurs*] [Certain questions of fire-extinguishing with fine-air water spray (Electronic resource)]. Available at: <https://docplayer.ru/29358012-Nekotorye-voprosy-pozharotusheniya-tonkoraspylennoy-vodoy.html> (accessed: 04.06.2021). (In Russian).

6. Ультразвуковое пожаротушающее устройство / В.Г. Агеев, Г.И. Пештибай, 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 ustroystvo* [Ultrasound 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).

7. Глазнев, В.Н. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний / В.Н. Глазнев, Ю.Г. Коробейников // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 4. – С. 62 – 67.

Glaznev V.N., Korobeinikov Yu.G. *Effekt Gartmana. Oblast' sushhestvovaniya i chastoty kolebaniy* [The Hartmann effect. Domain of existence and frequency of oscillations]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Applied mechanics and applied physics*, 2001, vol. 42, no. 4, pp. 62-67. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым  
Дата поступления рукописи 09.06.2021

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

*Georgy Ivanovich Pefitbay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;*

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

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

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

## ULTRASONIC VIBRATION GENERATOR FOR SPRAYING A FIRE-EXTINGUISHING LIQUID

**Purpose.** Substantiation of the parameters of the gas-jet ultrasonic vibration generator in order to plot its construction diagram.

**Methods.** Analytical calculations of the Hartmann oscillator construction parameters, the thermodynamic and construction parameters of a gas-dynamic nozzle.

**Results.** The following thermodynamic parameters of the gas-dynamic nozzle have been determined: temperature, pressure, velocity, density, local sonic speed. It has been demonstrated that the gas velocity reaches the sonic speed at the cut of the nozzle and activates the Hartmann oscillator. The construction diagrams of the gas-dynamics nozzle and the Hartmann oscillator have been plotted according to the calculated construction data.

**Scientific novelty.** The parameters of the gas-jet ultrasonic vibration generator have been substantiated where a movable valve is absent, and the Hartmann oscillator is equipped with the sharp cone edges.

**Practical value.** The construction diagrams of the nozzle and the Hartmann oscillator have been developed, the obtained geometric dimensions will allow plotting the diagrams of the fire-extinguishing installation brassboard.

**Keywords:** *generator; thermodynamic parameters; construction parameters; nozzle; oscillator.*

УДК 622.822.22:[552.574:543.632.44]

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: ober.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*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ КИСЛОРОДА В ПОРЫ УГЛЯ НА ОСНОВЕ ИЗОТЕРМ АДсорбЦИИ

**Цель.** Установление коэффициентов диффузии и адсорбции кислорода в углях при переменном значении его концентрации в газовой фазе для изучения начальной стадии самовозгорания твердого топлива.

**Методы.** Математическое моделирование процесса адсорбции кислорода частицами угля и исследование динамики коэффициента диффузии при различных концентрациях окислителя в газовой фазе.

**Результаты.** Используя динамику концентрации кислорода в порах угля при различной его концентрации, определены параметры массопереноса для начального периода окисления.

**Научная новизна.** Впервые установлена зависимость коэффициентов диффузии и адсорбции кислорода от концентрации его в газовой фазе для прогнозирования интенсивности реакции окисления угля и температуры его самовозгорания.

**Практическая значимость.** Повышение точности определения параметров адсорбции кислорода углями в выработанном пространстве позволяет своевременно принять меры по предупреждению возникновения эндогенного пожара.

**Ключевые слова:** низкотемпературное окисление; коэффициент диффузии; адсорбция; концентрация кислорода; уголь.

**Постановка задачи.** Основными процессами, влияющими на хемосорбцию кислорода поверхностью угля и приводящими к выделению теплоты, являются диффузия и адсорбция, которые характеризуются соответствующими коэффициентами  $D$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , и  $\beta$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

Расчеты коэффициентов внутреннего массопереноса (в том числе диффузии) на основе изотерм адсорбции впервые были предложены П.П. Золотаревым, который получил и математически обосновал аналитические зависимости, связывающие коэффициенты массопереноса и внутренней диффузии адсорбата в адсорбируемом веществе [1]. На конкретных примерах для двух образцов силикагеля рассчитаны коэффициенты внутреннего массопереноса пара, в том числе эффективные коэффициенты диффузии, показывающие их зависимость от концентрации адсорбата. Это свидетельствует о том, что данная зависимость может быть обнаружена и в случае адсорбции кислорода природными углями.

**Анализ исследований и публикаций.** Эффективные коэффициенты диффузии кислорода в углях могут быть установлены с помощью газовой хроматографии, при использовании которой размывание хроматографического пика вызвано диффузией в газе и порах сорбента, а также массообменом между ними. В соответствии с диффузионно-массообменной теорией Ван-Деемтера –

Жуховицкого при отсутствии потока газа и сорбента в хроматографической колонке наблюдаем молекулярную диффузию. При наличии газового потока, проходящего через пористый сорбент, диффузия представляет собой сложное явление, характеризующееся эффективным коэффициентом диффузии  $D_{\text{эфф}}$ , м<sup>2</sup>/с, который прямо пропорционален высоте, эквивалентной теоретической тарелке (ВЭТТ),  $H$ , м [2].

Варьирование параметров эксперимента позволяет исследовать различные диффузионные процессы, протекающие при сорбции газа на пористом сорбенте [2]. При условии, что вклад турбулентной и продольной диффузий в величину размывания хроматографического пика незначителен по сравнению с внутренидиффузионной массопередачей, изменение ВЭТТ обусловлено третьим членом уравнения Ван-Деемтера, имеющего вид [2]

$$H \approx \frac{8}{\pi^2} \frac{\Gamma'}{(1 + \Gamma')^2} \frac{d^2}{D_{\text{внутр}}} \alpha, \quad (1)$$

где  $H$  – высота, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ), м;

$\Gamma'$  – частный коэффициент Генри, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр зерна угля, м;

$D_{\text{внутр}}$  – коэффициент внутренней диффузии кислорода в поры угля, м<sup>2</sup>/с;

$\alpha$  – линейная скорость газа-носителя на выходе из колонки, м/с.

Для экспериментальных исследований выбраны температура 80 °С и фракция угля 0,35...0,50 мм. С помощью серийного хроматографа через колонку, заполненную пробой угля, пропускали с различной скоростью газ-носитель (гелий), импульсно вводили кислород и определяли параметры хроматографического пика. В результате исследования углей различной стадии метаморфизма значения коэффициента внутренней диффузии кислорода в поры сорбента, рассчитанные по формуле (1), находятся в пределах  $2,0 \cdot 10^{-8} \dots 2,1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Рассмотренные хроматографические исследования проведены при постоянной концентрации кислорода, однако для шахтных условий характерно изменение данного параметра. Кроме того, не во всех случаях можно пренебречь ролью внешней диффузии в гетерогенном процессе окисления угля, приводящем к его самовозгоранию, поэтому необходимо установить влияние концентрации кислорода на значение коэффициента диффузии газа в пористой среде.

В работе [3] рассмотрен процесс повышения температуры в скоплении угля при отсутствии принудительной фильтрации воздуха, например, на складах, в трюмах кораблей и др. В этом случае процесс самонагрева происходит за счет поглощения кислорода, находящегося в пустотах скопления и характеризуемого коэффициентом молекулярной диффузии  $D_{\text{мол}}$ , м<sup>2</sup>/с. При моделировании распределения температуры авторами использовано значение  $D_{\text{мол}} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и показано, что молекулярной диффузии вполне достаточно

для формирования тепловой аномалии в угольном скоплении [3]. Однако в данной работе рассмотрен процесс окисления угля без учета движения воздуха в горной выработке.

**Цель работы** – определение коэффициентов диффузии и адсорбции низкотемпературного окисления угля при переменном значении концентрации кислорода в газовой фазе для изучения начальной стадии самовозгорания твердого топлива.

**Изложение основного материала.** Динамика хемосорбции кислорода углем – определяющий фактор процесса его окисления и самовозгорания, который зависит от физико-химических характеристик угля, размеров его частиц и параметров массопереноса, таких как коэффициенты диффузии и адсорбции [4].

На основании решения задачи неравновесной адсорбции газа в пористой частице шарообразной формы получено следующее выражение для определения коэффициента диффузии  $D$ , м<sup>2</sup>/с [5]:

$$D = \frac{\beta_1 (rP)^2}{3[1 - e^{-\beta_1 \tau} / (1 - C(\tau) / C_c)]}, \quad (2)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент адсорбции кислорода, с<sup>-1</sup>;

$r$  – радиус частицы адсорбента (угля), м;

$P$  – стериический множитель, равный 10<sup>3</sup>;

$\tau$  – время, с;

$C(\tau)$  и  $C_c$  – концентрации кислорода в порах угля и исходной смеси, моль/м<sup>3</sup>.

Используя выражение (2), литературные данные хроматографического определения коэффициентов диффузии для некоторых значений  $C_c$ , а также результаты динамики сорбции кислорода углями, определим коэффициенты диффузии по мере насыщения углей кислородом и величину его адсорбции.

Воспользуемся результатами определения коэффициентов диффузии с помощью хроматографического метода [2] для различных марок угля при начальной концентрации кислорода  $C_c = 9,36$  моль/м<sup>3</sup> и по формуле (2) установим динамику коэффициентов  $D$  и  $\beta_1$ . Используем следующие исходные данные:  $r = 0,2125 \cdot 10^{-3}$  м; соотношение  $C(\tau)/C_c$  приведено на рис. 1.

Результаты экспериментального исследования коэффициентов диффузии и адсорбции во время протекания процесса при различной начальной концентрации кислорода приведены в таблице и на рис. 2. Анализ динамики коэффициентов диффузии при различной  $C_c$  показывает, что наибольшее изменение  $D$  происходит в начальный период адсорбции кислорода в связи с заполнением поверхностного слоя угля, доступного для протекания реакции окисления. Дальнейшее изменение коэффициентов диффузии незначительно и при различных концентрациях кислорода имеет близкие значения.

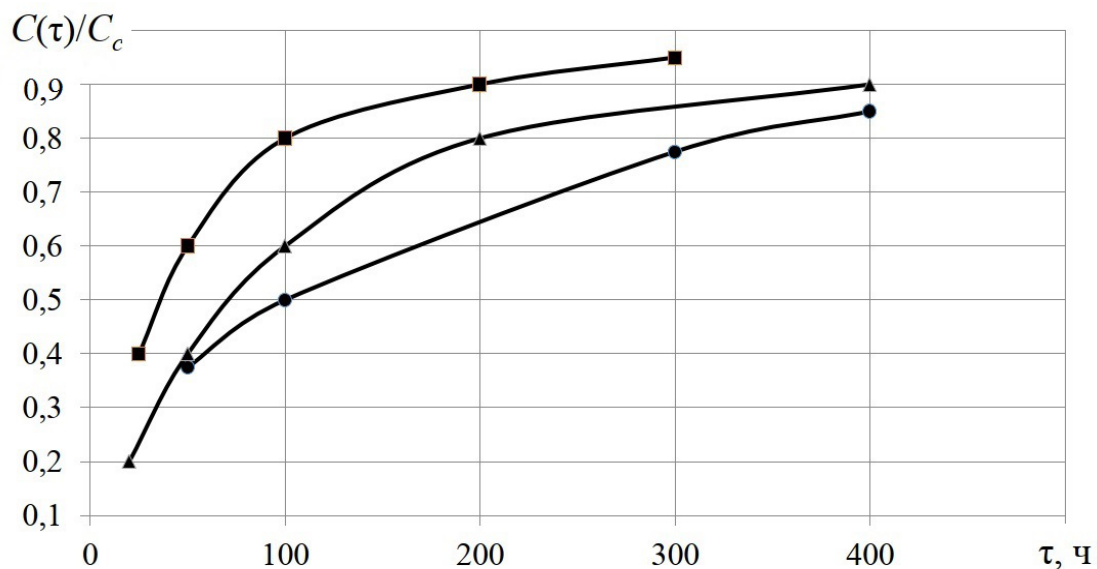


Рис. 1. Динамика концентрации кислорода в порах угля при его различной начальной концентрации:  
 ● –  $C_c = 9,36$  моль/м<sup>3</sup>; ■ –  $C_c = 22,3$  моль/м<sup>3</sup>; ▲ –  $C_c = 44,6$  моль/м<sup>3</sup>

Динамика коэффициентов диффузии и адсорбции кислорода углем

| Параметр                               | Начальная концентрация кислорода $C_c = 9,36$ моль/м <sup>3</sup> и время адсорбции $\tau$ , ч |      |       |      |      |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|------|
|                                        | 50                                                                                             | 100  | 300   | 400  | —    |
| $C(\tau)/C_c$                          | 0,375                                                                                          | 0,5  | 0,775 | 0,85 | —    |
| $D \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с     | 2,08                                                                                           | 1,17 | 0,81  | 0,74 |      |
| $\beta_1 \cdot 10^6$ , с <sup>-1</sup> | 10,50                                                                                          | 6,00 | 5,30  | 4,90 |      |
| Параметр                               | Начальная концентрация кислорода $C_c = 22,3$ моль/м <sup>3</sup> и время адсорбции $\tau$ , ч |      |       |      |      |
|                                        | 20                                                                                             | 50   | 100   | 200  | 400  |
| $C(\tau)/C_c$                          | 0,2                                                                                            | 0,4  | 0,6   | 0,8  | 0,9  |
| $D \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с     | 3,82                                                                                           | 2,26 | 1,26  | 0,87 | 0,76 |
| $\beta_1 \cdot 10^6$ , с <sup>-1</sup> | 11,00                                                                                          | 5,20 | 5,60  | 5,00 | 5,00 |
| Параметр                               | Начальная концентрация кислорода $C_c = 44,6$ моль/м <sup>3</sup> и время адсорбции $\tau$ , ч |      |       |      |      |
|                                        | 25                                                                                             | 50   | 100   | 200  | 300  |
| $C(\tau)/C_c$                          | 0,4                                                                                            | 0,6  | 0,8   | 0,9  | 0,95 |
| $D \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с     | 5,24                                                                                           | 4,01 | 1,86  | 1,02 | 0,84 |
| $\beta_1 \cdot 10^6$ , с <sup>-1</sup> | 9,00                                                                                           | 6,70 | 6,60  | 5,58 | 5,18 |

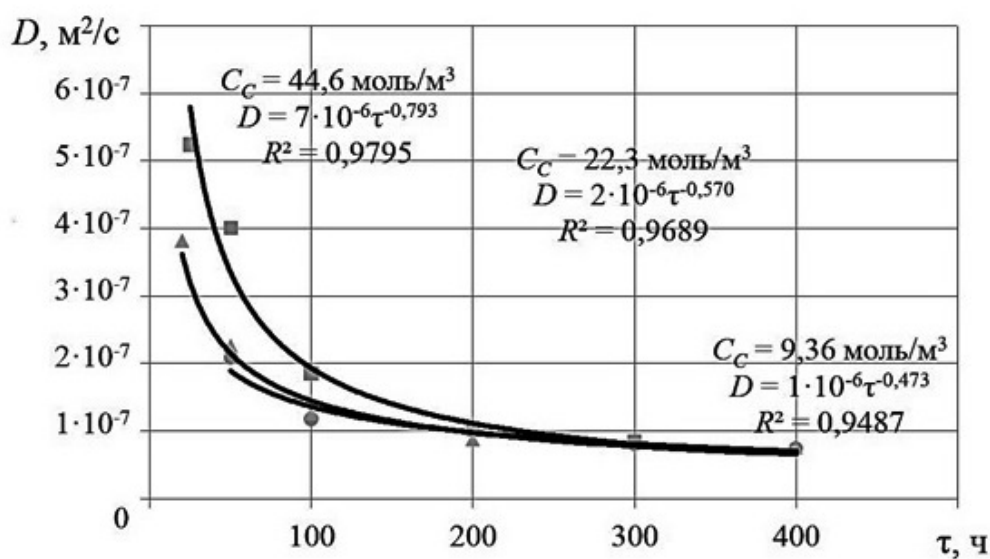


Рис. 2. Динамика коэффициента диффузии кислорода различной концентрации:

● –  $C_c = 9,36$  моль/м³; ▲ –  $C_c = 22,3$  моль/м³; ■ –  $C_c = 44,6$  моль/м³

Используя полученные данные, определены средние значения коэффициента диффузии за время протекания адсорбции, которые представлены на рис. 3 и аппроксимированы зависимостью от начальной концентрации кислорода

$$D_{\text{ср}} = 3,985 \cdot 10^{-8} C_c^{0,49}. \quad (3)$$

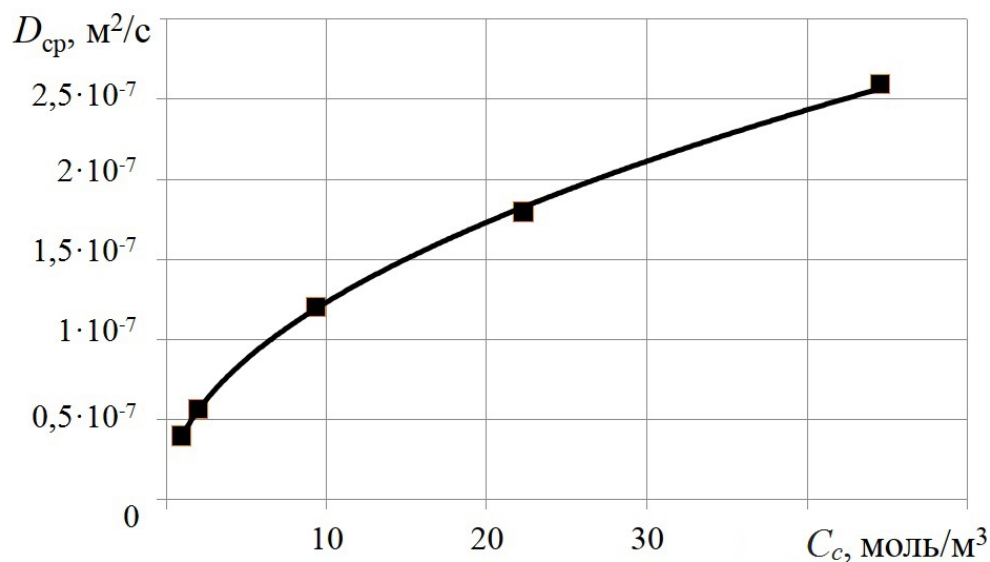


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии кислорода от его концентрации

Установленная зависимость позволит определить значение коэффициента диффузии при концентрации кислорода в газовой фазе менее 9,36 моль/м³ и оценить развитие окислительного процесса в скоплении угля.

Данное утверждение основано на экспериментальном исследовании С.П. Грекова, выполненном на шахте 1-1-бис им. Артема путем анализа проб шахтного воздуха, отобранных в выработанном пространстве по мере подвигания очистного забоя со скоростью 1 м/сут. Через несколько дней исследования на расстоянии около 70 м от лавы концентрация кислорода в отобранной пробе была 0,89 моль/м<sup>3</sup>. Таким образом, на практике было установлено значительное снижение концентрации кислорода в заваленной части лавы, где нередко остается уголь, представляющий собой потенциальный очаг эндогенного пожара.

Концентрация кислорода зависит от метанообильности угольного пласта, наличия и расположения спутников пласта и их газоносности, отхода лавы от места скопления в выработанном пространстве и других факторов. Поэтому в результате дальнейших исследований изменения концентрации кислорода в межкусковом пространстве скопления угля установлено выражение в виде

$$C/C_c = 1 - \exp\left[\frac{0,76}{0,83 + Q_0 \rho} 1,1 \cdot 10^{-5} \tau\right], \quad (4)$$

где  $Q_0$  – газоносность пласта, м<sup>3</sup>/т;

$\rho$  – плотность угля, т/м<sup>3</sup>.

Значение концентрации кислорода в порах угля, рассчитанное по формуле (4), при  $C_c = 9,36$  моль/м<sup>3</sup> равно 1...2 моль/м<sup>3</sup>, что соответствует  $D_{\text{ср}} = 3,98 \cdot 10^{-8} \dots 5,60 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с (см. формулу (3)), которое меньше результатов, полученных с помощью хроматографического метода. Таким образом, при установлении коэффициента диффузии необходимо учитывать концентрацию кислорода в порах сорбента.

**Выводы.** В результате исследования динамики окисления угля установлена зависимость коэффициента диффузии от концентрации кислорода в порах сорбента, которая влияет на интенсивность развития процесса самовозгорания. Дальнейшие исследования параметров адсорбции угля различных марок с учетом насыщения метаном позволят уточнить механизм низкотемпературного окисления угля.

#### Список литературы / References

1. Золотарев, П.П. О некоторых теоретических моделях кинетики сорбции и десорбции и их взаимосвязи / П.П. Золотарев, Р.Х. Хамизов, А.Н. Груздева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10. – Вып. 6. – С. 854 – 863.

Zolotarev P.P., Khamizov R.Kh., Gruzdeva A.N. *O nekotorykh teoreticheskikh modelyakh kinetiki sorbtsii i desorbtsii i ikh vzaimosvyazi* [On certain theoretical models of kinetics of sorption and desorption and their interrelation]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2010, vol. 10, issue 6, pp. 854-863. (In Russian).

2. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах /

П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. – 792 с.

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

3. Развитие процесса самонагрева в скоплениях угля под действием молекулярной диффузии кислорода / Е.П. Ютяев, В.А. Портола, А.А. Мешков [и др.] // Уголь. – 2018. – № 10. – С. 42 – 46.

Yutyaev Ye.P., Portola V.A., Meshkov A.A. [et al]. *Razvitie protsessa samonagrevaniya v skopleniyakh uglya pod deistviem molekulyarnoi diffuzii kisloroda* [Development of a spontaneous heating process in coal accumulations under the influence of oxygen molecular diffusion]. *Ugol' – Coal*, 2018, no. 10, pp. 42-46. (In Russian).

4. 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 požaroopasnosti: monografiya* [Prevention of spontaneous fire hazard: monograph]. Donetsk, 2020, 592 p. (In Russian).

5. 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).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 09.04.2021

*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; 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*

## DETERMINATION OF COEFFICIENTS OF OXYGEN DIFFUSION INTO COAL PORES ON THE BASIS OF ADSORPTION ISOTHERMS

**Purpose.** Determination of the oxygen diffusion and adsorption coefficients in coal under a variable value of its concentration in the gaseous phase for studying the initial stage of solid fuel spontaneous combustion.

**Methods.** Mathematical modeling of a process of oxygen adsorption by coal particles and investigation of the diffusion coefficient dynamics under different concentrations of an oxidizing agent in the gaseous phase.

**Results.** The mass transfer parameters have been determined for the initial oxygenation period using the oxygen concentration dynamics in the pores of coal with its different concentration.

**Scientific novelty.** For the first time a dependence of the oxygen diffusion and adsorption coefficients on its concentration in the gaseous phase has been established to predict the intensity reaction of coal oxidation and the temperature of its spontaneous combustion.

**Practical value.** The improvement of determination precision of the parameters of oxygen adsorption by coal in the goaf allows timely preventing a spontaneous fire from occurrence.

**Keywords:** low-temperature oxidation; diffusion coefficient; adsorption; oxygen concentration; coal.

УДК 699.812.3:678.652'41'21

*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru  
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55*

## ПОЛИМЕРНАЯ КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА

**Цель.** Разработка рецептуры полимерной композиции на основе карбамидоформальдегидной смолы для получения вспучивающегося огнезащитного покрытия.

**Методы.** Определение коэффициента вспучивания методом измерения и соотношения толщины слоя покрытия до и после теплового воздействия в муфельной печи. Оценка горючести огнезащитного покрытия методом огневого удара – экстремального нагревания покрытия в открытом пламени газовой горелки.

**Результаты.** На основании результатов экспериментальных исследований выбраны целевые компоненты, разработан рецептурный состав полимерной композиции, обеспечивающей получение на поверхности металла и древесины покрытия с высокими огнезащитными свойствами. Полимерная композиция включает связующее вещество – карбамидоформальдегидную смолу КФ-Ж, вспенивающий наполнитель – аммонийные соли (аммофос и полифосфат аммония), смесь меламина и пентаэритрита, взятых в заданном соотношении, при котором вспучивание покрытия эффективно и выполняется его огнезащитная функция. На основе разработанной полимерной композиции определен коэффициент вспучивания и выполнена оценка горючести огнезащитного материала в открытом пламени газовой горелки.

**Научная новизна.** Впервые обосновано оптимальное массовое соотношение связующего вещества, инертных и активных добавок полимерной композиции для огнезащитного материала, вспучивающегося при термическом воздействии и способного образовывать на защищаемой поверхности вспененный кокс.

**Практическая значимость.** Разработан состав полимерной композиции на основе карбамидоформальдегидной смолы, соединений фосфора и неорганического наполнителя, который предназначен для получения вспенивающихся огнезащитных покрытий, повышающих огнезащитную эффективность строительных конструкций. Повышение огнезащитной эффективности конструкций снизит риск быстрого обрушения здания. Компоненты разработанной полимерной композиции малотоксичны, их можно использовать в конструкциях с огнезащитным покрытием в жилых помещениях.

**Ключевые слова:** антипирен; вспучивающееся покрытие; полимерная композиция; древесина; карбамидоформальдегидная смола; огнезащита.

**Постановка проблемы.** Для снижения горючести деревянных и повышения пределов огнестойкости металлических конструкций широко применяют огнезащитные краски вспучивающегося типа [1].

Существуют две группы красок вспучивающегося типа – на основе органических и неорганических связующих. Краски на основе органических вяжущих имеют ряд преимуществ по сравнению с красками на неорганической основе. Они обладают хорошими декоративными свойствами, высокой адгезией к подготовленной поверхности древесины или металла, наносятся слоем толщиной 0,5 мм. К недостаткам покрытий на основе органических связующих можно отнести их собственную горючесть на начальном этапе огневого

воздействия, высокую токсичность продуктов термодеструкции по сравнению с составами на основе неорганических вяжущих и высокую стоимость.

Покрытия на основе неорганических веществ – негорючие и нетоксичные, имеют меньшую стоимость. К недостаткам минеральных огнезащитных составов можно отнести их низкие декоративные свойства, небольшую механическую прочность, малый срок эксплуатации и неустойчивость к воздействию влаги, большой расход по сравнению с органическими красками для достижения одинакового уровня огнезащитной эффективности.

В последнее время для повышения экологической безопасности актуальными стали вопросы применения экологически чистых «зеленых» технологий и материалов. Поэтому разработку рецептур огнезащитных средств, не содержащих горючих, токсичных компонентов и обладающих высокими огнезащитными свойствами, можно считать актуальной научной и практической задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Критический анализ исследований и публикаций показал, что в настоящее время наибольшее распространение получили вспучивающиеся огнезащитные краски на основе органических связующих [2, 3, 4]. Использование таких красок обеспечивает более широкие возможности огнезащиты, так как за счет увеличения толщины вспученного слоя можно повысить огнестойкость строительных конструкций до нескольких часов. Однако задачи повышения огнезащитной эффективности, адгезии, механической прочности вспененного кокса остаются нерешенными.

**Цель работы** – разработка полимерной композиции на основе карбамидоформальдегидной смолы для получения огнезащитного вспучивающегося покрытия.

**Изложение основного материала.** Основными компонентами огнезащитной композиции, по данным литературных публикаций и результатам экспериментальных исследований [5], должны быть полимерное связующее, газообразователь, антипирены, стабилизаторы вспененного слоя, красители, наполнители, отвердители и т.д.

Вспучивающиеся огнезащитные композиции представляют собой многокомпонентные системы, поэтому их физико-химические свойства существенно зависят от индивидуальных особенностей, правильного соотношения и обеспечения совместимости входящих в состав компонентов. Решающее влияние на общие свойства покрытия оказывает взаимодействие вяжущих и наполнителей, поэтому правильный подбор компонентов – важная задача при создании рецептуры.

При разработке рецептуры полимерной композиции руководствовались необходимостью получения ряда свойств, которые определяют огнезащитную способность покрытия:

- негорючесть;
- теплоизолирующие свойства;
- изолирование от доступа воздуха.

Значение правильного выбора компонентов заключается не только в обеспечении огнезащитных свойств. Покрытие в условиях эксплуатации должно отвечать ряду дополнительных требований, таких как:

- водонепроницаемость;
- водостойкость;
- эластичность;
- прочность;
- возможность сцепления с защищаемым материалом;
- атмосферостойкость и т.п.

Для получения композиции, которая удовлетворяла бы предъявленным требованиям, необходимо, чтобы компоненты, входящие в ее состав, относились к негорючим, трудногорючим материалам или образовывали такие соединения в условиях нагревания.

Наиболее пригодным органическим пленкообразующим веществом считают негорючую, невзрывоопасную, водорастворимую карбамидоформальдегидную смолу КФ-Ж, представляющую собой смесь низкомолекулярных продуктов поликонденсации карбамида с формальдегидом. Карбамидоформальдегидная смола переходит в неплавкое и нерастворимое состояние под влиянием катализаторов отверждения кислого характера: органических (уксусная, щавелевая) и минеральных (соляная, серная) кислот, некоторых солей (хлористый аммоний, хлористый цинк) [6]. Для улучшения эксплуатационных свойств в качестве стабилизирующей добавки применяли водный раствор трехатомного спирта – глицерина.

Карбамидоформальдегидный олигомер в условиях пожара образует вспученный слой и выделяет гасящие пламя газы, такие как диоксид углерода  $\text{CO}_2$  и аммиак  $\text{NH}_3$ . Размягчение полимерной составляющей происходит в температурном интервале  $75 \dots 155^\circ\text{C}$ , что позволило определить примерное значение температуры разложения газообразователя, которая в соответствии с работой [3] должна быть несколько выше температуры размягчения полимерного связующего.

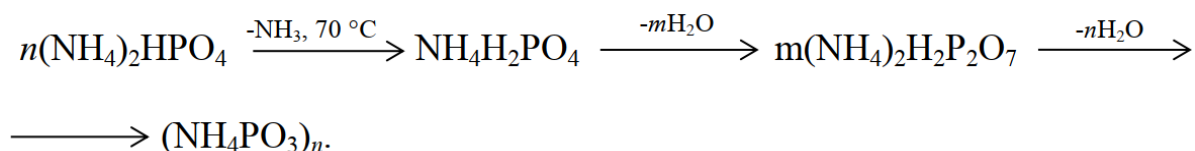
Для разработки полимерной композиции оптимальным газообразователем выбран меламин. Такой выбор добавки обусловлен тем, что меламин дополнительно обладает свойствами антипирена, что позволило решить следующие задачи:

- ингибировать реакцию горения;
- уменьшить долю возвращенной теплоты горения;
- достичь образования менее горючих и токсичных продуктов пиролиза;
- замедлить скорость диффузии горючих продуктов пиролиза к фронту пламени.

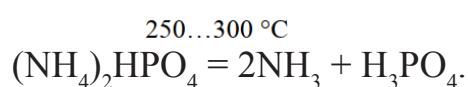
При разработке полимерной композиции для снижения экономических затрат использованы ингредиенты, которые обладают полифункциональными свойствами. Например, меламин выступает в роли газообразователя и одновременно антипирена. В результате реакции термического разложения

образуются молекулы диоксида углерода и аммиака – негорючих соединений.

Аналогичным двойственным эффектом обладают фосфаты аммония, которые применяли в качестве отвердителя карбаминоформальдегидной смолы, разложение которых под воздействием теплоты происходит по следующей схеме:



При температуре 250...300 °С возможно разложение диаммонийфосфата по химической реакции



В результате реакции разложения образуется аммиак, выделяющаяся фосфорная кислота вызывает дегидратацию полимерного связующего, что приводит к карбонизации и ускорению процесса углеобразования, а также к выделению газов, вспучивающих полимерную композицию.

После тщательного перемешивания компонентов композицию наносили вручную слоем толщиной 2 мм на стальные пластины размерами 120x80x2 мм и деревянные бруски размерами 150x10x10 мм. После сушки в естественных условиях и испарения воды определяли толщину слоя покрытия.

Эффективность огнезащиты во многом обуславливает способность покрытия вспучиваться. Коэффициент вспучивания в значительной мере зависит от скорости нагревания покрытия, поэтому критерием оценки оптимального состава композиции выбран коэффициент вспучивания  $K$ , значение которого рассчитывали по формуле

$$K = h_{\text{к}}/h_0,$$

где  $h_0$  и  $h_{\text{к}}$  – высота защитного слоя композиции до и после термического воздействия соответственно, мм.

Кратность вспучивания при увеличении температуры до 600 °С возрастает в 10 раз. Такое количество полученного защитного вспененного кокса создает эффективную преграду на пути развития процесса горения.

Составы на основе аминокальдегидных олигомеров не подходят из-за срока эксплуатации, так как подвержены преждевременному отверждению. Эта особенность привела к тому, что большинство огнезащитных составов на основе карбаминоформальдегидных смол – двухкомпонентные, то есть смешивание компонентов производят непосредственно перед применением композиции. Разработанную полимерную композицию готовят из двух частей:

- полимерный состав;
- водный раствор аммонийных солей фосфорной кислоты (отвердитель).

Следует отметить, что выбор рабочей концентрации отвердителя прямо связан со временем отверждения и, соответственно, со временем высыхания материала. После смешивания и тщательного перемешивания составляющих полимерная композиция готова к применению. Для повышения огнестойкости конструкции полимерную композицию наносят на защищаемую поверхность тонким слоем (до 1 мм). После высыхания слоя можно повторно нанести композицию на защищаемую поверхность. В обычных условиях эксплуатации полимерная композиция находится в состоянии ожидания (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид полимерной композиции до термического воздействия:  
а – на металле; б – на древесине

Оценку горючести экспериментальных образцов выполняли в открытом пламени газовой горелки на специальной установке в лабораторных условиях.

На основе карбамидоформальдегидной смолы при определенном соотношении добавок были приготовлены и испытаны композиции с различным процентным содержанием вспучивающей системы. При визуальном наблюдении за образцами во время испытания и осмотре их после извлечения из пламени газовой горелки скапывания, пламенного горения в зоне и вне зоны воздействия пламени, самостоятельного горения и тления после отключения горелки не наблюдалось. Эффективность вспучивания полимерной композиции на металлической пластине показана на рис. 2,а.

Под действием тепловых потоков полимерная композиция выполняет защитные функции, что позволяет применять ее для повышения огнестойкости металлических и деревянных строительных конструкций (рис. 2).



Рис. 2. Защитный слой полимерной композиции  
после термического воздействия:  
а – на металле; б – на древесине

Эффективность образования вспененного кокса композиции на деревянных брусках после воздействия пламени газовой горелки показана на рис. 2,б.

**Выводы.** Разработана рецептура полимерной композиции на основе водорастворимой карбаминоформальдегидной смолы для получения огнезащитного материала, с помощью которого возможно решение ряда задач улучшения пожарной безопасности объектов, профилактики пожаров и снижения риска их возникновения за счет повышения огнестойкости металлических и снижения горючести деревянных строительных конструкций.

#### Список литературы / References

1. Баратов, А.Н. Пожарная опасность строительных материалов / А.Н. Баратов, Р.А. Андрианов, А.Я. Корольченко. – М.: Стройиздат, 1988. – 380 с.

Baratov A.N., Andrianov R.A., Korol'chenko A.Ya. *Pozharnaya opasnost' stroitel'nykh materialov* [Fire hazard of building materials]. Moscow, Stroiiizdat Publ., 1988, 380 p. (In Russian).

2. Еремина, Т.Ю. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол / Т.Ю. Еремина, М.В. Гравит, Ю.Н. Дмитриева // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 52 – 56.

Eryomina T.Yu., Gravit M.V., Dmitrieva Yu.N. *Osobennosti i printsipy postroeniya retseptur ognezashhitnykh vspuchivayushhikhsya kompozitsii na osnove epoksidnykh smol* [Aspects and principles of composing the formulations of the fire-retardant intumescent compositions based on ethoxyline resins]. *Pozharovzryvobezопасnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 52-56. (In Russian).

3. Терморасширяющиеся полимерные композиционные материалы / Р.В. Кропачев, В.В. Новокшенов, С.И. Вольфсон, С.Н. Михайлова // Вестник технологического университета. – Казань, 2015. – Т. 18, № 5. – С. 60 – 63.

Kropachev R.V., Novokshonov V.V., Vol'fson S.I., Mikhailova S.N. *Termorasshiryayushhiesya polimernye kompozitsionnye materialy* [Intumescent polymeric composition materials]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, Kazan, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 60-63. (In Russian).

4. Повышение огнезащитной эффективности вспучивающихся эпоксидных составов / Е.Ю. Спирина-Смилка, Р.А. Яковлева, Н.В. Саенко [и др.] // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С. 247 – 252.

Spirina-Smilka Ye.Yu., Yakovleva R.A., Saenko N.V. [et al]. *Povyshenie ognezashhitnoi effektivnosti vspuchivayushhikhsya epoksidnykh sostavov* [Enhancement of fireproof effectiveness of intumescent ethoxyline compositions]. *Problemy pozharnoi bezopasnosti – Fire safety problems*, Kharkov, NUGZU Press, 2011, issue 30, pp. 247-252. (In Russian).

5. Козлитин, А.А. Полимерный материал для огнезащиты строительных конструкций / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, О.В. Храпоненко // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 3(57). – С. 75 – 83.

Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Khraponenko O.V. *Polimernyi material dlya ognezashhity stroitel'nykh konstruktssii* [Polymeric material for fire protection of building constructions]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 3(57), pp. 75-83. (In Russian).

6. Мещерякова, А.А. Механизм получения карбамидоформальдегидных смол / А.А. Мещерякова // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 3. – С. 130 – 134.

Meshheryakova A.A. *Mekhanizm polucheniya karbamidoformal'degidnykh smol* [Mechanism of generation of urea-formaldehyde resins]. *Lesotekhnicheskii zhurnal – Forest engineering journal*, 2012, no. 3, pp. 130-134. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 02.04.2021

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

## **POLYMERIC COMPOSITION FOR PRODUCTION OF A FIRE-RETARDANT MATERIAL**

**Purpose.** Development of a polymeric composition formulation based on urea-formaldehyde resin for production of the intumescent fire-retardant coating.

**Methods.** The intumescence coefficient determination by a method of measuring and correlating the layer thickness before and after the heat exposure in a muffle furnace. Estimation of the fire-retardant coating flammability by the fire strike method, i.e. extreme heating of the coating in a gas-burner open flame.

**Results.** Based on the results of experimental investigations the target components have been selected, the formulation of the polymeric composition has been developed that ensures the coating of high fireproof characteristics to be formed on a metal or wooden surface. The polymeric composition consists of a binding agent, i.e. the КФ-Ж urea-formaldehyde resin, a foaming filling agent, i.e. ammonium salts (ammophos and ammonium polyphosphate), a mixture of cyanotriamide and pentaerythritol taken according to the required proportion which provides the effective intumescence and the execution of its fireproof function. On the basis of the designed polymeric composition the intumescence coefficient has been determined and the estimation of the fire-retardant material flammability in the gas-burner open flame has been conducted.

**Scientific novelty.** For the first time the optimal mass ratio of the binding agent, inert and reactive additives of the polymeric composition has been substantiated for the fire-retardant material intumescent under the thermal action and being able to form a foamed coke on a protected surface.

**Practical value.** The formulation of the polymeric composition based on urea-formaldehyde resin, phosphorous compounds and inorganic filling agent has been developed that is designed to produce the fire-retardant foaming coatings enhancing the fireproof effectiveness of the building constructions. The enhancement of the fireproof effectiveness of the constructions will reduce the risk of rapid collapse of a building. The components of the designed polymeric composition are low-toxic, they may be used for residential premises in constructions with the fire-retardant coating.

**Keywords:** *antipyren; intumescent coating; polymeric composition; wood; urea-formaldehyde resin; fire-protection.*

**УДК 622.822.7:614.842.614***Олег Игоревич Коврижкин, командир; e-mail: metro-1973@mail.ru**Оперативный государственный военизированный горноспасательный отряд г. Донецк МЧС ДНР  
283048, Донецк, пер. Николенко, 7. Тел. (+38 062) 343-52-64*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО АЗОТА В ИЗОЛИРОВАННУЮ ТУПИКОВУЮ ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ**

**Цель.** Разработка методики расчета подачи газообразного азота в изолированный объем тупиковой горной выработки.

**Методы.** Исследования газодинамических процессов при заполнении изолированного объема тупиковой горной выработки газообразным азотом с учетом его поглощения и утечек, наличия метановыделения и горения суфляра.

**Результаты.** Получены математические зависимости для расчета интенсивности и продолжительности подачи газообразного азота в изолированное пространство горной выработки с учетом его поглощения поверхностью выработки, возможных утечек через перемычки и трещиноватости вмещающих пород, выделения метана и горючих газов очагом горения.

**Научная новизна.** Предложен алгоритм расчета параметров подачи азота в изолированный объем тупиковой горной выработки с учетом возможных газообменных процессов.

**Практическая значимость.** Получены зависимости, позволяющие определять параметры подачи газообразного азота в изолированный участок тупиковой горной выработки.

**Ключевые слова:** *газообразный азот; тупиковая выработка; перемычка; поглощение; очаг горения; интенсивность; время подачи; изолированный объем; суфляр.*

**Постановка проблемы.** В изолированном объеме тупиковой выработки происходят сложные газодинамические процессы: из обнаженной поверхности угля выделяется метан; при наличии очага горения образуются горючие газы (водород, оксид углерода, этан и др.); из трубопровода через проём в перемычке подают азот, который частично поглощается углем и породами; через неплотности прилегания перемычки происходят утечки азота и подсосы воздуха.

Область применения методики – изолированные и полуизолированные протяженные объекты при возникновении в них пожара: подземные горизонтальные или наклонные (с углом наклона до 10°) выработки, кабельные туннели и др.

Тупиковые выработки газообильных шахт, имеющие геологические нарушения, пустоты за крепью, суфляры, купола в призабойной зоне, представляют собой особую пожарную опасность, так как вентиляция не способствует выносу метана из застойных полостей. Для получения адекватных зависимостей, которые регламентируют подачу азота в изолированную тупиковую выработку, имеющую очаг экзогенного пожара (горящий суфляр), необходимо разработать математическую модель всех протекающих газодинамических процессов.

**Анализ последних публикаций.** В работе [1] показана опасность образования слоевых и местных скоплений метана в застойных местах горных

выработок при недостаточных скорости или количестве проветриваемого воздуха.

Многие исследователи [2, 3] приводят факторы, влияющие на процесс образования слоевого скопления метана в подготовительной выработке.

В процессе разработки угольных месторождений в шахтах происходят суфлярные выделения газа, характерные для всех газоносных угледобывающих районов [4]. Причем выделения наблюдаются в очистных, капитальных и подготовительных выработках, пройденных по горным породам и по пластам угля пологого, наклонного и крутого залегания.

Из работ [4, 5] известно, что механизм суфлярного выделения метана представляет собой истечение находящегося под давлением газа из трещин, полостей и резервуаров в массиве горных пород при их вскрытии выработками или скважинами. В работе [5] описаны основные способы изоляции пожарных участков горных выработок с использованием инертных газов.

**Изложение основного материала.** В тупиковой выработке по её длине от забоя к устью имеются разнообразные источники выделения метана (прежде всего это обнаженная поверхность пласта) общей интенсивностью  $q_m$ , м<sup>3</sup>/с.

Кроме того, в тупиковой выработке находится отбитая разрыхленная горная масса, которая также выделяет метан с определенной интенсивностью  $q_{отб}$ , м<sup>3</sup>/с. Суммарную интенсивность выделения метана  $\sum q_m$ , м<sup>3</sup>/с, определяют по формуле

$$\sum q_m = q_m + q_{отб},$$

где  $q_{отб}$  – интенсивность выделения метана из отбитого угля, м<sup>3</sup>/с.

Скорость выделения метана с единицы площади поверхности зависит от метаноносности угольного пласта и вмещающих его пород, коэффициента фильтрации, открытой и закрытой пористости, растворимости метана.

Введем средний приток метана через единицу поверхности призабойного пространства  $j(t)$ , м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>). Тогда интенсивность поступления метана в призабойное пространство  $q_m$ , м<sup>3</sup>/с, равна

$$q_m = j(t)S_{пов} = j(t)\pi D_{выр}(D_{выр}/4 + L_{выр}),$$

где  $S_{пов}$  – площадь поверхности призабойной зоны тупиковой выработки, из которой выделяется метан, м<sup>2</sup>;

$D_{выр}$  – диаметр сечения выработки, м;

$L_{выр}$  – расстояние от перемычки до забоя, м.

Метановыделение из отбитого угля  $q_{отб}$ , м<sup>3</sup>/с, определяют по формуле

$$q_{отб} = AS_{уг} l_{вз} \gamma(X - X_0),$$

где  $A = 9 \cdot 10^{-4}$  – размерный коэффициент,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $S_{\text{ут}}$  – площадь забоя подготовительной выработки, пройденной по пласту угля,  $\text{м}^2$ ;  
 $l_{\text{вз}}$  – подвигание угольного забоя за взрыванием,  $\text{м}$ ;  
 $\gamma$  – объемная масса угля,  $\text{т/м}^3$ ;  
 $X$  – природная метаноносность пласта,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  
 $X_0$  – остаточная метаноносность угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ .

В тупиковых подготовительных выработках возможны суфлярные выделения газа, а также образование слоевых и местных скоплений метана.

Слоевое скопление – это скопление газозвушной смеси (с относительно высоким содержанием газа) в виде слоя вдоль кровли (для метана) или почвы (для углекислого газа) выработки, длина которого в 5 раз и более превосходит его толщину. Содержание метана в таких слоевых скоплениях может достигать 10 %, а их толщина – 70 см. Протяженность подобных скоплений вдоль выработки может быть около 750 м.

При наличии в призабойном пространстве тупиковой выработки очага пожара выделяются горючие газы. Их характеристика представлена в таблице.

Характеристика взрываемости основных горючих газов

| № п/п | Наименование газа | Нижний предел взрываемости газозвушной смеси, % | Объемная доля кислорода, ниже которой смесь не взрывается, % |
|-------|-------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1     | Оксид углерода    | 2,5                                             | 5,9                                                          |
| 2     | Водород           | 4,0                                             | 5,9                                                          |
| 3     | Этан              | 3,0                                             | 13,4                                                         |

Взрывоопасная объемная доля выделяющихся (метан) и образующихся горючих газов  $\Pi_{\text{см}}$ , %, может быть рассчитана по формуле Ле Шателье

$$\Pi_{\text{см}} = \frac{C_{\text{м.г.г}}^{(0)}}{\frac{C_{\text{м}}^{(0)}}{\Pi_{\text{м}}} + \frac{C_1^{(0)}}{\Pi_1} + \frac{C_2^{(0)}}{\Pi_2} + \dots + \frac{C_i^{(0)}}{\Pi_i}},$$

где  $C_{\text{м.г.г}}^{(0)}$  – сумма объемных долей метана и горючих газов, %, в начальный момент времени ( $\tau = 0$ );

$C_{\text{м}}^{(0)}$  – объемная доля метана до начала подачи газообразного азота, %;

$C_i^{(0)}$  – объемная доля  $i$ -го горючего газа на начальный момент времени, %.

При заполнении азотом коротких тупиковых выработок длиной  $l \leq 30$  м, площадью поперечного сечения  $S \leq 10\text{--}12$   $\text{м}^2$  и объемом  $V < 300$   $\text{м}^3$  происходит

интенсивное перемешивание газовой смеси, которое в первом приближении можно считать полным.

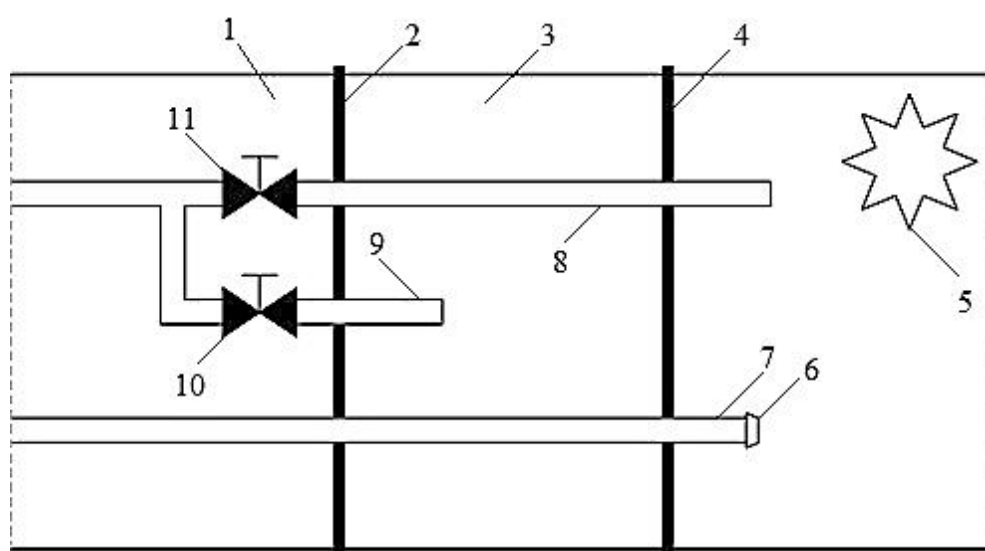
Проблема утечек азота и подсосов воздуха заключается в том, что в исходном азоте, полученном из работающей в оптимальном режиме мембранной установки, содержится до 5 % кислорода. При наличии подсосов воздуха объемная доля кислорода в изолированном перемычкой объеме тупиковой выработки составляет более 10 %. Таким образом, не обеспечиваются необходимый для подавления тлеющего горения состав газовой смеси, в которой содержание кислорода не должно превышать 1...2 %, а также предотвращение образования взрывоопасных объемных долей газов в метановоздушной смеси, для которых пик воспламенения при флегматизации азотом составляет не более 10,2 % кислорода [5, 6].

Для предотвращения утечек и подсосов изоляцию выполняют в соответствии с рекомендациями работы [5].

Кроме основной перемычки в выработке возводят дополнительную, а от трубопровода для подачи азота делают ответвление, через которое газ поступает в пространство между двумя перемычками (см. рисунок).

Давление азота в трубопроводе, подающем газ от мембранной установки, с учетом потери напора и расхода достигает 1 МПа и намного превышает воздушный напор (депрессию) на перемычку, составляющий несколько десятков даПа.

Таким образом, формируется компрессионная (шлюзовая) камера, препятствующая подсосам воздуха в изолированный объем и утечкам азота из него.



Технологическая схема подачи азота

в призабойное пространство аварийной тупиковой выработки:

- 1 – тупиковая выработка; 2, 4 – изолирующие перемычки; 3 – шлюзовая камера;  
5 – очаг пожара; 6 – закрытая крышка технологической трубы;  
7 – технологическая труба; 8 – трубопровод; 9 – патрубок; 10, 11 – задвижки

Когда шлюзовая камера будет заполнена азотом, далее его подают через ответвление, чтобы отрегулировать давление в выработке со стороны поступления свежей воздушной струи и между перемычками. Это предотвращает утечки азота и подсосы воздуха в изолированное призабойное пространство.

В общем случае изменение объемной доли азота в изолируемой части тупиковой выработки будет иметь вид

$$V \frac{dC_{N_2}}{d\tau} = q_{N_2}(1 - \alpha_{O_2}) - q_{N_2}^{\Pi} - q_{N_2}^{yT} - q_{N_2}^{yH}, \quad (1)$$

где  $C_{N_2}$  – объемная доля азота, %;

$q_{N_2}$  – интенсивность подачи азота в изолированную тупиковую выработку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q_{N_2}^{\Pi}$  – интенсивность поглощения азота на поверхности угольного пласта и вмещающих пород,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$q_{N_2}^{yT}$  – интенсивность утечек азота через тело перемычки и окружающие ее трещиноватые горные породы,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$q_{N_2}^{yH}$  – интенсивность уноса азота из изолированной выработки вместе с воздухом через проём перемычки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\alpha_{O_2}$  – объемная доля кислорода в подаваемом газообразном азоте, %;

$\tau$  – текущее время, с.

Интенсивность поглощения определяют уравнением сорбции без насыщения

$$q_{N_2}^{\Pi} = K_{\Pi} C_{N_2},$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональности, равный интенсивности поглощения при  $C_{N_2} = 1$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При использовании описанной схемы заперемычивания выработки и закрытой крышке технологического трубопровода (см. рисунок) имеем

$$q_{N_2}^{yH} = 0; \quad q_{N_2}^{yT} = 0.$$

Тогда из уравнения (1) получаем

$$V \frac{dC_{N_2}}{d\tau} = q_{N_2}(1 - \alpha_{O_2}) - K_{\Pi} C_{N_2} \quad (2)$$

при начальном условии  $C_{N_2}(\tau = 0) = C_{N_2}^0 = 0,79$ , (3)

где  $C_{N_2}^0$  – объемная доля азота в воздухе в начальный момент времени, %.

Интегрируя уравнение (2) при условии (3), находим выражение для времени подачи азота  $\tau$ , с,

$$\tau = \frac{1}{V} \frac{\ln\left(\frac{q_{N_2}}{K_{\Pi}}(1 - \alpha_{O_2}) - C_{N_2}^0\right)}{\ln\left(\frac{q_{N_2}}{K_{\Pi}}(1 - \alpha_{O_2}) - C_{N_2}\right)}.$$

Задав конечную объемную долю азота  $C_{N_2}$ , %, определено необходимое время подачи азота с интенсивностью  $q_{N_2}$ , м<sup>3</sup>/с.

При заполнении изолированной тупиковой выработки азотом важно знать не только распределение его объемной доли во времени, но также и распределение объемных долей других компонентов газовой смеси.

Исходное уравнение изменения объемной доли горючих газов  $C_{г.г}$ , %, при заполнении изолированного объема азотом имеет вид

$$V \frac{dC_{г.г}}{d\tau} = q_2 - q_{ут} C_{г.г} \quad (4)$$

с начальным условием  $C_{г.г} = C_{г.г}^{(0)}$  при  $\tau = 0$ , (5)

где  $q_2$  – интенсивность поступления метана в изолированную выработку, м<sup>3</sup>/с;

$q_{ут}$  – интенсивность утечек газа, м<sup>3</sup>/с.

Интегрируя выражение (4) с учетом начального условия (5), получаем

$$C_{г.г} = \exp \left[ -\frac{1}{V} \int_{\tau_0}^{\tau_1} q_{ут} d\tau \right] \left\{ \frac{q_2}{V} \right\} \int_{\tau_0}^{\tau} \exp \left[ \frac{1}{V} \int_{\tau_0}^{\tau} q_{ут} d\tau \right] d\tau + C_{г.г}^{(0)}.$$

Здесь  $q_2 = \sum q_m$ .

При отсутствии утечек имеем

$$C_{г.г} = \frac{q_2}{V} (\tau - \tau_1) + C_{г.г}^{(1)},$$

где  $\tau_1$  – время прекращения подачи азота, с;

$C_{г.г}^{(1)}$  – объемная доля горючих газов в момент времени  $\tau = \tau_1$ , соответствующий окончанию подачи азота, %.

Изменение объемной доли кислорода  $C_{O_2}$ , %, описано уравнением

$$V \frac{dC_{O_2}}{d\tau} = (q_n - q_2) C_{O_2}^{(н)}$$

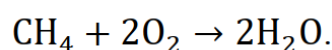
с начальным условием  $C_{O_2} = C_{O_2}^{(н)}$ ,

где  $q_n$  – интенсивность поступления кислорода в изолированную выработку, м<sup>3</sup>/с;

$C_{O_2}^{(н)}$  – объемная доля кислорода в подсасываемом в изолированный объем воздухе, %.

Далее рассмотрим горение суфляра. Предположим, что в призабойной зоне изолируемой тупиковой выработки горит суфляр с интенсивностью поступления метана  $q_m^{суф}$ , м<sup>3</sup>/с.

Реакция окисления (горения) метана с кислородом имеет следующий вид:



Для полного окисления одной молекулы метана требуются две молекулы кислорода.

Изменение объемной доли кислорода в изолируемой части выработки выглядит следующим образом:

$$V \frac{dC_{O_2}}{d\tau} = q_{N_2} \alpha_{O_2} - 2q_m^{суф}. \quad (6)$$

Начальные условия при  $\tau = 0$

$$C_{O_2} = C_{O_2}^{(0)} = 0,21, \quad (7)$$

где  $C_{O_2}^{(0)}$  – начальная объемная доля кислорода в воздухе, %.

Интегрируя выражение (6) вместе с начальным условием (7), получаем

$$C_{O_2} = C_{O_2}^{(0)} + (q_{N_2} \alpha_{O_2} - 2q_m^{суф})(\tau - \tau_0),$$

где  $\tau_0$  – начальное время подачи азота, с.

После прекращения подачи азота в изолированный объем (на момент времени  $\tau = \tau_1$ ) и выдержки в течение времени контроля отсутствия очагов горения  $\tau_{\text{выд}}$ , с, прекращается горение суфляра, открывается технологический трубопровод и газоздушная смесь удаляется из изолированного объема выработки.

Обозначив интенсивность удаления газоздушной смеси  $q_{\text{вын}}$ , м<sup>3</sup>/с, имеем

$$V \frac{dC_{N_2}}{d\tau} = -q_{\text{вын}} C_{N_2}^{(1)}; \quad (8)$$

$$V \frac{dC_{г.г}}{d\tau} = (q_2 + q_m^{суф} - q_{\text{вын}}) C_{г.г}^{(2)}; \quad (9)$$

$$V \frac{dC_{O_2}}{d\tau} = -q_{\text{вын}} C_{O_2}^{(1)}, \quad (10)$$

где  $C_{N_2}^{(1)}$  – объемная доля азота на момент прекращения его подачи, %;

$C_{г.г}^{(2)}$  – объемная доля горючих газов на момент начала выноса газоздушной смеси, %;

$\tau_2 = \tau_1 + \tau_{\text{выд}}$  – время открытия технологического трубопровода, с;

$C_{O_2}^{(1)}$  – объемная доля кислорода на момент окончания подачи азота, %.

Начальные условия для момента начала удаления газоздушной смеси

$$C_{N_2}^{(0)} = C_{N_2}(\tau_2);$$

$$C_{O_2}^{(0)} = C_{O_2}(\tau_2).$$

Интегрируя уравнения (8) – (10), получаем

$$C_{N_2} = C_{N_2}^{(1)} e^{-\frac{q_{\text{вын}} \cdot C_{N_2}^{(1)}}{V}} (\tau - \tau_1); \quad (11)$$

$$C_{г.г} = \frac{q_2 + q_m^{\text{суф}} - q_{\text{вын}}}{V} (\tau - \tau_1) + C_{г.г}^{(2)}; \quad (12)$$

$$C_{O_2} = C_{O_2}^{(1)} - \frac{q_{\text{вын}}}{V} C_{O_2}^{(1)} (\tau - \tau_1) - C_{O_2}^{(1)} C_{N_2}^{(1)} \left( e^{-\frac{q_{\text{вын}}}{V} (\tau - \tau_1)} - 1 \right). \quad (13)$$

Таким образом, получены выражения (11) – (13) для расчета времени подачи и выноса газообразного азота в тупиковую выработку для её инертизации, подавления горения метанового суфляра и предотвращения возможного взрыва газовой смеси.

### Выводы.

- Рассмотрена технология возведения перемычки в выработке, которая исключает утечки азота и подсосы воздуха.
- Разработана математическая модель газовой смеси процессов, происходящих в тупиковой выработке при заполнении её азотом.
- Определены параметры подачи (время и интенсивность) азота для инертизации атмосферы изолированного участка и предотвращения возможных взрывов газовой смеси.

### Список литературы / References

1. Брюханов, А.М. Формирование взрывоопасной среды в виде слоевых скоплений метана после внезапного выброса угольного массива и газа / А.М. Брюханов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 13. – С. 137 – 144.

Bryukhanov A.M. *Formirovanie vzryvoopasnoi sredy v vide sloevykh skopleniy metana posle vnezapnogo vybrosa ugol'nogo massiva i gaza* [Formation of explosive medium in the form of methane layering accumulations after a sudden outburst of coal massif and gas]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* – Mining informational and analytical bulletin, 2007, no. 13, pp. 137-144. (In Russian).

2. Ермолаев, А.М. Слойные и местные скопления метана в тупиковых подготовительных выработках / А.М. Ермолаев // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2017. – № 4. – С. 33 – 40.

Ermolaev A.M. *Sloevye i mestnye skopleniya metana v tupikovykh podgotovitel'nykh vyrabotkakh* [Methane layering and local accumulations in blind preliminary developments]. *Vestnik NTs VostNII – Bulletin of the Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*, Kemerovo, 2017, no. 4, pp. 33-40. (In Russian).

3. Ермолаев, А.М. Вопросы борьбы со слоевыми и местными скоплениями метана в тупиковых выработках / А.М. Ермолаев // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2018. – № 1. – С. 63 – 68.

Ermolaev A.M. *Voprosy bor'by so sloevymi i mestnymi skopleniyami metana v tupikovykh vyrabotkakh* [Problems of methane layering and local accumulations control in blind preliminary developments]. *Vestnik NTs VostNII – Bulletin of the Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*, Kemerovo, 2018, no. 1, pp. 63-68. (In Russian).

4. Определение параметров суфлярных выделений газа из угольного массива в горные выработки / С.В. Черданцев, Н.В. Черданцев, Ли Хи Ун [и др.] // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2017. – № 1. – С. 26 – 33.

Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V., Li Khi Un [et al]. *Opredelenie parametrov suftyarnykh vydeleniy gaza iz ugol'nogo massiva v gornye vyrabotki* [Determination of parameters of gas blower releases from coal massif into mine workings]. *Vestnik NTs VostNII – Bulletin of the Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*, Kemerovo, 2017, no. 1, pp. 26-33. (In Russian).

5. Голинько, В.И. Аварийно-спасательные работы в шахтах / В.И. Голинько, С.А. Алексеенко, И.Н. Смоланов. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2011. – 480 с.

Golin'ko V.I., Alekseenko S.A., Smolanov I.N. *Avariino-spasatel'nye raboty v shakhtakh* [Emergency-rescue operations in coal mines]. Dnepropetrovsk, Lira LTD Publ., 2011, 480 p. (In Russian).

6. Управление газовым режимом на выемочных участках угольных шахт / Ю.В. Шувалов, В.Н. Бобровников, А.А. Эннс, А.П. Веселов // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 6. – С. 42 – 43.

Shuvalov Yu.V., Bobrovnikov V.N., Enns A.A., Veselov A.P. *Upravlenie gazovym rezhimom na vyemochnykh uchastkakh ugol'nykh shakht* [Gas conditions management in winning areas of coal mines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in industry*, 2000, no. 6, pp. 42-43. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым  
Дата поступления рукописи 29.06.2021

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

*Donetsk City State operation Para-military mine-rescue unit of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters  
283048, Donetsk, 7, pereulok Nikolenko. Phone (+38 062) 343-52-64*

## METHODOLOGY OF CALCULATION OF FEEDING THE GASEOUS NITROGEN INTO AN ISOLATED BLIND MINE WORKING

**Purpose.** Development of the methodology of calculating the feeding of the gaseous nitrogen into the isolated volume of the blind mine working.

**Methods.** Investigations of gas-dynamic processes during filling the isolated volume of the blind mine working with the gaseous nitrogen factoring in its absorption and leaks, methane release and gas blower burning.

**Results.** The mathematical relations have been obtained for calculation of intensity and duration of feeding the gaseous nitrogen into the isolated space of the mine working with allowance for its adsorption by the mine working surface, possible leaks through stoppings and enclosing strata fracturings, release of methane and combustible gases out of a seat of fire.

**Scientific novelty.** The algorithm of calculation of the parameters for feeding the gaseous nitrogen into the isolated volume of the blind mine working has been suggested factoring in the probable gas-exchange processes.

**Practical value.** The relations have been derived that make it possible to determine the parameters of the gaseous nitrogen feeding into the isolated area of the blind mine working.

**Keywords:** *gaseous nitrogen; blind mine working; stopping; adsorption; seat of fire; intensity; feeding duration; isolated volume; blower.*

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.411.33:622.817.47]:001.891.573

*Сергей Евгеньевич Гулько, д-р техн. наук, директор; e-mail: dgsh@dgsh.donetsk.ua*

*Государственное учреждение «ДОНГИПРОШАХТ»*

*283001, Донецк, ул. Артема, 125. Тел. (+38 062) 305-36-11*

*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*

### ВЛИЯНИЕ ДЕГАЗАЦИИ НА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ СБЛИЖЕННЫХ ПЛАСТОВ

**Цель.** Моделирование процессов формирования газовой обстановки в выработанном пространстве выемочного участка при дегазации сближенных пластов.

**Методы.** Комплексный подход, включающий анализ литературных источников по вопросам метановыделения из сближенных пластов в выработанное пространство лав, и теоретические исследования влияния параметров дегазации на каптаж метана.

**Результаты.** Разработана математическая модель фильтрации метана через горный массив с учётом суммарного действия основных источников газовыделения. Выполнено моделирование влияния режимов работы одной дегазационной скважины на распределение давления и газовыделения из горного массива в обрушенную зону выработанного пространства.

**Научная новизна.** Установлены аналитические зависимости, описывающие процессы движения метана через разгруженный породный массив под действием градиентов давления.

**Практическая значимость.** Полученная математическая модель позволяет выполнить оценку распределения давления и газовыделения в выработанное пространство при дегазации сближенных пластов.

**Ключевые слова:** угольная шахта; выемочный участок; дегазация; дегазационная скважина; угольный пласт; сближенные угольные пласты; математическое моделирование; скорость фильтрации; коэффициент проницаемости горных пород.

**Постановка проблемы.** Уменьшение газовыделения в горные выработки выемочного участка осуществляется с помощью дегазации. Выделение метана из сближенных пластов имеет место во всех случаях и зависит от газовой проницаемости пласта и вмещающих пород.

Учитывая, что 90 % метана выделяется из выработанного пространства и 30...70 % газа удаляют дегазацией, любое изменение режима работы дегазации или ее отключение может существенно изменить газовую обстановку выемочного участка, а в отдельных случаях вызвать образование слоевых скоплений метана в горных выработках [1]. В аварийной обстановке необходимо знать не только характер и длительность протекания переходного газодинамического процесса, но и влияние на него режима работы дегазационной системы.

Эффективность дегазации сближенных пластов зависит от горно-геологических, физико-механических свойств вмещающих пород, схемы

расположения дегазационных скважин, расстояния между скважинами и создаваемого в них разрежения [2 – 4].

Поэтому в настоящее время процессы движения метана из сближенных пластов через разгруженный породный массив в выработанное пространство при различных параметрах дегазации до конца не изучены и представляют научный интерес для дальнейших исследований.

**Цель работы** – проведение теоретических исследований движения метановоздушной смеси в выработанном пространстве лав при дегазации сближенных угольных пластов.

**Материалы и результаты исследований.** На шахтах Донбасса и зарубежья наиболее широко и успешно применяют дегазацию сближенных пластов скважинами, пробуренными из вентиляционной выработки с отводом метановоздушной смеси по газопроводу на поверхностные вакуум-насосные станции (рис. 1).

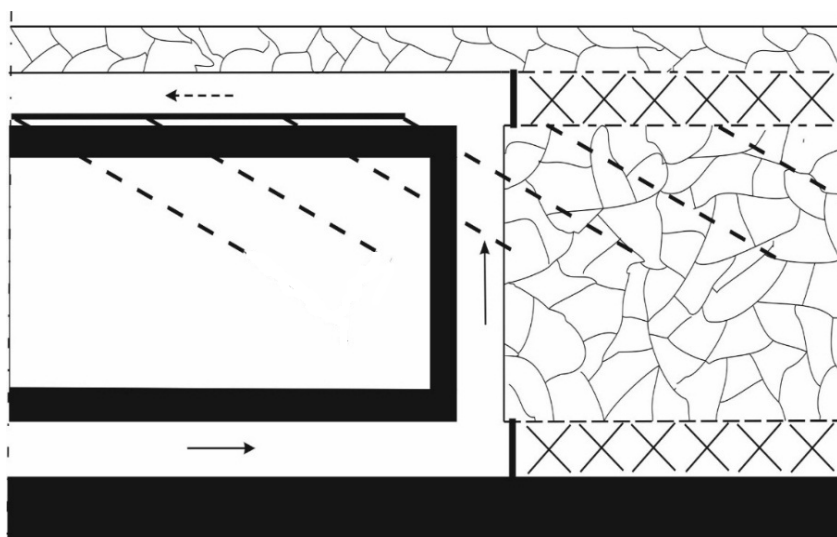


Рис. 1. Дегазация подрабатываемых сближенных угольных пластов (спутников) скважинами, пробуренными из вентиляционной выработки

Данный способ дегазации имеет достаточно высокую эффективность (30...80 %) в зависимости от схемы проветривания и условий поддержания выработок за лавой. При столбовой системе разработки с погашением вентиляционной выработки за лавой минимальная эффективность дегазации составляет 30...40 %. В схемах с поддержанием вентиляционной выработки за лавой эффективность дегазации может достигать 60...80 % [3].

В горном массиве, залегающем над разрабатываемым угольным пластом, образуются три зоны горных пород: беспорядочно обрушенной массы; плавного оседания пород с разрывом их сплошности; зона плавного прогиба как цельная масса.

Во второй зоне сближенные пласты разгружаются от горного давления, и только здесь с помощью дегазации можно достичь наибольшего эффекта уменьшения газовыделения [3, 4]. Вследствие разгрузки проницаемость

сближенных пластов и окружающих пород возрастает во много раз по сравнению с нетронутым массивом. Выделяющийся из каждого сближенного пласта газ через вторую зону проникает в первую – зону беспорядочно обрушенной массы горных пород и утечек воздуха. Кроме того, при наличии дегазации часть газа каптируется по скважинам и трубопроводам на поверхность (рис. 2).

Давление газа в сближенных пластах больше, чем давление в выработанном пространстве, где имеют место утечки воздуха, а в скважинах значительно меньше, чем в зоне утечек воздуха.

Предел разрежения в дегазационных скважинах, после которого увеличение вакуума неэффективно, различен для разных горно-геологических условий и составляет 100...200 мм рт. ст. [5].

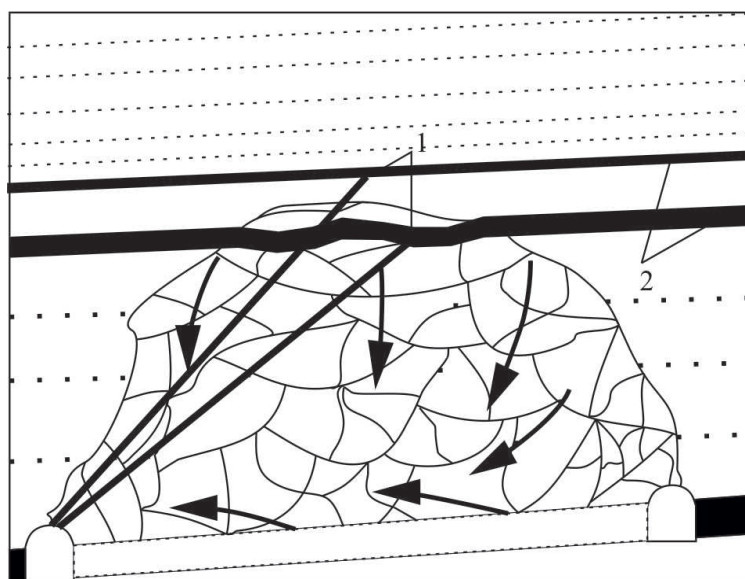


Рис. 2. Схема движения метана через разгруженный породный массив в выработанное пространство:

1 – дегазационные скважины; 2 – сближенные пласты (спутники)

При описании процессов движения метана через разгруженный породный массив под действием градиентов давления необходимо знать их связь со скоростями метановых потоков. С этой целью используем уравнение неразрывности стационарных потоков в трёх измерениях

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = j, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность метана, кг/м<sup>3</sup>;

$u$  – проекция скорости фильтрации газа на ось  $x$ , направленную вдоль простирания разрабатываемого угольного пласта, м/с;

$v$  – проекция скорости фильтрации газа на ось  $y$ , направленную по восстанию угольного пласта, м/с;

$w$  – проекция скорости фильтрации газа на ось  $z$ , направленную по нормали к угольному пласту, м/с;

$j$  – интенсивность внутренних источников газовой выделения из сближенных пластов в единице объема, кг/(с·м<sup>3</sup>).

Считаем, что во второй зоне режим движения газов ламинарный. В этом случае уравнение стационарной фильтрации метана в проекциях на оси координат представим в виде

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\nu}{k_x} \rho u; \quad -\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\nu}{k_y} \rho v; \quad -\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\nu}{k_z} \rho w, \quad (2)$$

где  $P$  – давление метана в обрушенной зоне выработанного пространства лавы, Па;

$\nu$  – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;

$k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты проницаемости второй зоны горных пород в направлениях  $x, y, z$ , м<sup>2</sup>.

Преобразовав уравнения скоростей фильтрации метана через породную толщу (1) и подставляя их в выражение (2) при постоянных коэффициентах проницаемости пород вдоль разных направлений, получим [4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \nu j = 0. \quad (3)$$

При постоянных коэффициентах проницаемости пород вдоль разных направлений уравнение (3) примет вид

$$k_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \nu j = 0. \quad (4)$$

Интенсивность внутренних источников газовой выделения из сближенного пласта представим следующим образом:

$$j(x) = \frac{\rho \frac{\mu}{D}}{(\frac{\mu}{D} - 1)HL} \cdot \frac{q_{снi}}{B} \left[ \exp\left(\frac{-x}{B}\right) - \exp\left(\frac{-\frac{\mu}{D}x}{B}\right) \right] = 0, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность метана, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамическая вязкость метана, кг/(м·с);

$D$  – коэффициент диффузии метана;

$H$  – толщина второй зоны горной породы, м;

$L$  – длина лавы, м;

$q_{CH_4}$  – дебет метана из сближенного пласта, м<sup>3</sup>/с;

$B$  – константа интегрирования.

Подставим выражение (4) в уравнение (5)

$$k_x \frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{k_z}{H^2} (P_0 - P) + \frac{\mu \bar{\delta}}{(\bar{\delta} - 1)HL} \cdot \frac{q_{CH_4}}{B} \left[ \exp\left(\frac{-x}{B}\right) - \exp\left(-\frac{\bar{\delta}}{B}x\right) \right] = 0, \quad (6)$$

где  $\bar{\delta}$  – отношение коэффициента десорбции к коэффициенту диффузии метана.

Принимаем следующие граничные условия для одной скважины:

$$1) \frac{dP(0)}{dx} = 0; \quad 2) P(x) = P; \quad 3) P(\infty) = P_0, \quad (7)$$

где  $P_0$  – начальное давление метана в скважине, Па.

Дополнительно учитывают условия режимов работы скважины, расположенной на расстоянии  $x$  от забоя, создающих разрежение  $P$ . В уравнение можно добавлять любое количество скважин, но пока ограничимся одной скважиной и одним сближенным пластом. В этом случае решение уравнения (6) с граничными условиями (7) будет иметь вид

$$P(x) = P_0 + A_1 \exp\left(\frac{\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}x}{H}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}x}{H}\right) + B \exp\left(\frac{-x}{x_{m1}}\right),$$

где  $A_1, A_2$  – константы интегрирования;

$m$  – номер узла на оси  $x$ .

Моделирование выполнено на одном сближенном пласте и с одной дегазационной скважиной со следующими исходными данными: расстояние от разрабатываемого пласта до сближенного  $x_{m1} = 50$  м; толщина второй зоны горных пород  $H = 10$  м; расстояние от забоя до скважины 30 м; коэффициенты проницаемости горных пород  $k_z = k_x = 1,2 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>; разрежение в дегазационной скважине 12 кПа. Зона влияния дегазационных скважин составляет примерно 80 м.

В результате моделирования распределения давления метана в горном массиве при работающей дегазации установлено, что избыточное давление ( $\Delta P$ ) уменьшается до отрицательных значений (рис. 3). Это указывает на то, что в радиусе работы дегазационных скважин образуются зоны с обратным током газов из выработанного пространства, что влечет за собой дополнительные подсосы воздуха и снижение объемной доли метана при его каптаже.

К тому же наиболее существенное снижение давления наблюдается вблизи скважины в радиусе 10 м. Поскольку интенсивность газовыделения из

сближенного пласта пропорциональна избыточному давлению, то их графики идентичны.

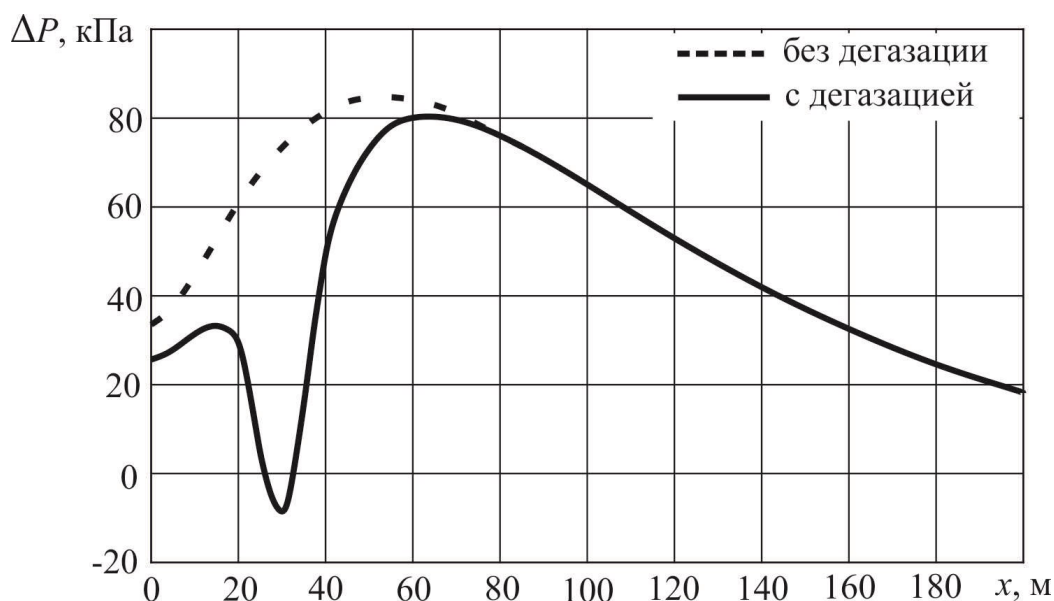


Рис. 3. Распределение давления в горном массиве с низкой проницаемостью горных пород при дегазации и без дегазации

С помощью разработанной математической модели можно исследовать распределение давления метана в обрушенной зоне выработанного пространства лавы и метановыделение при дегазации сближенных пластов. Следует отметить, что количество дегазационных скважин и сближенных пластов не ограничено математической моделью, что дает возможность моделирования процессов газовыделения в выработанное пространство из сближенных пластов для всего выемочного участка.

В соответствии с требованиями безопасности объемная доля метана в дегазационных трубопроводах должна быть не менее 25 %. В отдельных случаях допускается транспортирование метановоздушной смеси с объемной долей метана менее 25 % при условии выполнения мероприятий, обеспечивающих взрывобезопасность. Поэтому необходимо заранее определять подсосы воздуха к скважинам путём расчётов на ЭВМ.

**Выводы.** По результатам математического моделирования процессов формирования газовой обстановки в выработанном пространстве установлено влияние параметров одной дегазационной скважины на метановыделение из сближенного пласта, давление в породном массиве и интенсивность газовыделения при смещении в глубь выработанного пространства.

#### Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Проветривание выемочных участков при отключении систем дегазации / П.С. Пашковский, Н.В. Карнаух, А.В. Мавроди // Научный

вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 1(54). – С. 85 – 93.

Pashkovskiy P.S., Karnaukh N.V., Mavrodi A.V. *Provetrivanie vyemochnykh uchastkov pri otklyuchenii sistem degazatsii* [Ventilation of working areas during shutdown of degassing systems]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 1(54), pp. 85-93. (In Russian).

2. Леконцев, Ю.М. Пути повышения эффективности дегазации угольных пластов / Ю.М. Леконцев, С.Ю. Ушаков, Ю.Б. Мезенцев // Уголь. – 2020. – № 4. – С. 26 – 28.

Lekontsev Yu.M., Ushakov S.Yu., Mezentssev Yu.B. *Puti povysheniya effektivnosti degazatsii ugol'nykh plastov* [Ways to improve the effectiveness of the coal seams degassing]. *Ugol' – Coal*, 2020, no. 4, pp. 26-28. (In Russian).

3. Схемы и способы управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, О.И. Касимов [и др.]. – Макеевка: МакНИИ, 2006. – 78 с.

Zvyagil'skii E.L., Bokii B.V., Kasimov O.I. [et al]. *Skhemy i sposoby upravleniya gazovydeleniem na vyemochnykh uchastkakh ugol'nykh shakht* [Circuits and methods of gas control in working areas of coal mines]. Makeevka, MakNII Publ., 2006, 78 p. (In Russian).

4. Греков, С.П. Десорбция каптируемого метана из сближенных пластов и его диффузия через породные толщи / С.П. Греков, И.Г. Старикова, А.Л. Иванников // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 17 – С. 103 – 108.

Grekov S.P., Starikova I.G., Ivannikov A.L. *Desorbtsiya kaptiruемого metana iz sblyzhennykh plastov i ego diffuziya cherez porodnye tolshhi* [Captured methane desorption from contiguous seams and its diffusion through rock strata]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. tr.* [Physico-engineering problems of mining practice: collection of scientific papers]. Dnepropetrovsk, 2014, issue 17, pp. 103-108. (In Russian).

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

Ushakov K.Z. *Gazovaya dinamika shakht. 2-e izd., pererab. i dop.* [Gas dynamics of coal mines. The 2<sup>nd</sup> rev. and suppl. edition]. MGGU Press, 2004, 481 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым  
Дата поступления рукописи 13.07.2021

**Sergey Yevgenyevich Gulko**, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: dgsh@dgsh.donetsk.ua  
The State Institution "DONHYPROSHAKHT"  
283048, Donetsk, 125, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 305-36-11  
**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

## DEGASSING EFFECT ON METHANE RELEASE OUT OF CONTIGUOUS COAL SEAMS

**Purpose.** Modeling of processes of gas conditions formation in a goaf of a working area during degassing of contiguous coal seams.

**Methods.** A complex approach including the analysis of literature sources on issues of the methane release out of the contiguous coal seams into the goaf of longwall faces, and theoretical investigations of the influence of the degassing parameters on methane removal.

**Results.** The mathematical model of methane filtration through a massif with account for cumulative effect of the methane release main sources has been developed. The modeling of influence of the operation modes of one methane drainage borehole on the pressure and gas release distribution from the massif into the stowed goaf has been fulfilled.

**Scientific novelty.** Analytical dependences describing the processes of methane motion through the dumped rock massif under the influence of pressure gradients have been established.

**Practical value.** The created mathematical model allows conducting the evaluation of pressure and gas release distribution into the goaf during degassing of the contiguous coal seams.

**Keywords:** coal mine; working area; degassing; methane drainage borehole; coal seam; contiguous coal seams; mathematical modeling; filtration rate; rock permeability coefficient.

**УДК 622.822.7:614.844.2"Завеса"**

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-01, 332-78-39*

## **ПАРАМЕТРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ**

**Цель.** Разработка метода расчета параметров локализации подземных пожаров распыленной водой.

**Методы.** Исследование процесса испарения капель воды в потоке пожарных газов в горной выработке.

**Результаты.** Получены зависимости для расчета необходимой доли влаги, приходящейся на 1 кг сухого газа, максимального удельного массового расхода воды, подаваемой в завесу, времени испарения капли и коэффициента теплопроводности смеси пожарных газов и нагретого водяного пара.

**Научная новизна.** Предложен метод расчета параметров испарения капли, времени испарения и дальности уноса испаряющейся капли вентиляционным потоком.

**Практическая значимость.** Полученные зависимости позволяют определять параметры локализации пожаров на аварийном участке горной выработки.

**Ключевые слова:** локализация; водяная завеса; диаметр капли воды; испарение; парообразование; температура пожарных газов; энтальпия.

**Постановка проблемы.** Комбинированный метод борьбы с подземными пожарами – один из основных. Он включает локализацию на аварийном участке горной выработки и активное тушение со стороны свежей струи воздуха. Горноспасательные подразделения применяют для этих целей устаревшие винтовые водяные распылители ВВР-1 и установки УЛТП-2 с низкой эффективностью тушения пожара. Одна из причин этого – отсутствие научно обоснованной методики расчета параметров водяной завесы. Так, нормативы расхода для образования завес, применяемые горноспасателями, не учитывают, что часть воды не участвует в локализации, а оседает на поверхности выработки. Разработка научно обоснованной методики расчета параметров водяной завесы, создание устройств, обеспечивающих эти параметры, позволят повысить эффективность локализации.

**Анализ последних публикаций.** В работах [1, 2] выполнены теоретические исследования процесса распыления жидкости центробежно-струйными распылителями и рационального расположения этих распылителей при локализации пожара в горной выработке. В работах [3, 4] дан анализ методов расчета распыления воды из оросителя. Однако экспериментальное подтверждение результатов проведенных исследований отсутствует. В работе [5] описаны экспериментальные исследования процесса испарения распыленной воды при её движении через пламя, однако условия их проведения отличаются от реальных условий локализации подземных пожаров.

**Цель исследования.** Разработать метод расчета параметров локализации подземных пожаров распыленной водой.

**Изложение основного материала.** Охлаждение пожарных газов в водяной завесе происходит в процессе нагревания капель воды и их испарения, при этом энергия, отбираемая при испарении, превосходит энергию, затрачиваемую на нагревание капли, примерно в семь раз. По этой причине именно процесс испарения капель воды в завесе обуславливает требуемые параметры локализации. При взаимодействии водяной завесы с поступающим в нее нагретым в зоне пожара газовым потоком возможно испарение капель воды и поглощение (конденсация) водяного пара на поверхности неиспарившихся капель воды из водяной завесы. Направление этого процесса зависит от соотношения между парциальным давлением пара  $P_{\text{п}}$ , Па, в пространстве водяной завесы и парциальным давлением пара  $P_{\text{к}}$ , Па, у поверхности капель. При  $P_{\text{к}} > P_{\text{п}}$  происходит испарение капель, при  $P_{\text{к}} < P_{\text{п}}$  имеет место процесс конденсации пара. При  $P_{\text{к}} = P_{\text{п}}$  испарение и конденсация находятся в равновесии, то есть в единицу времени в единице объема завесы испаряется воды столько же, сколько и конденсируется пара.

Барометрическое давление газового потока  $P_{\text{б}}$ , Па, в зоне водяной завесы равно сумме парциальных давлений сухого газа  $P_{\text{с}}$ , Па, и водяного пара  $P_{\text{п}}$ , Па,

$$P_{\text{б}} = P_{\text{с}} + P_{\text{п}}.$$

Состояние влажного газового потока определяют по формуле [7]

$$P_{\text{б}} V = m_{\text{б}} R_{\text{б}} T_{\text{с}},$$

где  $V$  – объем парогазовой смеси, м<sup>3</sup>;

$m_{\text{б}}$  – масса влажного газа, кг;

$$m_{\text{б}} = m_{\text{с}} + m_{\text{п}};$$

$m_{\text{с}}$  – масса части сухого газа, кг;

$m_{\text{п}}$  – масса пара, кг;

$T_{\text{с}}$  – абсолютная температура смеси, К;

$R_{\text{б}}$  – газовая постоянная парогазовой смеси, Дж/(кг·К).

$$R_{\text{б}} = \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{б}}} R_{\text{с}} + \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{б}}} R_{\text{п}},$$

где  $R_{\text{с}}$ ,  $R_{\text{п}}$  – газовые постоянные сухого газа и водяного пара соответственно, Дж/(кг·К).

Доля влаги в газовом потоке в водяной завесе  $d$ , то есть доля пара в 1 кг сухого газа, составляет

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с}}} 10^3.$$

В зависимости от значения  $d$  парциальное давление водяного пара [3]

$$P_{\text{п}} = P_{\text{б}} \frac{d}{622 + d},$$

откуда доля влаги  $d$  равна

$$d = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{б}} - P_{\text{п}}}.$$

Максимальное значение  $d$  будем иметь при парциальном давлении пара, равном давлению насыщенного пара  $P_{\text{н}}$ , Па, то есть при  $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$ , тогда доля влаги в газовом потоке составит

$$d_{\text{н}} = 622 \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{б}} - P_{\text{н}}}.$$

Плотность сухого газового потока

$$\rho_{\text{с}} = \frac{m_{\text{с}}}{V} = \frac{P_{\text{с}}}{R_{\text{с}} T_{\text{с}}} = \frac{P_{\text{б}} - P_{\text{п}}}{R_{\text{с}} T_{\text{с}}},$$

где  $V$  – объем, занимаемый сухим газом массой  $m_{\text{с}}$ , м<sup>3</sup>.

Плотность водяного пара  $\rho_{\text{п}}$ , кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V} = \frac{P_{\text{п}}}{R_{\text{п}} T_{\text{с}}}.$$

Плотность влажного газового потока  $\rho_{\text{в}}$ , кг/м<sup>3</sup>, найдем по формуле

$$\rho_{\text{в}} = \rho_{\text{с}} + \rho_{\text{п}} = \frac{P_{\text{б}} - P_{\text{п}}}{R_{\text{с}} T_{\text{с}}} + \frac{P_{\text{п}}}{R_{\text{п}} T_{\text{с}}}.$$

Энтальпия 1 кг газового потока перед водяной завесой

$$I_{\text{с}} = c_{\text{рпг}} t_{\text{гк}},$$

где  $I_{\text{с}}$  – энтальпия газового потока, Дж/кг;

$c_{\text{рпг}}$  – теплоемкость газового потока перед водяной завесой, Дж/(кг·К);

$t_{\text{гк}}$  – температура газового потока перед водяной завесой, К.

В водяной завесе за счет испарения распыленной воды температура газового потока должна быть меньше температуры воспламенения пожарной нагрузки  $t_{\text{к}} < t_{\text{восп}}$ . При этом энтальпия газового потока должна быть уменьшена до значения, соответствующего этой температуре

$$I_{\text{с}} = c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}}). \quad (1)$$

Максимальное уменьшение энтальпии газового потока возможно при подаче в завесу дисперсной воды до достижения максимальной доли влаги  $d_{\text{н}}$ . При

этом энтальпию  $I_{\Pi}$  образовавшихся водяных паров определяют по уравнению

$$I_{\Pi} = 10^{-3} (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}}) d_{\text{н}}, \text{ или } I_{\Pi} = 10^{-3} (2502,7 + 1,84 t_{\text{восп}}) d_{\text{н}}, \quad (2)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг;  $r = 2502,7$  кДж/кг;  
 $c_{\text{рвп}}$  – удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К);  
 $c_{\text{рвп}} = 1,84$  кДж/(кг·К) [6].

Так, энтальпия образовавшегося в зоне завесы водяного пара с его перегревом до температуры  $t_{\text{восп}}$  составит

$$I_{\Pi} = (2502,7 + 1,84 t_{\text{восп}}) \frac{0,622 P_{\text{н}}}{P_{\text{б}} - P_{\text{н}}}.$$

Приравняв выражения (1) и (2), получим

$$c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}}) = 10^{-3} (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}}) d_{\text{н}},$$

откуда следует, что необходимая для охлаждения 1 кг газового потока доля влаги

$$d_{\text{н}} = \frac{10^3 c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}})}{r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}}}. \quad (3)$$

При температуре газового потока  $t_{\text{восп}} = 473$  К удельный объем перегретого водяного пара составит  $V'' = 2,172$  м<sup>3</sup>/кг, тогда его плотность

$$\rho_{\text{вп}} = \frac{1}{2,172} = 0,460 \text{ кг/м}^3,$$

при этой температуре плотность сухого газового потока  $\rho_{\text{гп}} = 0,746$  кг/м<sup>3</sup>.

При  $d_{\text{н}} = 211,45$  парциальное давление водяного пара в завесе будет

$$P_{\text{н}} = P_{\text{б}} \frac{d_{\text{н}}}{622 + d_{\text{н}}} = 25370 \text{ Па} = 0,0254 \text{ МПа}.$$

В работе [1] отмечено, что часть капель воды в завесе попадает на стенки и почву выработки, не подвергаясь испарению. Установлено, что доля испарившейся в завесе воды в зависимости от диаметра капли выражается формулой

$$\chi = e^{-\frac{a \delta^2}{t_{\text{гк}}}},$$

где  $\chi$  – доля испарившейся воды в завесе,  $\chi < 1$ ;

$\delta$  – средний диаметр капли воды в завесе, мм;

$t_{\text{гк}}$  – температура газового потока перед завесой, °С;

$a$  – эмпирический коэффициент;  $a = 7695$  °С/мм<sup>2</sup>.

Тогда с учетом выражения (3) для снижения температуры газового потока до безопасного значения необходимая доля влаги в газовом потоке составит

$$d_{\text{нх}} = \frac{10^3 c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}})}{\chi (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}})}; d_{\text{нх}} < d_{\text{н}}.$$

При скорости вентиляционной струи в выработке  $W$ , площади поперечного сечения выработки  $S$  и плотности газового потока  $\rho_{\text{гп}}$  его удельный массовый расход определяют по формуле

$$M_{\text{г}} = WS\rho_{\text{гп}},$$

где  $M_{\text{г}}$  – удельный массовый расход газового потока, кг/с;

$W$  – скорость вентиляционной струи, м/с;

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

$\rho_{\text{гп}}$  – плотность газового потока, кг/м<sup>3</sup>.

Для охлаждения газового потока с расходом  $M_{\text{гп}}$  потребуется ввести в водяную завесу распыленную воду с удельным массовым расходом

$$M_{\text{в}} = \frac{10^{-3} M_{\text{г}} d_{\text{нх}}}{\chi} = \frac{WS\rho_{\text{гп}} c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}})}{\chi (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}})}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{в}}$  – удельный массовый расход распыленной воды, подаваемой в завесу, кг/с.

Разделив члены уравнения (4) на значение удельного объемного расхода газового потока, равное  $WS$ , м<sup>3</sup>/с, получим удельный массовый расход распыленной воды на 1 м<sup>3</sup>/с газового потока

$$M_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{гп}} c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}})}{\chi (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}})}, \quad (5)$$

где  $M_{\text{в}}$  – удельный расход распыленной воды, кг/с.

Разделив члены уравнения (5) на значение плотности воды  $\rho_{\text{ж}}$ , кг/м<sup>3</sup>, и умножив на 3600, получим удельный расход воды  $M_{\text{вво}}$ , м<sup>3</sup>/ч, на охлаждение 1 м<sup>3</sup>/с газового потока

$$M_{\text{вво}} = \frac{3600 c_{\text{рпг}} (t_{\text{гк}} - t_{\text{восп}})}{\rho_{\text{ж}} \chi (r + c_{\text{рвп}} t_{\text{восп}})}. \quad (6)$$

При  $c_{\text{рпг}} = 1,009$  кДж/(кг·К);  $t_{\text{гк}} = 1073$  К;  $t_{\text{восп}} = 473$  К;  $\rho_{\text{ж}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\chi = 0,42$  (при  $\delta_0 = 0,3$  мм);  $r = 2502,7$  кДж/кг;  $c_{\text{рвп}} = 1,84$  кДж/(кг·К) по выражению (6) рассчитываем удельный расход воды:  $M_{\text{вво}} = 1,81$  м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>3</sup>/с газового потока.

Зависимость (6) определяет максимальный удельный массовый расход подаваемой в завесу распыленной воды, которая снижает температуру до безопасного значения  $t_k \leq t_{\text{восп}}$ . Однако остается невыясненным вопрос о влиянии на процесс испарения воды степени ее диспергирования, а также физических параметров воды и ее пара, от чего зависит длина водяной завесы в горной выработке, то есть расстояние от точки (сечения) подачи в нагретый газовый поток распыленной воды до точки (сечения), где распыленная вода полностью испаряется, охлаждая нагретый газ.

Согласно работе [2] диаметр капли воды в завесе в процессе испарения уменьшается по закону Срезневского

$$\delta^2 = \delta_0^2 - 2k\tau, \quad (7)$$

где  $\delta$  – текущее значение диаметра капли, мм;

$\delta_0$  – начальный диаметр капли, мм;

$\tau$  – время испарения капли и уменьшения ее диаметра от  $\delta_0$  до  $\delta$ , с;

$k$  – коэффициент испарения, мм<sup>2</sup>/с.

При полном испарении капли  $\delta^2 = 0$ , тогда согласно выражению (7) время полного испарения

$$\tau_n = \frac{\delta_0^2}{2k}. \quad (8)$$

Коэффициент испарения

$$k = \frac{2Nu}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\lambda_{\text{г}}}{c_{\text{рвп}}} \ln \frac{r/c_{\text{рвп}} + (t_{\text{гк}} - t_{\text{кип}})}{r/c_{\text{рвп}}}, \quad (9)$$

где  $Nu$  – тепловой критерий Нуссельта, здесь  $Nu \approx 2$  [2];

$\lambda_{\text{г}}$  – коэффициент теплопроводности газового потока с паром, Вт/(м·К);

$c_{\text{рвп}}$  – удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К);

$t_{\text{кип}}$  – температура кипения воды при нормальном давлении, К.

Поскольку температура газового потока по длине завесы вследствие затрат теплоты на испарение и перегрев пара уменьшается от  $t_{\text{гк}}$  до  $t_{\text{восп}}$ , в формулу (9) вместо  $t_{\text{гк}}$  подставим ее среднее арифметическое значение  $(t_{\text{гк}} + t_{\text{восп}})/2$ , тогда согласно (8) и (9) будем иметь

$$\tau_n = \frac{\delta_0^2 \rho_{\text{ж}} c_{\text{рвп}}}{2Nu \lambda_{\text{г}} \ln \frac{(r/c_{\text{рвп}} + (t_{\text{гк}} + t_{\text{восп}})/2 - t_{\text{кип}})}{r/c_{\text{рвп}}}}. \quad (10)$$

Значения параметров  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $c_{\text{рвп}}$ ,  $r$ ,  $t_{\text{кип}}$ ,  $Nu$  в процессе уменьшения температуры газового потока изменяются незначительно, поэтому при вычислении времени испарения  $\tau_n$  можно принять их постоянными, при

этом время  $\tau_{\text{и}}$  будет определяться в основном значениями начального диаметра капли  $\delta_0$  и температурой газового потока на входе в завесу  $t_{\text{ГК}}$ . При  $t_{\text{восп}} = 473 \text{ К}$  и  $t_{\text{кип}} = 373 \text{ К}$   $\frac{t_{\text{восп}}}{2} - t_{\text{кип}} = 0$ , тогда по формуле (10) вычислим время испарения

$$\tau_{\text{и}} = \frac{\delta_0^2 \rho_{\text{ж}} c_{\text{рвп}}}{2 \text{Nu} \lambda_{\text{Г}} \ln \frac{(r/c_{\text{рвп}} + t_{\text{ГК}}/2) c_{\text{рвп}}}{r}}.$$

Здесь  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_{\text{рвп}} = 1,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;  $r = 2502,7 \text{ кДж/кг}$ ;  $\text{Nu} = 2$ .

Температуру газового потока  $t_{\text{ГК}}$  для горных выработок принимаем согласно НАПБ Б.01.009-2004 «Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Украины»:

- с деревянной крепью – не более 1273 К;
- в том числе оборудованных ленточными конвейерами и имеющих негорючую арочную крепь и деревянную затяжку – не более 1073 К;
- оборудованных ленточными конвейерами и имеющих негорючую крепь – не более 873 К;
- с негорючей крепью – не более 673 К.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{Г}}$  существенно зависит от окружающей среды. Для капли воды, испаряющейся в завесе под действием теплоты, отбираемой от пожарных газов, окружающей ее средой будет смесь нагретого воздуха с водяным паром. Поэтому при расчете коэффициента теплопроводности для теплоты, поступающей к капле, принимаем среднее значение коэффициентов для воздуха и пара. Для воздуха при температуре 673...1273 К  $\lambda_{\text{в}} = 0,063 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , а для водяного пара  $\lambda_{\text{п}} = 0,094 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , для их смеси [6]

$$\lambda_{\text{см}} = \frac{\lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{п}}}{2} = 0,078 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Время испарения капель воды в завесе  $\tau_{\text{и}}$ , с, при указанных выше условиях в зависимости от диаметра  $\delta_0$  капель и температуры  $t_{\text{ГК}}$  приведено в таблице.

Время испарения капель воды в завесе

| Температура на входе в завесу $t_{\text{ГК}}$ , К | Средний диаметр капли воды в завесе $\delta_0$ , мм |       |       |       |       |        |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                                   | 0,1                                                 | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6    |
| 1273                                              | 0,116                                               | 0,464 | 1,044 | 1,856 | 2,900 | 4,176  |
| 1073                                              | 0,128                                               | 0,512 | 1,152 | 2,048 | 3,200 | 4,608  |
| 873                                               | 0,189                                               | 1,756 | 1,708 | 3,024 | 4,725 | 6,804  |
| 673                                               | 0,297                                               | 1,118 | 2,673 | 4,752 | 7,425 | 10,692 |

Из анализа результатов таблицы следует, что после впрыскивания

распыленной воды в начале водяной завесы процесс испарения длится в течение определенного времени  $\tau_n$ , за которое вентиляционный поток уносит испаряющуюся каплю на расстояние

$$L = W\tau_n,$$

где  $L$  – длина завесы, на которой длится процесс полного испарения капли в зависимости от диаметра капли  $\delta_0$  и температуры пожарных газов на входе в завесу  $t_{гк}$ , м.

При длине завесы  $L$  пожарные газы охлаждаются до безопасной температуры. При образовании водяной завесы путем эшелонирования участка двумя или более установками, размещенными вдоль выработки на расстоянии  $\ell_0$  друг от друга, длина водяной завесы будет выражена формулой

$$L_{вз} = (n-1)\ell_0 + L = (n-1)\ell_0 + W\tau_n,$$

где  $L_{вз}$  – общая длина водяной завесы, м;

$n$  – количество эшелонов, образующих водяную завесу;

$\ell_0$  – длина между отдельными эшелонами, м.

Поскольку согласно формуле (8) время испарения капель воды прямо пропорционально квадрату начального диаметра капли, целесообразно для создания водяных завес использовать оросители, образующие капли воды диаметром  $\delta \leq 0,3$  мм, при минимальном давлении на входе устройства, создающего завесу.

Нормировать расход воды на завесу по приведенным зависимостям необходимо еще и потому, что подача избыточной распыленной воды в завесу с долей влаги  $d > d_n$  приводит к конденсации уже имеющегося пара и выделению теплоты, затраченной на испарение. Это связано с повышением температуры газового потока, что нежелательно.

Таким образом, определение параметров водяной завесы по указанным зависимостям обеспечивает более экономный расход воды и ограничивает конденсацию водяного пара в завесе и связанное с ней повышение температуры воздуха в выработке, что приводит к гарантированному снижению температуры газового потока до безопасного в пожарном отношении значения  $t_{гк} \leq t_{восп}$ .

**Выводы.** Исследован процесс испарения капли воды под влиянием теплоты газового потока, поступающего из зоны пожара. Рассчитан удельный расход воды, необходимый для снижения температуры пожарных газов до безопасной величины. Установлено время полного испарения капли, учитывающее теплопроводность среды, окружающей испаряющуюся каплю. Определены размеры завесы, обеспечивающей снижение температуры газового потока до безопасного значения.

## Список литературы / References

1. Ющенко, Ю.Н. Рациональное расположение распыливающих устройств при локализации пожара в горной выработке / Ю.Н. Ющенко, А.Ю. Коляда, Н.В. Бондаренко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 115 – 121.

Yushhenko Yu.N., Kolyada A.Yu., Bondarenko N.V. *Ratsional'noe raspolozhenie raspylivayushhikh ustroystv pri lokalizatsii pozhara v gornoi vyrabotke* [Rational location of spraying units during fire containment in a mine working]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr.* [Mine-rescue work: collected scientific papers]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 115-121. (In Russian).

2. Коляда, А.Ю. Экспериментальное определение параметров локализации подземных пожаров водяными завесами / А.Ю. Коляда // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 2(53). – С. 33 – 43.

Kolyada A.Yu. *Eksperimental'noe opredelenie parametrov lokalizatsii podzemnykh pozharov vodyanyimi zavesami* [Experimental determination of parameters of underground fires containment with water curtains]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 2(53), pp. 33-43. (In Russian).

3. Гурьев, Ю.В. Анализ методов компьютерного моделирования процесса распыления из оросителя тонкораспыленной воды / Ю.В. Гурьев, И.В. Ткаченко, Ю.С. Еремин // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 10. – С. 77 – 80.

Gur'ev Yu.V., Tkachenko I.V., Eryomin Yu.S. *Analiz metodov komp'yuternogo modelirovaniya protsessa raspyleniya iz orositelya tonkoraspylyonnoi vody* [Analysis of methods of computer simulation of a process of fine-sprayed water atomization out of a sprinkler]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 10, pp. 77-80. (In Russian).

4. Гурьев, Ю.В. Использование методов численного моделирования в проектировании оросителей автоматических установок пожаротушения тонкораспыленной водой / Ю.В. Гурьев, И.В. Ткаченко, Ю.С. Еремин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 78 – 84.

Gur'ev Yu.V., Tkachenko I.V., Eryomin Yu.S. *Ispol'zovanie metodov chislennogo modelirovaniya v proektirovanii orositelei avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Application of numerical simulation methods in designing the sprinklers of the automatic fine-sprayed water fire-extinguishing installations]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 78-84. (In Russian).

5. Волков, Р.С. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при ее движении через пламя / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 10. – С. 15 – 20.

Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Eksperimental'noe issledovanie polnoty ispareniya raspylyonnoi vody pri eyo dvizhenii cherez plamya* [Experimental

investigation of extent of dispersed water evaporation during its movement through flame]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 10, pp. 15-20. (In Russian).

6. Александров, А.А. Таблица теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров. – М.: МЭИ, 1999. – 168 с.

Aleksandrov A.A. *Tablitsa teplofizicheskikh svoistv vody i vodyanogo para: spravochnik* [Table of water and water vapor thermophysical properties: reference book]. Moscow, MEI Press, 1999, 168 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым  
Дата поступления рукописи 06.07.2021

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

*Andrey Yuryevich Kolyada*, head of department; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@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) 332-78-41*

## PARAMETERS OF FINE-SPRAYED WATER CONTAINMENT OF UNDERGROUND FIRES

**Purpose.** Development of a method of calculating the parameters for fine-sprayed water containment of the underground fires.

**Methods.** Investigation of a process of water drops evaporation in fire plumes in a mine working.

**Results.** The dependences have been obtained for calculating the required moisture fraction per 1 kg of dry gas, the maximum specific mass flow rate of water fed into a curtain, the period of water drop evaporation and the thermal conductivity coefficient of the mixture fire plumes and heated water vapor.

**Scientific novelty.** The method has been proposed for calculating the parameters of water drop evaporation, the evaporation period and the range of evaporating drop entrainment by the ventilation flow.

**Practical value.** The obtained dependences allow determining the parameters for containment of the fires in the accident area of the mine working.

**Keywords:** *containment; water curtain; water drop diameter; evaporation; vapor generation; fire gases temperature; enthalpy.*

**УДК 614.8"363"**

*Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;*  
*Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: mykhinpe@yandex.ru;*  
*Людмила Михайловна Попова, вед. инж.; e-mail: mila\_popova2021@inbox.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*  
*Анна Александровна Омелаева, преп.; e-mail: annu3101@bk.ru*  
*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования*  
*«Академия гражданской защиты» МЧС ДНР*  
*283015, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел.: +(38 062) 303-27-02*

## **АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

**Цель.** Определить эффективность функционирующей в настоящее время системы анализа опасностей и оценки рисков чрезвычайных ситуаций на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях.

**Методы.** Проведены анализ статистических данных по аварийности, травматизму и профессиональным заболеваниям, информационно-аналитические исследования методов анализа опасностей и оценки рисков чрезвычайных ситуаций.

**Результаты.** Исследованы и проанализированы существующие подходы и методы обеспечения промышленной безопасности в угольной отрасли, определены существующие проблемы ее научно-методического сопровождения, предложены пути решения этих проблем.

**Научная новизна.** Впервые обоснована необходимость корректировки действующего нормативно-правового обеспечения безопасности в угольной промышленности, а также расширения исследований в области оценки организационных рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и повышения уровня их научного сопровождения.

**Практическая значимость.** По результатам проведенных исследований даны предложения по дальнейшему совершенствованию нормативно-методического обеспечения промышленной безопасности на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях Донецкой Народной Республики.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация; угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия; анализ опасностей; оценка рисков; нарушение требований охраны труда; промышленная безопасность.

**Постановка проблемы.** Угольная отрасль – неотъемлемая часть обеспечения эффективной работы других отраслей промышленности Донецкой Народной Республики (далее – ДНР): электроэнергетики, металлургии, коммунально-бытового хозяйства и др.

В соответствии с Законом ДНР «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» угольные шахты и предприятия по обогащению угля отнесены к объектам, к которым предъявлены требования о необходимости оценки риска аварий и анализа эффективности разработанных профилактических мероприятий.

Для успешного функционирования угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий необходимо анализировать и оценивать состояние промышленной безопасности на них, формировать политику и стратегию в области промышленной безопасности, определять цели и задачи обеспечения безопасных и здоровых условий труда, разрабатывать и реализовывать способы достижения максимально возможного уровня безопасности в существующих экономических и социальных условиях.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ нормативно-методических документов позволяет определить принципиальную стратегическую задачу – разработку общих теоретических подходов в области исследования опасностей и оценки рисков чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) в промышленности с целью их использования руководителями предприятий. С их помощью представляется возможным решить проблемы классификации рисков и их оценки на основе рекомендуемых критериев и показателей.

В настоящее время во многих странах разработан ряд документов (например, Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах»), в которых установлены методические принципы, приведены основные термины и понятия, изложены общие требования к процедуре и оформлению результатов, предложены методы анализа опасностей и оценки рисков ЧС в угольной отрасли.

В процессе анализа опасностей и оценки рисков возникновения ЧС в подсистеме «Ч» в нормативных документах РФ (например, ГОСТ Р МЭК 62508-2014 «Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора») для оценки влияния действий персонала на работу системы в целом рекомендуется использовать метод анализа влияния человеческого фактора (HRA – Human Reliability Assessment).

При анализе опасностей и оценке рисков возникновения ЧС в подсистеме «Т» наибольшее распространение для их практического использования получили методы анализа видов и последствий отказов (ГОСТ Р 51901.12-2007 «Менеджмент риска. Анализ видов и последствий отказов» – FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)) и анализа дерева событий (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» – ETA (Event Tree Analysis)).

В случае необходимости исследования вероятности возникновения ЧС в подсистеме «С» для анализа опасностей и оценки рисков возможно применение методов анализа дерева событий (ETA (Event Tree Analysis)) и анализа уровней защиты (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» – LOPA (Layer of Protection Analysis)).

**Материалы и результаты исследований.** В процессе научных исследований был осуществлен сбор сведений по аварийности, травматизму

и профзаболеваниям в угольной отрасли за последние 5 лет, определены потенциальные источники опасностей и возможные причины возникновения ЧС. Основные источники информации, которые использовали при проведении исследований, – техническая документация и данные по аварийности, травматизму и профзаболеваниям на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях, сведения Гортехнадзора ДНР об уровне промышленной безопасности на объектах угольной отрасли, литературные источники, практики эксплуатации зарубежных предприятий угольной отрасли.

Проведенный авторами анализ причин аварийности и производственного травматизма на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях показал, что более 70 % ЧС обусловлено организационными причинами и менее 30 % – техническими, из которых около 80 % происходит в результате того, что человек принимает ошибочные решения из-за недостатка информации, либо из-за ее неадекватного анализа и оценки, либо вследствие неправильных действий персонала (рис. 1).

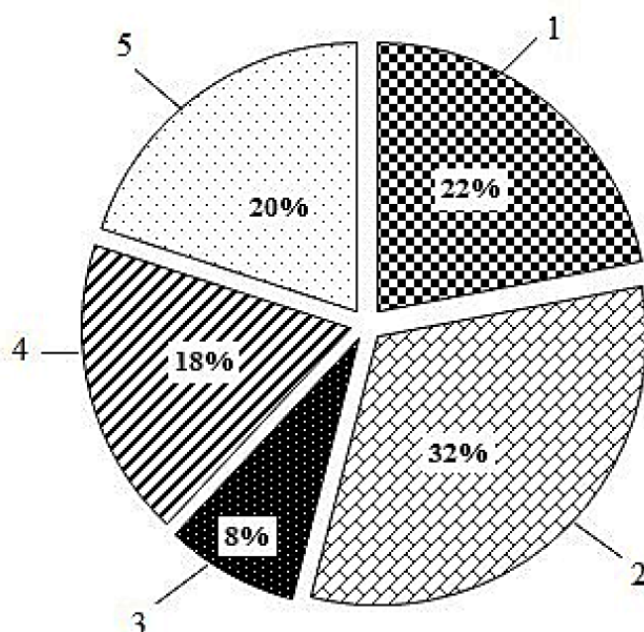


Рис. 1. Основные причины ЧС на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях ДНР:

- 1 – нарушения технологии выполнения работ; 2 – организационные ошибки;  
3 – неэффективность производственного контроля; 4 – нарушения производственной дисциплины; 5 – низкий уровень знаний и профессиональной подготовки

По мнению авторов, угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия представляют собой сложные биосоциотехнические системы, каждая из которых состоит из трех взаимодействующих между собой подсистем: производственного персонала («Ч»), технических устройств и объектов («Т»), окружающей (рабочей) среды («С») [1, 2].

Риск  $R$  для  $n$ -го числа возможных ЧС определяется вероятностью возникновения ЧС ( $P$ ) и возможным ущербом ( $U$ ) [3, 4]

$$R = \sum_{i=1}^n P_i U_i.$$

Величины вероятности  $P$  и ущерба  $U$  определяются параметрами сложной биосоциотехнической системы, ее состоянием функционирования на текущий момент, а также происходящими в ней природно-технологическими и организационными процессами.

Обобщенная модель риска возникновения ЧС в сложных биосоциотехнических системах  $R_i(t)$  для момента времени  $t$  может быть представлена нижеприведенной системой определяющих уравнений [1].

$$\begin{cases} R_i(t) = F\{P_i(t), U_i(t)\}; \\ P_i(t) = F_P\{P_N(t), P_T(t), P_S(t)\}; \\ U_i(t) = F_U\{U_N(t), U_T(t), U_S(t)\}; \\ R_i(t) = F_R\{R_N(t), R_T(t), R_S(t)\}, \end{cases}$$

где  $P_i(t), U_i(t)$  – суммарные вероятности и ущербы для момента времени  $t$ ;  
 $P_N(t), P_T(t), P_S(t)$  – вероятности возникновения ЧС в момент времени  $t$ , обусловленные человеческим фактором, техническими устройствами и внешней средой соответственно;

$U_N(t), U_T(t), U_S(t)$  – величина ущерба, нанесенного в результате ЧС в момент времени  $t$  персоналу, техническому устройству и внешней среде соответственно.

При оценке риска возникновения ЧС ( $R$ ) на любых опасных производственных объектах, к которым относятся угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия, используют следующую формулу:

$$R = p_f C,$$

где  $p_f$  – вероятность появления потенциально опасных факторов, следствием которых может быть возникновение ЧС;

$C$  – ожидаемый ущерб от воздействия рассматриваемых опасных факторов в случае возникновения ЧС.

Вероятность  $p_f$  – функция от надежности работы технических устройств, эффективности деятельности персонала, природно-технологических условий функционирования предприятий угольной отрасли, влияющих на возможность возникновения ЧС, ее вычисляют с использованием моделей надежности и безопасности

$$p_f = f(H_{\text{ч}}, H_{\text{т}}, H_{\text{с}}),$$

где  $H_{\text{ч}}$  – надежность деятельности персонала;

$H_{\text{т}}$  – надежность технических устройств;

$H_{\text{с}}$  – надежность природно-технологической среды и прогноза ее состояния.

Процесс определения вероятности возникновения факторов риска приведен на рис. 2.

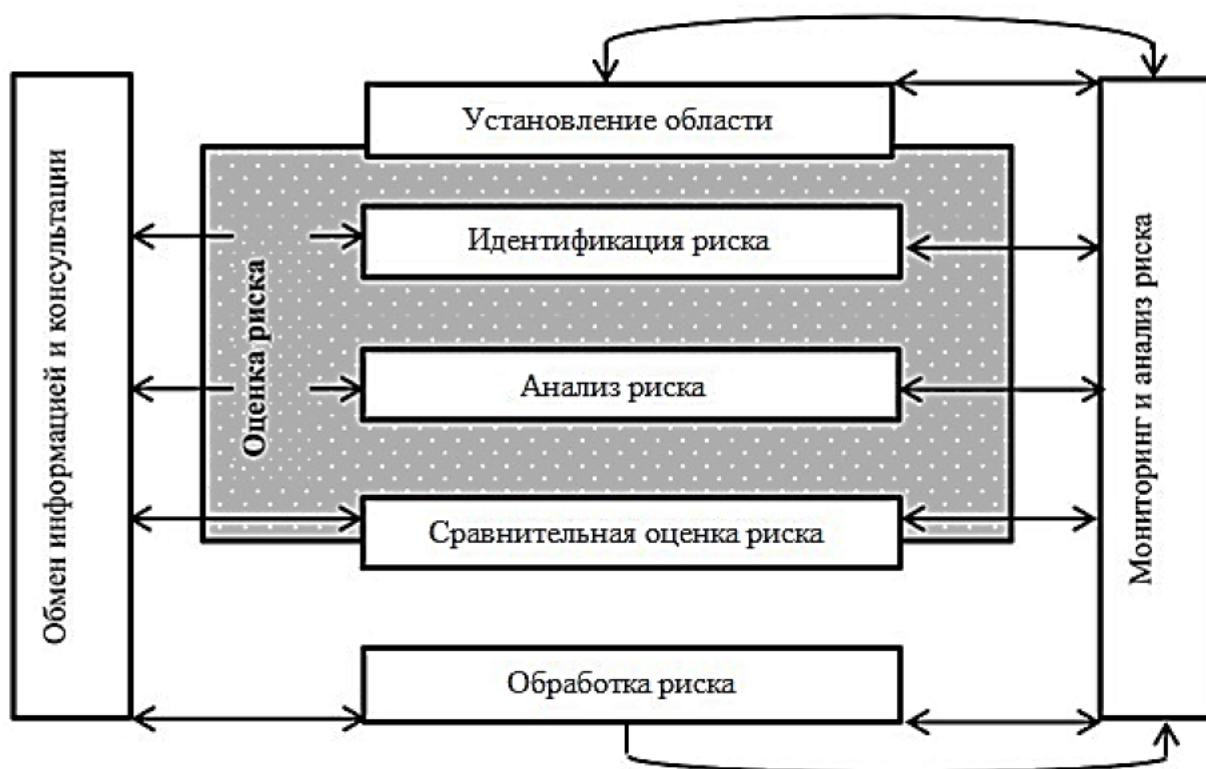


Рис. 2. Оценка риска возникновения ЧС

Обеспечение максимального уровня безопасности на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях в существующих экономических и социальных условиях возможно лишь при условии эффективного использования методов анализа опасностей и оценки рисков для разработки, а также внедрения профилактических мероприятий по недопущению ЧС на объектах угольной отрасли. Повышение уровня безопасности только за счет усилий органов Гортехнадзора и других инспектирующих органов практически себя исчерпало. Это связано с тем, что в действующих нормативных правовых документах преобладают технико-технологические требования к обеспечению промышленной безопасности. Однако анализ выявленных контролирующими органами нарушений функционирования подсистемы «Т» указывает на незначительную их часть (до 15 %) от общего числа нарушений.

В качестве мероприятий по снижению идентифицированных рисков ЧС на предприятиях угольной отрасли рекомендованы:

- замена либо исключение опасных работ (процедур);

- инженерные (технические методы) и административные меры ограничения воздействия опасностей;
- использование средств индивидуальной и коллективной защиты персонала;
- повышение уровня профессиональной подготовки (обучение, практические занятия).

Анализ современной ситуации оценки рисков ЧС в угольной отрасли ДНР позволяет сделать следующие выводы:

- в настоящее время отсутствует система оценки рисков ЧС в рамках законодательства о техническом регулировании;
- обязательность определения ущерба от возможных ЧС закреплена на законодательном уровне, но механизма реализации такого требования в нормативных правовых документах нет;
- не определены показатель уровня приемлемого риска возникновения ЧС и его соотношение с показателем возможного ущерба;
- отсутствуют методические рекомендации по оценке рисков ЧС на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях;
- законодательные, контролирующие и управляющие органы не могут объективно оценить разрабатываемые мероприятия по обеспечению промышленной безопасности в связи с отсутствием действенной системы оценки рисков ЧС на промышленных объектах;
- необходимо создание и внедрение эффективной системы оценки рисков ЧС на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях ДНР.

**Выводы.** На основе проведенного анализа установлено, что в настоящее время отсутствует система анализа опасностей и оценки рисков ЧС на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях. При оценке рисков в проектной и эксплуатационной документации рассматривают, как правило, технические аспекты (то есть подсистемы «Т» и «С») без учета влияния на общую промышленную безопасность персонала (подсистема «Ч»), что не соответствует иерархии причин аварийности и производственного травматизма, в которой преобладают организационные риски.

Детально проанализировав статистические данные по уровню аварийности, травматизму, профессиональным заболеваниям, можно сделать вывод, что большинство ЧС происходит вследствие организационных нарушений требований охраны труда и промышленной безопасности персоналом (личная неосторожность и применение опасных приемов труда) без прямого воздействия природных, технических и технологических факторов.

Существующая научно-методическая база обеспечения промышленной безопасности на опасных производственных объектах угольной отрасли сориентирована на устаревшие подходы, в основе которых предусмотрено применение технико-технологических решений, которые существенно отстают от фактических условий эксплуатации угледобывающих

и углеперерабатывающих предприятий. Поэтому необходима корректировка действующего нормативно-правового обеспечения безопасности в угольной промышленности, а также научной и проектной документации в соответствии с современными условиями функционирования предприятий угольной отрасли. Для решения такой задачи в настоящее время и на перспективу необходимо расширить исследования в области оценки организационных рисков возникновения ЧС и повысить уровень их научного сопровождения.

### Список литературы / References

1. Мамаев, В.В. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах / В.В. Мамаев, А.Ф. Иваненко, П.Е. Мухин // Вестник Академии гражданской защиты: науч. журн. – 2019. – № 3. – С. 124 – 128.

Mamayev V.V., Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye. *Otsenka riskov vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh* [Risk assessment of emergencies occurrence at hazardous industrial objects]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashhity: nauch. zhurn.* [Civil Defence Academy Journal: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 3, pp. 124-128. (In Russian).

2. Иваненко, А.Ф. Влияние человеческого фактора на безопасное функционирование производственных объектов / А.Ф. Иваненко, П.Е. Мухин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2020. – № 4(57). – С. 73 – 79.

Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye. *Vliyanie chelovecheskogo faktora na bezopasnoe funktsionirovanie proizvodstvennykh ob"ektov* [Influence of the human factor on the safe functioning of production facilities]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 4(57), pp. 73-79. (In Russian).

3. Галеев, А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах / А.Д. Галеев, С.И. Поникаров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. – 152 с.

Galeev A.D., Ponikarov S.I. *Analiz riska avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh* [Risk assessment of accidents at hazardous industrial objects]. Kazan, Izd-vo KNITU Press, 2017, 152 p. (In Russian).

4. Гурнович, Т.Г. Оценка и анализ рисков / Т.Г. Гурнович, Е.А. Остапенко, С.А. Молчаненко. – М.: КноРус, 2019. – 252 с.

Gurnovich T.G., Ostapenko E.A., Molchanenko S.A. *Otsenka i analiz riskov* [Risk assessment and analysis]. Moscow, KnoRus Publ., 2019, 252 p. (In Russian).

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

*Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: mykhinpe@yandex.ru;*

*Lyudmila Mikhailovna Popova, advanced engineer; mila\_popova2021@inbox.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, 332-78-49*

*Anna Aleksandrovna Omelaeva, lecturer; e-mail: anny3101@bk.ru*

*The State Educational Institution of Higher Occupational Education*

*"The Civil Defence Academy" of the EMERCOM of DPR*

*283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+38 062) 303-27-02*

## **ANALYSIS OF REGULATORY AND PROCEDURAL BASIS OF RISK ASSESSMENT OF EMERGENCIES OCCURRENCE AT COAL INDUSTRY ENTERPRISES**

**Purpose.** To determine the effectiveness of the currently functioning system for hazard analysis and risk assessment of emergencies at coal-mining and coal processing enterprises.

**Methods.** The analysis of statistical data on accident rate, injury rate and occupational illnesses and the informational and analytical investigations of methods of hazard analysis and risk assessment of emergencies have been fulfilled.

**Results.** The available approaches and methods of ensuring the industrial safety in the coal industry have been researched and analyzed, the current problems with its scientific-methodological support have been defined, the ways to resolve these problems have been proposed.

**Scientific novelty.** For the first time ever there has been provided a rationale for the necessity to revise the current regulatory and legal ensuring of coal industry safety as well as to extend the researches in the field of assessment of the organizational risks of emergencies occurrence and improvement of their scientific support.

**Practical value.** Following the results of the conducted investigations the proposals have been presented for further improvement of the regulatory and procedural provision of the industrial safety at the coal-mining and coal processing enterprises of the Donetsk People's Republic.

**Keywords:** *emergency situation; coal-mining and coal processing enterprises; hazard analysis; risk assessment; violation of labor safety requirements; industrial safety.*

**УДК 622.457.36:622.831.322***Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;**Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: avrstla@mail.ru;**Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander\_agarkov@mail.ru**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

## **ПРОВЕТРИВАНИЕ АВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ ШАХТ ПОСЛЕ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ, ПОРОДЫ И ГАЗА**

**Цель.** Исследование особенностей проветривания аварийных участков угольных шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа для выявления эффективных способов и средств обеспечения безопасности горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ.

**Методы.** Использован аналитический метод исследования.

**Результаты.** Выполнен анализ состояния и особенностей проветривания шахт, опасных по внезапным выбросам, для оценки методов и средств проветривания аварийных участков. Для организации безопасного проветривания и разгазования аварийных участков после внезапных выбросов предложено на компьютерной модели выполнять расчеты необходимого расхода воздуха, определять наличие резервов подачи воздуха на аварийный участок, а также порядок и способы введения резервов в действие.

**Научная новизна.** Научно обоснованы методы оценки и учета параметров выброса при расчетах расхода воздуха с использованием персональных электронных вычислительных машин.

**Практическая значимость.** Рассмотрен в практической плоскости вопрос проветривания аварийных участков шахт и отдельных горных выработок после внезапных выбросов угля, породы и газа для обеспечения безопасности горноспасателей. Результаты исследований будут использованы при разработке рекомендаций по проветриванию аварийных участков после внезапных выбросов угля, породы и газа при ведении горноспасательных работ на шахтах Донецкой Народной Республики.

**Ключевые слова:** угольная шахта; горноспасательная служба; аварийный участок; внезапные выбросы угля, породы и газа; проветривание аварийного участка.

**Постановка проблемы.** Внезапные выбросы угля, породы и газа – одна из самых непредсказуемых и опасных, широко распространенных и сложных причин аварий на шахтах, в результате которых угольная отрасль несет большие убытки и имеют место человеческие жертвы. В основном это обусловлено физическим травмированием людей выброшенной горной массой и нарушением проветривания горных выработок шахты, формированием в них взрывоопасной и непригодной для дыхания среды не только в период выброса, но и после него.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Ведение горноспасательных работ в загазованных горных выработках сопряжено с возможностью взрыва метановоздушной смеси и асфиксии людей.

Ликвидация последствий внезапных выбросов угля, породы и газа, а также смежные вопросы при отработке пластов, опасных по газодинамическим явлениям (далее – ГДЯ), детально рассмотрены в работах [1 – 4]. Однако

вопросы проветривания горных выработок и создания безопасных условий ведения горноспасательных работ после внезапных выбросов мало изучены и практически не отражены в действующих нормативных документах, что обуславливает необходимость проведения исследований в данном направлении.

**Цель статьи** – исследование особенностей проветривания аварийных участков шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа для выявления эффективных способов и средств обеспечения безопасности горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ.

**Материалы и результаты исследований.** Внезапный выброс угля, породы и газа является сложным ГДЯ, протекающим в несколько стадий:

- хрупкое разрушение напряженной призабойной части пласта, вызванное производственными процессами;
- саморазвивающееся разрушение угольного массива с образованием характерной полости;
- вынос разрушенной горной массы в потоке расширяющегося газа;
- постепенное замедление газовыделения из полости выброса и отброшенного угля [3].

Угольные шахтопласты подразделяются на опасные по ГДЯ, угрожаемые и невыбросоопасные. В отдельных случаях выделяют особо выбросоопасные шахтопласты или участки. В Донецкой Народной Республике функционируют 14 шахт, отнесенных к категориям выбросоопасных и особо выбросоопасных.

С 1991 по 2000 г. [2] на шахтах произошло 1512 ГДЯ, из которых 41 внезапный выброс угля и газа, 49 внезапных обрушений горных пород, 65 внезапных выдавливаний (вывалов) горной массы, 187 выбросов угля и газа при дистанционном управлении горными машинами, 895 выбросов угля, породы и газа и 275 выбросов породы, специально вызванных взрывными работами в режиме сотрясательного взрывания. При этом было травмировано 90 человек.

С 2000 по 2018 г. [5] случилось 2068 аварий и аварийных ситуаций (в среднем – 109 аварий и аварийных ситуаций в год), в ликвидации которых принимали участие подразделения горноспасательной службы. Среди них 46 внезапных выбросов угля, породы и газа. Виды аварий представлены на рис. 1 [5].

Внезапные выбросы наблюдались на шахтах им. А.Ф. Засядько, им. А.А. Скочинского, № 22 «Коммунарская», «Комсомолец Донбасса», «Чайкино», «Ждановская», «Холодная Балка», «Щегловская-Глубокая» и др.

Анализ травматизма людей при внезапных выбросах угля, породы и газа показывает, что основные поражающие факторы – масса выброшенного мелкораздробленного угля и отсутствие кислорода в среде горных выработок вследствие выделения большого количества метана и прекращения проветривания аварийного участка.

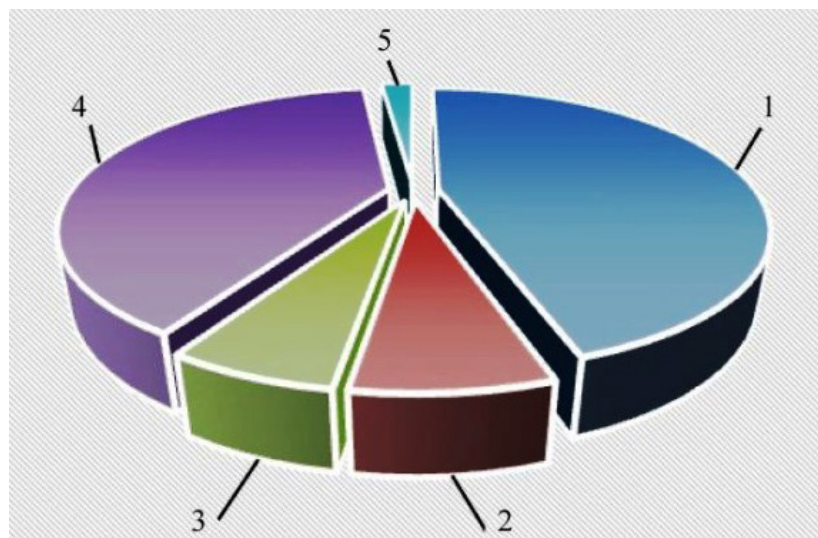


Рис. 1. Распределение подземных аварий по видам:

- 1 – подземные пожары (45 %); 2 – взрывы газа и угольной пыли (7,4 %);  
3 – внезапные выбросы угля и газа (6,3 %); 4 – обрушения горных выработок (39,3 %);  
5 – затопления горных выработок (2 %)

При рассмотрении вопросов проветривания аварийных участков после внезапных выбросов следует учитывать состояние, особенности систем вентиляции шахт, возможные способы и резервы подачи дополнительного количества воздуха для более быстрого удаления метана из аварийного участка и снижения его концентрации. К основным способам и возможным резервам подачи воздуха на аварийные выемочные участки следует относить:

- раскрытие на аварийном участке регуляторов расхода воздуха;
- снижение подачи воздуха на второстепенные объекты;
- использование фактических внутренних резервов воздуха в вентиляционной сети;
- перевод работающего вентилятора главного проветривания (далее – ВГП) в режим увеличения давления;
- использование шахтной пневмосети для подачи дополнительного количества воздуха.

Абсолютная газообильность действующих шахт колеблется от 10,7 м<sup>3</sup>/мин (шахта «Калиновская-Восточная») до 207,3 м<sup>3</sup>/мин (шахта «Комсомолец Донбасса»), относительная – в пределах 26,6...81,2 м<sup>3</sup>/т.

Фактически в выбросоопасные шахты подают от 6929 м<sup>3</sup>/мин (шахта «Калиновская-Восточная») до 37000 м<sup>3</sup>/мин (шахта им. А.Ф. Засядько) свежего воздуха. Коэффициент обеспеченности шахт воздухом колеблется в пределах 1,07...1,52 и в среднем составляет 1,33, то есть на шахтах имеются фактические резервы воздуха, которые могут быть использованы для проветривания и дополнительной подачи воздуха на аварийный участок за счет перераспределения его по выработкам шахты путем изменения параметров регуляторов, установки дополнительных вентиляционных сооружений и др. (см. табл. 1).

На выемочные участки в среднем подается только 11,6 % свежего воздуха, поступающего в шахту. Подача воздуха на второстепенные объекты проветривания составляет в среднем 39,7 % от поступающего в шахту, в связи с чем объекты имеют избыточную обеспеченность воздухом (до 150 %).

Проветривание аварийных участков после внезапных выбросов не всегда нарушается, чаще всего происходит частичное сокращение расхода воздуха на аварийном участке (примерно 30 % на пологом падении пластов и 40 % на крутом падении), в редких случаях (3,5 %) наблюдается практически полное прекращение проветривания [2].

Таблица 1

Основные параметры шахт Донецкой Народной Республики,  
разрабатывающих пласты, опасные по ГДЯ

| Шахта                   | Категория по газу (ОВВ – шахта, опасная по внезапным выбросам) | Газообильность, м³/мин |               | Общая нагрузка (средняя за последний квартал), т/сут | Количество воздуха, поступающего в горные выработки, м³/мин |             |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|---------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------|
|                         |                                                                | абсолютная             | относительная |                                                      | расчетное                                                   | фактическое |
| ГУП ДНР «ДУЭК»          |                                                                |                        |               |                                                      |                                                             |             |
| Им. А.А. Скочинского    | ОВВ                                                            | 19,62                  | 31,71         | 1660                                                 | 12811                                                       | 20340       |
| ПАО ш/у «Донбасс»       |                                                                |                        |               |                                                      |                                                             |             |
| «Щегловская-Глубокая»   | ОВВ                                                            | 79,37                  | 61,39         | 2298                                                 | 14896                                                       | 16253       |
| № 22 «Коммунарская»     | ОВВ                                                            | 51,63                  | 71,55         | 2475                                                 | 10767                                                       | 11671       |
| ГУП ДНР «Макеевуголь»   |                                                                |                        |               |                                                      |                                                             |             |
| «Холодная Балка»        | ОВВ                                                            | 48,42                  | 77,56         | 933                                                  | 7510                                                        | 8798        |
| «Калиновская-Восточная» | ОВВ                                                            | 10,7                   | 26,6          | 621                                                  | 4688                                                        | 6929        |
| Им. С.М. Кирова         | ОВВ                                                            | 24,79                  | 44,8          | 664                                                  | 8742                                                        | 9333        |
| «Ясиновская-Глубокая»   | ОВВ                                                            | 22,0                   | 78,69         | 177                                                  | 7545                                                        | 11446       |
| Им. М.И. Калинина       | ОВВ                                                            | 15,68                  | 37,77         | 278                                                  | 9791                                                        | 12832       |
| Самостоятельные шахты   |                                                                |                        |               |                                                      |                                                             |             |
| «Ждановская»            | ОВВ                                                            | 43,32                  | 61,79         | 5000                                                 | 10289                                                       | 12160       |
| «Комсомолец Донбасса»   | ОВВ                                                            | 207,3                  | 81,2          | 7078                                                 | 24360                                                       | 32190       |
| Им. А.Ф. Засядько       | ОВВ                                                            | 36,9                   | 36,9          | 1000                                                 | 33600                                                       | 37000       |

Среди особенностей выбросоопасных шахт следует отметить высокую газообильность, большие протяженности и сроки службы основных горных выработок, неудовлетворительное состояние значительного объема выработок,

нерациональное распределение воздуха между основными и второстепенными объектами, снижение общего числа очистных забоев, рост притечек и утечек воздуха, увеличение количества схем проветривания участков с последовательным разбавлением вредных газов.

После прекращения выброса и интенсивного выделения метана направление вентиляционной струи, как правило, восстанавливается за счет работы ВГП. На шахтах, разрабатывающих пласты, опасные по ГДЯ, работают мощные ВГП типа ВЦД-47У, ВЦД-47, ВЦ-5, ВЦД-3,3, ВЦД-31,5 и др. (см. табл. 2).

Таблица 2

Характеристика режимов работы ВГП на шахтах,  
разрабатывающих пласты, опасные по ГДЯ

| Шахта, место установки                     | Тип                     |                           | Производительность, м³/мин |              |
|--------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|
|                                            | рабочего<br>вентилятора | резервного<br>вентилятора | фактическая                | максимальная |
| ГУП ДНР «ДУЭК»                             |                         |                           |                            |              |
| Им. А.А. Скочинского,<br>вост. вент. ствол | ВЦД-3,3                 | ВЦД-3,3                   | 6490                       | 15600        |
| зап. вент. ствол                           | ВЦД-47у                 | ВЦД-47у                   | 10290                      | 16200        |
| скиповой ствол                             | ВЦД-31,5                | ВЦД-31,5                  | 12850                      | 17100        |
| ПАО ш/у «Донбасс»                          |                         |                           |                            |              |
| «Щегловская-Глубокая»,<br>скип. ствол      | ВЦД-31,5                | ВЦД-31,5                  | 14220                      | 19200        |
| вент. скважина                             | ВЦ-5                    | ВЦ-5                      | 7000                       | 18300        |
| № 22 «Коммунарская»,<br>люДСКОЙ ходок      | ВОД-30М2                | ВОД-30М2                  | 9350                       | 9950         |
| вспом. накл. ствол                         | ВОД-30М                 | ВОД-30М                   | 4050                       | 4500         |
| ГУП ДНР «Макеевуголь»                      |                         |                           |                            |              |
| «Холодная Балка»,<br>скип. ствол           | ВЦД-31,5                | ВЦД-31,5                  | 9060                       | 14800        |
| южн. скип. ствол                           | ВОД-30М                 | ВОД-30М                   | 8352                       | 8352         |
| «Калиновская-Восточная»,<br>скип. ствол    | ВЦ-31,5М2               | ВЦ-31,5М2                 | 8660                       | 9000         |
| Им. С.М. Кирова,<br>шурф «0»               | ВЦ-31,5М                | ВЦ-31,5М                  | 8160                       | 9600         |
| вент. ствол                                | ВЦД-31,5                | ВЦД-31,5                  | 4200                       | 18300        |
| «Ясиновская-Глубокая»,<br>скип. ствол      | ВЦД-3,3                 | ВЦД-3,3                   | 8200                       | 17100        |
| зап. вент. ствол                           | ВЦ-5                    | ВЦ-5                      | 10074                      | 16000        |
| вост. вент. ствол                          | ВЦО-2,5                 | ВЦО-2,5                   | 5141                       | 6000         |
| Им. М.И. Калинина,<br>вост. вент. ствол    | ВЦД-47у                 | ВЦД-47у                   | 6788                       | 16200        |
| скип. ствол                                | ВЦ-5                    | ВЦ-5                      | 7765                       | 18600        |

| Окончание табл. 2                                                                                                             |                         |                           |                                         |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|--------------|
| Шахта, место установки                                                                                                        | Тип                     |                           | Производительность, м <sup>3</sup> /мин |              |
|                                                                                                                               | рабочего<br>вентилятора | резервного<br>вентилятора | фактическая                             | максимальная |
| Самостоятельные шахты                                                                                                         |                         |                           |                                         |              |
| «Ждановская»,<br>вост. вент. ствол $l_3$<br>вост. вент. ствол $l_7$<br>центр. вент. ствол $l_6$<br>2-й зап. вент. ствол $l_7$ | ВОКР-1,8                | ВОКР-1,8                  | 4326                                    | 4900         |
|                                                                                                                               | ВОКР-1,8                | ВОКР-1,8                  | 3476                                    | 3900         |
|                                                                                                                               | ВОКР-1,8                | ВОКР-1,8                  | 3634                                    | 3900         |
|                                                                                                                               | ВОКР-1,8                | ВОКР-1,8                  | 2691                                    | 3000         |
| «Комсомолец Донбасса»,<br>гл. ствол<br>вент. ствол № 1<br>вент. ствол № 3                                                     | ВЦД-47                  | ВЦД-47                    | 10896                                   | 14904        |
|                                                                                                                               | ВЦД-47                  | ВЦД-47                    | 17970                                   | 21576        |
|                                                                                                                               | ВЦД-47                  | ВЦД-47                    | 11352                                   | 14070        |
| Им. А.Ф. Засядько,<br>зап. вент. ствол<br>вост. вент. ствол № 1<br>вост. вент. ствол № 3                                      | ВЦД-31,5м               | ВЦД-31,5м                 | 10896                                   | 14904        |
|                                                                                                                               | ВЦД-47У                 | ВЦД-47У                   | 17970                                   | 21576        |
|                                                                                                                               | ВЦД-31,5м               | ВЦД-31,5м                 | 11352                                   | 14070        |

При внезапных выбросах угля, породы и газа в первую очередь увеличивается аэродинамическое сопротивление горных выработок аварийного участка за счет выброшенного угля, выделяется дополнительное количество метана, который создает динамический и гравитационный противоположно направленные напоры с возможным опрокидыванием струй в отдельных выработках со свежими струями, выносом метана в соседние выработки и выемочные участки. Также сокращается подача воздуха на аварийный участок, происходит загазование его горных выработок метаном до высоких взрывоопасных концентраций [3].

Выброшенный уголь заполняет выработку своей массой на значительную длину и высоту, что приводит к росту ее аэродинамического сопротивления, уменьшению поступления свежего воздуха на участок, росту концентрации метана в исходящей струе (рис. 2).

Однако даже при полном перекрытии воздухоподающей выработки или очистного забоя часть свежего воздуха с увеличенной концентрацией метана может поступать в очистной забой за счет утечек воздуха через выработанное пространство в призабойной зоне лавы и на протяжении участков штреков. Если в выработке, перекрытой выброшенным углем, остался свободный проход под кровлей не менее 1 м<sup>2</sup>, то расход воздуха на аварийном участке может составлять до 80...90 % от нормального, вследствие чего необходимо увеличить депрессию, развиваемую ВГП.

Расход воздуха на выемочном участке можно определить с помощью компьютерной модели вентиляционной сети, задавая значения аэродинамического сопротивления выработки с выброшенным углем.

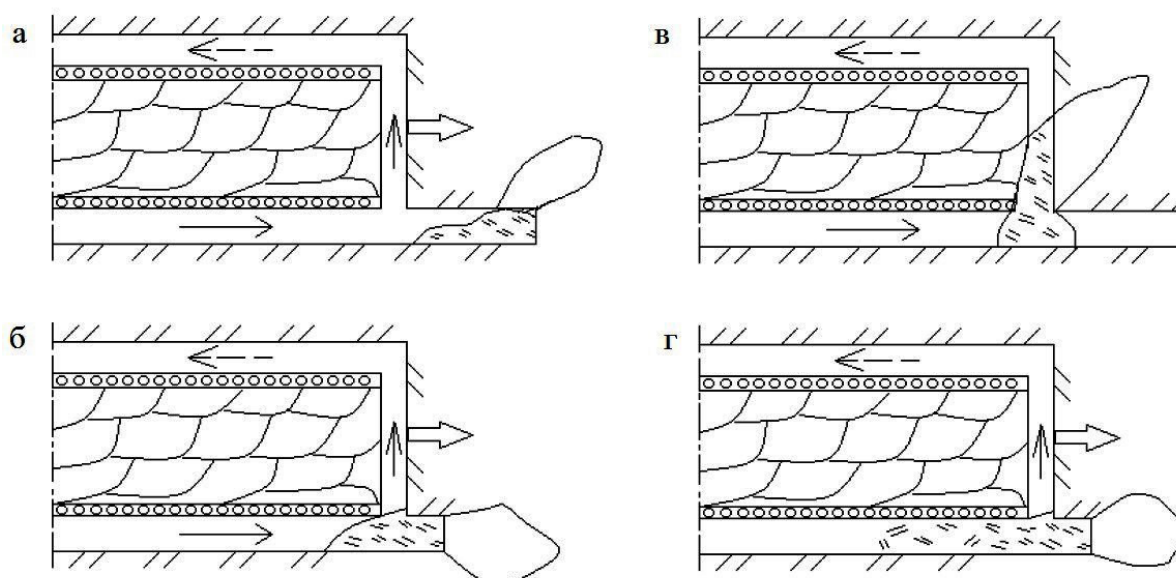


Рис. 2. Примеры заполнения поперечного сечения выработок аварийного участка выброшенным углем:

а – тупик опережения штрека длиной более 6 м; б – тупик опережения штрека длиной менее 6 м (без опережения или в нижней нише); в – очистной забой; г – штрек

Аэродинамическое сопротивление участка выработки с проемом и выброшенным углем или породой  $R_{\Pi}$ , даПа, ориентировочно можно определить по коэффициенту перекрытия выработки по формуле

$$R_{\Pi} = 1,079 K_{\Pi}^6,$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент перекрытия выработки, который рассчитывают по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{S_{\Pi}}{S_{\text{в}}},$$

где  $S_{\Pi}$  – поперечное сечение проема, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{в}}$  – поперечное сечение выработки, м<sup>2</sup>.

Гравитационный напор метана следует определять с учетом разности высот откаточного и вентиляционного горизонтов, содержания метана в вентиляционной струе. Напор направлен от более низкого к более высокому горизонту. Чем больше разность высот горизонтов и чем больше содержание метана в вентиляционной струе, тем больше гравитационный напор. При восходящем проветривании очистных забоев гравитационный напор метана совпадает по направлению с напором ВГП и способствует увеличению поступления воздуха на аварийный участок. При нисходящем проветривании действие гравитационного напора противоположно действию ВГП и уменьшает поступление воздуха на аварийный участок. В зависимости от их соотношения возможны уменьшение поступления воздуха на участок, остановка

вентиляционной струи (при равенстве напоров) и даже ее опрокидывание (при превышении гравитационного напора критической депрессии ВГП, развиваемой на рассматриваемый участок).

Величину гравитационного напора  $H_{гр}$ , Па, в общем случае рекомендуется определять по формуле

$$H_{гр} = 0,0055CH,$$

где  $C$  – объемная доля метана, %;

$H$  – разность отметок откаточной и вентиляционной выработок, м.

Ожидаемое распределение воздуха на аварийном участке в каждом конкретном случае может быть определено моделированием воздухораспределения по выработкам шахты на компьютерной модели вентиляционной сети при включении в рассматриваемую ветвь значения динамического или гравитационного напора с учетом направления его действия, аэродинамического сопротивления завала и других параметров.

Все режимы с изменением расхода воздуха весьма опасны из-за возможных повышенных концентраций метана в отдельных выработках и их неустойчивости, что следует учитывать при ведении горноспасательных работ, уборке выброшенной породной массы и разгазовании выработок аварийного участка.

Снижение расхода воздуха приводит к повышению концентраций метана и неустойчивому проветриванию отдельных горных выработок, что следует учитывать при ведении горноспасательных работ, уборке выброшенной горной массы и разгазовании выработок аварийного участка.

Дополнительно выделившийся при выбросе метан будет под давлением равномерно двигаться во всех направлениях от места выброса согласно закону Паскаля. В шахтной вентиляционной сети движение метана ограничено горными выработками и их расположением [1, 3]. По этой причине в выработках с поступающей на аварийный участок вентиляционной струей выделившийся газ будет препятствовать движению свежего воздуха. В зависимости от количества выделившегося газа движение свежей струи на аварийный участок может сократиться, остановиться или даже опрокинуться. Опрокинутая струя, обогащенная газом от выброса, попадает в параллельные выработки со свежей струей. Содержание метана в опрокинутой струе может в несколько раз превышать допустимую норму.

Анализ результатов моделирования распределения воздуха при выбросах на шести шахтах Донбасса показал, что они имеют общие закономерности нарушения проветривания аварийных участков при выделении дополнительного объема газа, зависящие в основном от интенсивности выброса, сложности вентиляционной сети, сечения, длины и аэродинамических сопротивлений горных выработок аварийного участка на момент выброса. Расход воздуха в выработках с поступающей свежей вентиляционной струей уменьшается, а с исходящей струей – увеличивается.

Значения потерь депрессии в горных выработках  $h_v$ , даПа, определяют по формуле

$$h_v = 0,01 h_y L,$$

где  $h_y$  – депрессия на участке выработки длиной 100 м (удельная депрессия), которую следует определять по графикам (рис. 3) в зависимости от средних значений площади поперечного сечения выработки и скорости движения воздуха в ней, даПа;

$L$  – длина выработки, м.

Для промежуточных сечений горных выработок значения удельной потери депрессии определяют интерполяцией.

Расход воздуха на аварийном участке после выброса определяют с учетом совместного влияния различных факторов: увеличения аэродинамического сопротивления участка за счет выброшенной горной массы, гравитационного напора метана, дополнительного объема его выделения из выброшенного угля, особенностей вентиляционной сети, наличия параллельных выработок и их аэродинамического сопротивления, которые невозможно принять в расчет в математическом выражении или учесть графически из-за параметров внезапных выбросов. Кроме того, при влиянии всех факторов суммарное их влияние не равняется сумме индивидуальных.

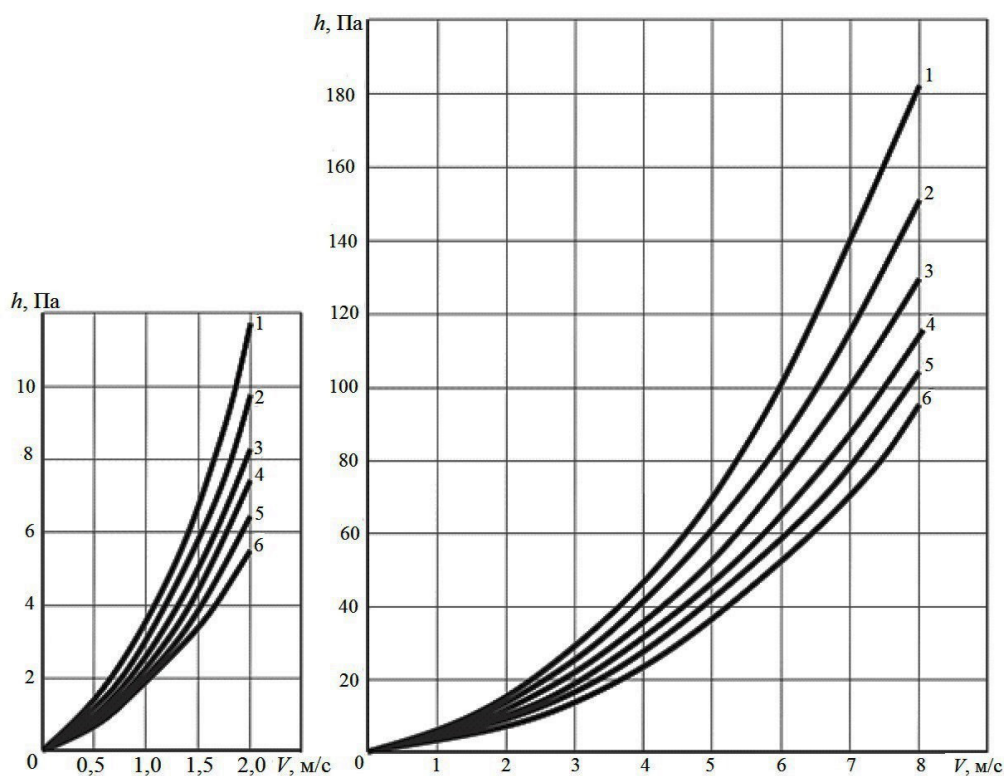


Рис. 3. Графики для определения удельной потери депрессии в горных выработках с поперечным сечением:  
1 – 4 м²; 2 – 6 м²; 3 – 8 м²; 4 – 10 м²; 5 – 12 м²; 6 – 15 м²

Для безопасного использования резервов воздуха при внезапных выбросах угля, породы и газа необходимы тщательный анализ состояния вентиляционной сети, ВГП и их режимов работы, разработка определенного порядка и способов введения резервов в действие, что может быть выполнено наиболее эффективно путем расчетов вентиляционной сети с помощью компьютерных моделей, создаваемых на основе данных депрессионных и газовых съемок [6].

**Выводы.** Выполнен анализ состояния и особенностей проветривания шахт, выемочных участков и второстепенных объектов. Практически все выбросоопасные шахты обеспечены расчетным расходом воздуха, имеют его фактические внутренние резервы.

Подача необходимого количества воздуха для проветривания аварийного участка после выброса может достигаться за счет раскрытия имеющихся на аварийном участке регуляторов, снижения подачи воздуха на второстепенные объекты, перевода ВГП в режим увеличения вентиляционного давления.

Для организации безопасного проветривания и разгазования аварийных участков после внезапных выбросов угля, породы и газа следует предварительно на компьютерной модели выполнять расчеты необходимого расхода воздуха, определять наличие резервов подачи воздуха на аварийный участок, а также порядок и способы введения резервов в действие.

#### Список литературы / References

1. Гребенкин, С.С. Инженерные методы предотвращения газодинамических явлений при разработке крутых выбросоопасных угольных пластов / С.С. Гребенкин, Д.М. Житленок, С.Д. Керкез [и др.]. – Донецк: УкрНТЭК. – 2001. – 294 с.

Grebyonkin S.S., Zhitlenok D.M., Kerkez S.D. [et al]. *Inzhenernye metody predotvrashheniya gazodinamicheskikh yavlenii pri razrabotke krutykh vybrosoopasnykh ugol'nykh plastov* [Engineering methods of preventing the gas-dynamic events during mining the steep outburst-prone coal seams]. Donetsk, UkrNTEK Publ., 2001, 294 p. (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 coal mines of Ukraine]. 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 events in mines]. Sevastopol', Weber Publ., 2003, 284 p. (In Russian).

4. Волошин, Н.Е. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в

1906–2007 гг. / Н.Е. Волошин, Л.А. Вайнштейн, А.М. Брюханов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.

Voloshin N.E., Vainshtein L.A., Bryukhanov A.M. [et al.]. *Vybrosty uglya, porody v shakhtakh Donbassa v 1906-2007 gg. 2-e izd., pererab. i dop.* [Gas and rock outbursts in Donbass mines in 1906-2007. The 2<sup>nd</sup> rev. and suppl. edition]. Donetsk, SPD Dmitrenko Publ., 2008, 920 p. (In Russian).

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

Agarkov A.V. *Ob avariinosti v ugol'nykh shakhtakh i primenenii sistemy distantsionnogo kontrolya sostava shakhtnoi sredy pri provedenii gornospasatel'nykh rabot [Elektronnyi resurs]* [On the accident rate in coal mines and application of a mine environment remote monitoring system during the carrying-out of mine-rescue operations (Electronic resource)]. *Innovatsionnye tekhnologii razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: sb. nauch. tr.* [Innovation technologies of development of mineral deposits: collected scientific papers]. Donetsk, GOUVPO “DonNTU” Press, 2019, pp. 294-313. Available at: <http://ed.donntu.org/books/19/cd8966.pdf> (In Russian).

6. Карнаух, Н.В. Совершенствование нормативного и организационно-методического обеспечения для проведения воздушно-депресссионных и газовых съемок в угольных шахтах / Н.В. Карнаух, В.В. Захлебн, Ал.В. Агарков // Вестник Академии гражданской защиты: науч. журн. – Донецк, 2018. – № 4(16). – С. 136 – 144.

Karnaukh N.V., Zakhlebin V.V., Agarkov Al.V. *Sovershenstvovanie normativnogo i organizatsionno-metodicheskogo obespecheniya dlya provedeniya vozdushno-depressionnykh i gazovykh s'yomok v ugol'nykh shakhtakh* [Improvement of regulatory and organizational-methodical provision for conducting the air-depression and gas surveying in coal mines]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashhity: nauch. zhurn.* [Civil Defence Academy Journal: scientific journal], Donetsk, 2018, no. (16), pp. 136-144. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым  
Дата поступления рукописи 07.06.2021

*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*

*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*

## **VENTILATION OF ACCIDENT AREAS OF MINES AFTER SUDDEN COAL, ROCK AND GAS OUTBURSTS**

**Purpose.** Investigation of special features of ventilating the accident areas of coal mines after the sudden coal, rock and gas outbursts for identification of effective methods and means of ensuring the safety of mine-rescuers during the carrying-out of emergency-rescue operations.

**Methods.** The analytical method of investigation has been applied.

**Results.** The analysis of the state and peculiarities of the ventilation has been fulfilled for mines prone to sudden outbursts for evaluation of the methods and means of ventilation of the accident areas. It has been proposed to use a computer simulation for calculations of the required air consumption, determination of the available air feed reserves for the accident area as well as the procedure and methods of getting these reserves utilized for organization of the safe ventilation and degassing of the accident areas after the sudden outbursts.

**Scientific novelty.** The methods of evaluation and registration of the outburst parameters applied for the air consumption calculations with the use of personal computers have been scientifically substantiated.

**Practical value.** The problem of ventilation of the mine accident areas and certain mine workings after the sudden coal, rock and gas outbursts has been considered in practice in order to ensure the safety of the mine-rescuers. The results of the investigations will be used in development of the recommendations for ventilation of the accident areas after the sudden coal, rock and gas outbursts during carrying-out the mine-rescue operations in the mines of the Donetsk People’s Republic.

**Keywords:** *coal mine; mine-rescue service; accident area; sudden coal, rock and gas outbursts; accident area ventilation.*

### III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 614.895.5:614.84-057.36

*Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, замдиректора (по научной работе);*

*e-mail: dolzhenkov\_52@mail.ru*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,*

*пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-03*

*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*

*Татьяна Олеговна Мороз, вед. инж.; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,*

*пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-43*

## ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЕЙ

**Цель.** Обоснование подходов к оценке эффективности средств индивидуальной защиты спасателей на примере защитных свойств боевой одежды пожарного.

**Методы.** При решении поставленных задач использованы современные методы исследований: анализ, обобщение и систематизация боевой одежды пожарного по уровню защиты спасателей с учетом таксономии анатомо-топографических зон тела человека; исследования защитных характеристик боевой одежды пожарного с помощью современных технических средств измерений.

**Результаты.** Рассмотрены требования к необходимому набору защитных свойств тканей и к конструкции боевой одежды пожарного, которые уменьшают воздействие механических, химических и температурных факторов с учетом характера и топографии их влияния на анатомо-функциональные особенности организма. Это позволяет провести комплексную сравнительную оценку комплектов боевой одежды пожарного из разных видов тканей и оценить надежность каждой из них для защиты определенной зоны. Защита тела спасателя рассматривается как совокупность защиты различных зон.

**Научная новизна.** Обоснованы подходы к дифференциальной оценке свойств боевой одежды пожарного, позволяющие экстраполировать полученные экспериментальным путем показатели. Разработана иерархия защитных свойств боевой одежды пожарного в зависимости от характера воздействия опасных и вредных факторов при чрезвычайных ситуациях.

**Практическая значимость.** За счет реализации зонной защиты тела человека от комплекса воздействующих факторов возможно увеличить сроки эксплуатации боевой одежды пожарного.

**Ключевые слова:** *средства индивидуальной защиты; боевая одежда пожарного; показатели защитных свойств материалов и конструкций; ткань; чрезвычайные ситуации.*

**Постановка задачи.** Методологические, методические и операциональные группы принципов подтверждают основные правила оценки эффективности средств защиты [1]. Методологические принципы обосновывают подходы к оценке средств защиты, методические принципы – специфику и экономичность их создания, а операциональные принципы – влияние всевозможных факторов на разработку и создание средств защиты. Для обоснования результативности

механизма создания средств защиты и определения их эффективности при адекватности оценки количественных показателей и степени их достоверности используют методологические принципы. При этом используемые методы должны быть корректными, то есть удовлетворять определенным формальным требованиям, обосновывать конкретные показатели эффективности разрабатываемого изделия на основе выбора критериев, характеризующих его структуру, методические принципы.

Оценка эффективности средств индивидуальной защиты (далее – СИЗ) спасателей, применяемых при ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), основана на приведенных выше принципах и сводится к выбору и использованию СИЗ, обеспечивающих максимальную защиту от комплекса опасных и вредных факторов как следствия ЧС. Опасные и вредные факторы вызваны как техногенными, так и природными причинами, их классифицируют по генезису и по механизму воздействия. По генезису их подразделяют на опасные и вредные факторы ЧС, имеющие первичный или вторичный характер. Непосредственно аварийная ситуация вызывает образование первичных опасных и вредных факторов ЧС. Вторичные опасные и вредные факторы представляют собой продукт измененной под воздействием аварии окружающей среды [2].

По механизму воздействия опасные и вредные факторы ЧС классифицируют как факторы физического (ударная волна, осколки, обломки, тепловое и ионизирующее излучения и др.), химического (токсические вещества), биологического (токсические вещества биологического происхождения) и психофизиологического (экстремальная ситуация) воздействий [3, 4].

Поэтому при проведении оценки эффективности СИЗ спасателей необходимо учитывать соотношение значений показателей их защитных свойств, что возможно только при проведении комплексной оценки надежности по нескольким показателям, максимально характеризующим степень защиты.

**Анализ последних исследований.** Анализ хронометражных данных, приведенных в литературе [5], показывает, что степень защиты спасателей СИЗ, в частности боевой одеждой пожарного, влияет на качество и безопасность проведения спасательных работ. Высокий риск поражения спасателей при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ можно значительно снизить, применяя эффективную боевую одежду пожарного [6]. В связи с этим важное место в системе управления спасательными работами должно отводиться повышению эффективности боевой одежды пожарного, в значительной степени зависящей от того, насколько ее защитные и эксплуатационные свойства снижают или устраняют воздействие неблагоприятных факторов при ликвидации аварий.

**Цель исследования** – обоснование подходов к оценке эффективности СИЗ спасателей на примере рассмотрения защитных свойств боевой одежды пожарного.

**Результаты исследования.** При ликвидации ЧС большое значение имеет эффективность защиты каждой зоны тела спасателей, в связи с чем показатели

опасных и вредных факторов были преобразованы в требования к защитным свойствам СИЗ.

Надежность защиты спасателей обеспечивают физико-механические свойства материалов, которые определяют их способность выдерживать нагрузку до разрушения. К ним предъявляют комплекс определенных требований, гарантирующих эффективность защиты. В процессе эксплуатации одежды ткани подвержены разнообразным механическим воздействиям, приводящим к растяжению, изгибам, трению. Стойкость к этим воздействиям характеризует основные механические свойства тканей. Защита от механических воздействий (удар, трение, давление, прокол) оценивается прочностными показателями тканей и материалов. Некоторыми из основных критериев оценки являются: поверхностная плотность, разрывная нагрузка по основе (по продольному расположению нитей) и по утку (по поперечному расположению нитей), сопротивление раздиранию – по основе и по утку, устойчивость к многократному изгибу (см. таблицу).

Показатель поверхностной плотности ткани  $P$ , г/м<sup>2</sup>, определяющий вес и прочностные характеристики комплекта СИЗ, находим по формуле

$$P = m / lb,$$

где  $P$  – поверхностная плотность, г/м<sup>2</sup>;

$m$  – масса, г;

$l$  – средняя длина элементарной пробы, м;

$b$  – средняя ширина элементарной пробы, м.

В соответствии с ГОСТ Р 53264-2009 «Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний» для проведения испытания на разрывную нагрузку применяют разрывные машины. Относительная погрешность показаний разрывной нагрузки  $\pm 1,0$  %, абсолютная погрешность показаний удлинения  $\pm 1,0$  мм. Средняя продолжительность разрыва регулируется от  $(30 \pm 15)$  до  $(60 \pm 15)$  с. Среднеарифметическое значение всех измерений по основе или по утку принимают за разрывную нагрузку ткани. Величина разрывной нагрузки напрямую зависит от способности ткани к удлинению, поскольку ткани, имеющие значительное удлинение при разрыве, обладают, как правило, хорошими эластичностью, несминаемостью, стойкостью к истиранию и т.п. Абсолютное разрывное удлинение представляет собой разницу между длиной образца в момент разрыва и его зажимной длиной до разрыва. Для определения в процентах удлинения  $l$  элементарной пробы при разрыве по основе или по утку используют следующую формулу:

$$l = \frac{l_1}{200} \cdot 100,$$

где  $l_1$  – удлинение при разрыве, мм;

200 – расстояние между зажимами разрывной машины, мм.

### Показатели защитных свойств материалов и конструкций

| Группа                                       | Показатели защитных свойств материалов и конструкций                                                                                                                                                                                | Значение показателя |                  |                   |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------|
|                                              |                                                                                                                                                                                                                                     | I уровня защиты     | II уровня защиты | III уровня защиты |
| Прочностные показатели тканей и материалов   | Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup> , не более                                                                                                                                                                                | 400                 | 600              | 600               |
|                                              | Разрывная нагрузка:<br>по основе, Н, не менее<br>по утку, Н, не менее                                                                                                                                                               | 1000<br>800         | 700<br>600       | 600<br>60         |
|                                              | Сопротивление раздираю:<br>по основе, Н, не менее<br>по утку, Н, не менее                                                                                                                                                           | 80<br>60            | 60<br>60         | 30<br>30          |
|                                              | Устойчивость к многократному изгибу, циклов, не менее                                                                                                                                                                               | –                   | –                | 300 000           |
| Температурные показатели тканей и материалов | Морозостойкость, °С, не выше                                                                                                                                                                                                        | –                   | –                | –40               |
|                                              | Устойчивость к воздействию теплового потока:<br>5 кВт/м <sup>2</sup> , с, не менее<br>40 кВт/м <sup>2</sup> , с, не менее                                                                                                           | 240<br>5            | 240<br>–         | 240<br>–          |
|                                              | Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее                                                                                                                                                                           | 15                  | 5                | 5                 |
|                                              | Теплопроводность при температуре 50...150 °С, Вт/(м·К)                                                                                                                                                                              | 0,06                | 0,06             | 0,06              |
|                                              | Устойчивость к воздействию температуры окружающей среды<br>до 300 °С, с, не менее<br>до 200 °С, с, не менее                                                                                                                         | 300<br>–            | –<br>240         | –<br>180          |
|                                              | Устойчивость к контакту с нагретыми до 400 °С твердыми поверхностями, с, не менее                                                                                                                                                   | 7                   | 3                | –                 |
|                                              | Кислородный индекс, % об., не менее                                                                                                                                                                                                 | 28                  | 26               | 26                |
|                                              | Водонепроницаемость, мм вод. ст., не менее                                                                                                                                                                                          | 1 000               | 1 000            | 1 000             |
| Другие показатели                            | Устойчивость к воздействию слабых (до 20 %) кислот и щелочей (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, KOH, NaOH), нефти и нефтепродуктов – индекс влагонепроницаемости (R) пакета материалов, при нулевом проникании (P), %, не менее | 80                  | –                | 80                |

Окончательный результат – это среднеарифметическое значение всех измерений по основе или по утку. Испытание ткани на раздир проводят

аналогично испытаниям на разрыв, предварительно произведя надрез исследуемой ткани.

С точки зрения оценки эффективности защиты наряду с прочностными характеристиками к боевой одежде пожарного предъявляют требования, связанные с теплофизическими показателями материалов и тканей. Это в первую очередь устойчивость к воздействию теплового потока, открытого пламени, температуры окружающей среды до 200...300 °С и другие показатели, характеристики которых приведены на рисунке. Важное значение имеют показатели морозостойкости, устойчивости к воздействию кислот и щелочей, нефти и нефтепродуктов и др.

Одна из основных и наиболее часто встречающихся задач в оценке эффективности средств индивидуальной защиты, применяемых при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, заключается в выборе изделия, максимально эффективно защищающего от комплекса опасных и вредных факторов, характерных для конкретной ситуации. Подобный выбор только на основе проведения дифференциальных оценок свойств средств индивидуальной защиты невозможен, поскольку они характеризуются различной величиной сопоставляемых показателей. Следовательно, при проведении оценки необходимо вводить в расчет соотношение значений показателей свойств, что возможно только при проведении комплексной оценки надежности средств индивидуальной защиты – оценки, проводимой по нескольким показателям, максимально характеризующим защитные свойства, детализируя последовательность ее проведения.

На рисунке представлена иерархия защитных свойств боевой одежды пожарного, позволяющая детализировать последовательность проведения комплексной оценки [7].

На 1-м, самом нижнем, иерархическом уровне представлены простые защитные свойства боевой одежды пожарного, которые измеряют в абсолютных показателях, поэтому нет возможности оценить свойство и его уровень.

Более высокий, 2-й уровень представляет экстраполяцию простых показателей в группы. Поэтому можно получить более значимые оценки защитных свойств боевой одежды пожарного. Этот уровень – промежуточный. На 3-м уровне возможно провести оценку защиты спасателя и от опасных и вредных факторов, локально действующих на отдельные анатомо-топографические зоны, и от факторов как с общим, так и со смешанным механизмом воздействия.

На 4-м уровне происходит комплексная оценка защитных свойств боевой одежды пожарного от воздействия совокупности всех факторов на организм в целом, степени риска поражения комплексом опасных и вредных факторов и эффективности защиты спасателя.



### Иерархия защитных свойств боевой одежды пожарного

С целью построения количественных зависимостей на этапе моделирования и анализа системы обеспечения защиты спасателей было проведено исследование причин возникновения, процессов распространения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, форм и методов их оценки. Это позволило обосновать номенклатуру комплекса опасных и вредных факторов, характерную для сходных аварий, воздействие которых может устранять или снижать боевая одежда пожарного, а также оценить характер их воздействия на спасателя [7].

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Приведенные в статье данные позволят провести сравнительную комплексную оценку боевой одежды пожарного из различных видов тканей и оценить надежность защиты

каждой из зон. Защита всего тела спасателя рассматривается как сумма защиты различных зон.

### Список литературы / References

1. Прыкина, Л.В. Экономический анализ предприятия / Л.В. Прыкина. – М.: Дашков и К°, 2016. – 256 с.

Prykina L.V. *Ekonomicheskii analiz predpriyatiya* [Economical analysis of an enterprise]. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2016, 256 p. (In Russian).

2. Чрезвычайные ситуации природного характера и защита от них / под ред. А.В. Барина. – М.: Владос-Пресс, 2011. – 496 с.

Barinov A.V. [ed.]. *Chrezvychainye situatsii prirodnogo kharaktera i zashhita ot nikh* [Emergency situations of a natural character and protection against them]. Moscow, Vlados-Press Publ., 2011, 496 p. (In Russian).

3. Безопасность жизнедеятельности / под ред. проф. Э.А. Арустамова. – М.: Дашков и К°, 2012. – 448 с.

Prof. Arustamov E.A. [ed.]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2012, 448 p. (In Russian).

4. Емельянов, В.М. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях / В.М. Емельянов, В.Н. Коханов, П.А. Некрасов; под ред. акад. РАЕН В.В. Тарасова. – М.: Академический проект, 2011. – 496 с.

Emel'yanov V.M., Kokhanov V.N., Nekrasov P.A.; acad. of the RAEN Tarasov V.V. [ed.]. *Zashhita naseleniya i territorii v chrezvychainykh situatsiyakh* [Protection of population and territories in emergencies]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2011, 496 p. (In Russian).

5. Логинов, В.И. Общие принципы и особенности разработки различных видов специальной одежды / В.И. Логинов // Пожарная безопасность. – 2002. – № 5. – С. 51 – 57.

Loginov V.I. *Obshhie printsipy i osobennosti razrabotki razlichnykh vidov spetsial'noi odezhdy* [General principles and special features of development of various kinds of special clothing]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2002, no. 5, pp. 51-57. (In Russian).

6. Верзилин, М.М. Пожарная тактика / М.М. Верзилин, Я.С. Повзик. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА НПО», 2007. – 440 с.

Verzilin M.M., Povzik Ya.K. *Pozharnaya taktika* [Firefighting technique]. Moscow, ZAO "SPETSTEKHNIKA NPO" Publ., 2007, 440 p. (In Russian).

7. Долженков, А.Ф. Особенности применения комплексного подхода при оценке защитных свойств спецодежды шахтерской / А.Ф. Долженков, С.Л. Тарасенко // «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах»: мат-лы XII Междунар. науч.-практ. конф., 22–23 ноября 2017 г. – Кемерово: Кузбасский национальный технический университет, 2017. – С. 112-1 – 112-8.

Dolzhenkov A.F., Tarasenko S.L. *Osobennosti primeneniya kompleksnogo podkhoda pri otsenke zashhitnykh svoystv spetsodezhdy shakhtyorskoi* [Specifics of the

complex approach application in evaluation of the protective properties of a miners' protective clothing]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatii v promyshlennno razvitykh regionakh: mat-ly XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 22-23 noyabrya 2017 g.* [Safety of enterprises in industrially advanced regions: materials of 12<sup>th</sup> International scientific and practical conference, November 22-23, 2017]. Kemerovo, Kuzbasskii nats. tekhn. un-t Press, 2017, pp.112-1-112-8. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым  
Дата поступления рукописи 04.06.2021

**Anatoly Filippovich Dolzhenkov**, Dr. Sci. (Tech.), deputy director (on science);

e-mail: dolzhenkov\_52@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) 332-78-03

**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

**Tatyana Olegovna Moroz**, advanced engineer; e-mail: tatiana.moroz@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) 332-78-43

## SUBSTANTIATION OF APPROACHES TO EVALUATION OF RESCUERS' PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT EFFECTIVENESS

**Purpose.** Substantiation of approaches to the effectiveness evaluation of the rescuers' personal protective equipment exemplified by the protective characteristics of a firefighter turnout gear.

**Methods.** The contemporary methods of investigations have been applied in solving the assigned tasks: analysis, generalization and systematization of the firefighter turnout gear according to the level of protection of rescuers taking into account the taxonomy of anatomical topographic zones of a human body; investigations of protective characteristics of the firefighter turnout gear applying the modern measuring instruments.

**Results.** The requirements have been considered regarding to the obligatory set of protective properties of fabrics and to the construction of the firefighter turnout gear which minimize the effects of mechanical, chemical and thermal factors taking into account the character and topography of their influence on the anatomical and functional particularities of an organism. This enables conducting a complex comparative evaluation of the firefighter turnout gear outfits made of different kinds of fabrics and evaluating the dependability of each of them for protection of a certain zone. The protection of the rescuer's body is considered to be a whole protection of different zones.

**Scientific novelty.** The approaches have been substantiated to the differential evaluation of the firefighter turnout gear properties that allow extrapolating the experimentally obtained indices. The hierarchy of the firefighter turnout gear protective properties has been developed depending on the nature of the effect of hazardous and harmful factors in the emergencies.

**Practical values.** Due to realization of the zoning protection of a human body against the complex of the affecting factors it is possible to increase the periods of use in service of the firefighter turnout gear.

**Keywords:** *personal protective equipment; firefighter turnout gear; protective properties indices of materials and constructions; fabric; emergency situations.*

УДК [544.723.21:547.532]:001.891.5

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

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

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

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОРБЕНТОВ НА ИХ СОРБЦИОННУЮ ЕМКОСТЬ**

**Цель.** Установление количественной зависимости между содержанием компонентов в составе и сорбционной емкостью сорбентов на основе длиннопламенного газового угля, котельного шлака и древесных опилок для выбора материалов с улучшенными сорбционными свойствами.

**Методы.** Гравиметрический метод определения сорбционной емкости материалов. Симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента. Графический метод представления результатов в виде диаграммы и концентрационного треугольника «состав-свойство».

**Результаты.** Определена сорбционная емкость по бензолу образцов длиннопламенного газового угля, котельного шлака фракции 0,315...0,5 мм и древесных опилок хвойных пород фракции 2...3 мм, их двух- и трехкомпонентных смесей. Проверена на адекватность математическая модель в виде полинома неполного третьего порядка. Построены диаграмма вклада составляющих полинома в расчетное значение сорбционной емкости, а также треугольная диаграмма «состав-свойство» и проекции изолиний равного уровня сорбционной емкости исследуемых составов.

**Научная новизна.** Впервые установлена зависимость сорбционной емкости по бензолу от состава двух- и трехкомпонентных смесей на основе длиннопламенного газового угля, котельного шлака и древесных опилок. Построена полиномиальная модель неполного третьего порядка для расчета рационального компонентного состава сорбентов и минимизации требуемого количества экспериментов.

**Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть использованы при получении корреляционных зависимостей «компонентный состав – свойство» с целью оптимизации рецептур сорбентов, предназначенных для локализации зон аварийных проливов химически опасных веществ. Построенная треугольная диаграмма «состав-свойство» позволяет прогнозировать сорбционную емкость сорбентов при любом заданном соотношении компонентов, что перспективно при решении вопроса получения природных сорбентов с требуемыми свойствами. За счет использования численного моделирования целевой функции достигается сокращение времени экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** диаграмма «состав-свойство»; математическая модель; многокомпонентные смеси; полином; природный сорбент; сорбционная емкость.

**Постановка проблемы.** Ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах, связанных с аварийными проливами и выбросами химически опасных веществ, – острая мировая проблема, в которой решающими и первостепенными считаются вопросы не только экономики, но и экологии. Методы и средства защиты от аварийного растекания химически опасных веществ требуют доработки, несмотря на значительное количество новых сорбционных материалов. Применение дорогостоящих полимерных сорбентов, обладающих высокой поглотительной способностью, нерентабельно для ликвидации масштабных аварийных проливов токсичных

веществ. В связи с этим разработка рецептур сорбентов на основе доступных материалов для ликвидации аварийных проливов летучих пожароопасных и токсичных органических жидкостей – актуальная научная и практическая задача.

Подбор оптимального компонентного состава для получения сорбента с заданными свойствами можно решить с применением метода факторного планирования эксперимента и получения математической модели, описывающей зависимость целевой функции от влияющих факторов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Критический анализ последних исследований показал, что наибольшее распространение при изучении и оптимизации свойств многокомпонентных смесей (полупроводниковые материалы, ферриты, клеи, бетонные смеси, композиционные материалы и др.) получили симплекс-решетчатые планы [1, 2]. Однако задача разработки рецептур многокомпонентных природных сорбентов решена не полностью. Поэтому исследование влияния состава на свойства сорбентов с использованием математического метода планирования эксперимента для разработки оптимальных рецептур недорогих, но эффективных сорбционных составов остается актуальным.

**Цель исследований** – установление зависимости между компонентным составом и сорбционной емкостью сорбентов на основе длиннопламенного газового угля, котельного шлака и древесных опилок для выбора материалов с улучшенными сорбционными свойствами.

**Изложение основного материала и полученных научных результатов.** Системы, свойства которых зависят только от соотношения компонентов и не зависят от количества смеси, условий переработки и других факторов, называются системами «состав-свойство», или многокомпонентными смесями. Планирование эксперимента для нахождения оптимального значения функции отклика (целевая функция при оптимизации) и получения аппроксимирующего полинома, описывающего поверхность функции отклика, – основа разработки многокомпонентных смесей различного назначения, в том числе сорбционных составов [2].

Особенность задач исследования многокомпонентных материалов заключается во взаимозависимости варьируемых факторов – концентрации исходных компонентов: изменив концентрацию одного компонента, необходимо изменять концентрации нескольких или всех остальных компонентов.

Результаты исследований [3] показали, что каменный уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый), котельный шлак фракции 0,315...0,5 мм и древесные опилки фракции 2...3 мм можно использовать в качестве сырья для получения сорбентов. На основе перечисленных материалов приготовлена серия двухкомпонентных и трехкомпонентных модельных смесей с выполнением необходимого условия

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1,$$

где  $x_1$  – содержание шлака, массовая доля;

$x_2$  – содержание угля марки ДГ, массовая доля;

$x_3$  – содержание опилок, массовая доля.

Сорбционную емкость по бензолу исходных (чистых) материалов, двух- и трехкомпонентных смесей на их основе определяли ускоренным гравиметрическим методом в статических условиях эксперимента [3].

Для адекватного описания зависимости «состав-свойство» сорбционных смесей выбран приведенный полином неполного третьего порядка трехкомпонентной смеси [2]

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (1)$$

где  $y$  – выходной фактор;

$\beta$  – коэффициенты регрессии.

Матрица планирования эксперимента для решетки  $\{3, 3^*\}$ , обеспечивающей построение модели неполного третьего порядка, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования и результаты эксперимента для системы  
шлак ( $x_1$ ) – уголь ( $x_2$ ) – опилки ( $x_3$ ) – сорбционная емкость ( $y$ )

| Номер состава | Входные факторы                      |       |       | Выходной фактор – сорбционная емкость сорбента по отношению к бензолу, г/г |                                                                            |       |       |                                           |
|---------------|--------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------------------------------------------|
|               | содержание компонента, массовая доля |       |       | Обозначение выходного фактора                                              | Экспериментальное значение сорбционной емкости по трем параллельным опытам |       |       |                                           |
|               | $x_1$                                | $x_2$ | $x_3$ |                                                                            | $y_1$                                                                      | $y_2$ | $y_3$ | Среднее арифметическое значение $\bar{y}$ |
| 1             | 1                                    | 0     | 0     | $y_1$                                                                      | 1,06                                                                       | 1,10  | 1,09  | 1,08                                      |
| 2             | 0                                    | 1     | 0     | $y_2$                                                                      | 0,71                                                                       | 0,74  | 0,72  | 0,72                                      |
| 3             | 0                                    | 0     | 1     | $y_3$                                                                      | 6,70                                                                       | 6,48  | 6,67  | 6,62                                      |
| 4             | 1/2                                  | 1/2   | 0     | $y_{12}$                                                                   | 0,97                                                                       | 0,98  | 0,90  | 0,95                                      |
| 5             | 1/2                                  | 0     | 1/2   | $y_{13}$                                                                   | 3,37                                                                       | 3,68  | 3,98  | 3,68                                      |
| 6             | 0                                    | 1/2   | 1/2   | $y_{23}$                                                                   | 3,61                                                                       | 3,24  | 3,09  | 3,31                                      |
| 7             | 1/3                                  | 1/3   | 1/3   | $y_{123}$                                                                  | 2,99                                                                       | 2,88  | 2,87  | 2,91                                      |

Учитывая свойство частичной композиционности симплекс-решетчатого плана, матрица планирования эксперимента построена с учетом возможности при неадекватности уравнения регрессии построить модель полинома более высокого, третьего, порядка без потери результатов предыдущих опытов. Используя результаты эксперимента (табл. 1) для полинома неполного третьего порядка, рассчитаны эмпирические коэффициенты при слагаемых уравнения (1) по формулам

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= y_1 = 1,08; \\
\beta_2 &= y_2 = 0,72; \\
\beta_3 &= y_3 = 6,62; \\
\beta_{12} &= 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 = 0,20; \\
\beta_{13} &= 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = -0,68; \\
\beta_{23} &= 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = -1,44; \\
\beta_{123} &= 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3) = 8,55.
\end{aligned}$$

После подстановки вычисленных коэффициентов в уравнение (1) получена полиномиальная модель зависимости сорбционной емкости ( $\hat{y}$ ) от состава смеси: шлак ( $x_1$ ) – уголь ( $x_2$ ) – опилки ( $x_3$ ) в виде уравнения приведенного полинома неполного третьего порядка

$$y = 1,08x_1 + 0,72x_2 + 6,62x_3 + 0,20x_1x_2 - 0,68x_1x_3 - 1,44x_2x_3 + 8,55x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Абсолютные значения коэффициентов при слагаемых уравнения показывают количественное воздействие каждого компонента на сорбционную емкость: чем выше значение коэффициента, тем большее влияние оказывает соответствующий компонент на сорбционную емкость.

Анализ уравнения (2) показывает преобладающее влияние опилок на сорбционную емкость, поскольку в уравнении приведено максимальное значение коэффициента для фактора  $x_3$ . Знаки при коэффициентах указывают на характер влияния факторов. Положительный знак при коэффициенте свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора (массовой доли компонента) растет величина параметра оптимизации (сорбционной емкости), при отрицательном знаке величина этого параметра, наоборот, убывает.

Уравнение приведенного полинома (2) имеет линейную и нелинейную части. В свою очередь, нелинейная часть полинома состоит из квадратичной ( $0,20x_1x_2$ ;  $-0,68x_1x_3$ ;  $-1,44x_2x_3$ ) и кубической ( $8,55x_1x_2x_3$ ) составляющих. Положительный знак при произведениях факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  указывает на синергизм их влияния на сорбционную емкость. Синергизм для нелинейной части полинома определяется квадратичным  $\beta_{12}$  (0,20) и кубическим  $\beta_{123}$  (8,55) коэффициентами. Таким образом, в нелинейной части полинома наибольший вклад в увеличение сорбционной емкости вносят двойная (шлак – уголь) и тройная (шлак – уголь – опилки) системы.

Отрицательный знак при произведениях факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  указывает на антагонизм их влияния на сорбционную емкость. Явление антагонизма наблюдается для нелинейной части приведенного полинома и связано с квадратичными коэффициентами  $\beta_{13}$  (–0,68) при факторах, соответствующих шлаку и опилкам, и  $\beta_{23}$  (–1,44) при факторах, соответствующих углю и опилкам.

Так как при постановке эксперимента по симплекс-решетчатому плану нет степеней свободы (планы насыщенные), то для проверки адекватности построенной полиномиальной модели (2) провели эксперименты по определению сорбционной емкости для четырех произвольно выбранных

контрольных составов, не участвующих в построении симплекс-решетчатого плана (табл. 2). Адекватность полиномиальной модели (2) оценивали в каждой контрольной точке по критерию Стьюдента  $t_{\text{расч}}$  согласно формуле

$$t_{\text{расч}} = \frac{\Delta y \sqrt{m}}{S_0 \sqrt{1 + \xi}},$$

где  $\Delta y = (y_{\text{эксп}} - y_{\text{расч}})$  – разность между средним экспериментальным и рассчитанным по уравнению полинома (2) значением сорбционной емкости, г/г;

$m$  – количество параллельных опытов;

$S_0$  – среднеквадратическая ошибка эксперимента;

$\xi$  – величина, связанная с коэффициентами полинома.

При этом  $m = 3$ , так как каждый из семи экспериментов плана был трижды продублирован. Среднеквадратическая ошибка эксперимента рассчитана по результатам дублирования опытов:  $S_0 = 0,1630$ . Значение  $\xi$  для каждого контрольного состава взято из справочной литературы [4].

Таблица 2

Исходные данные и результаты проверки адекватности модели (2)

| Номер состава | Матрица планирования |       |       | Результаты        |                   | Расчетный критерий Стьюдента $t_{\text{расч}}$ |
|---------------|----------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|------------------------------------------------|
|               | $x_1$                | $x_2$ | $x_3$ | $y_{\text{эксп}}$ | $y_{\text{расч}}$ |                                                |
| 1             | 0,375                | 0,375 | 0,250 | 2,58              | 2,46              | 0,94                                           |
| 2             | 0,375                | 0,250 | 0,375 | 3,19              | 3,16              | 0,23                                           |
| 3             | 0,400                | 0,300 | 0,300 | 2,70              | 2,75              | 0,39                                           |
| 4             | 0,600                | 0,300 | 0,100 | 1,69              | 1,63              | 0,52                                           |

Полученная полиномиальная модель оказалась адекватной эксперименту, так как для всех четырех контрольных составов соблюдено неравенство  $t_{\text{расч}} \leq t_{\text{табл}}$  (табл. 2). При уровне значимости  $p = 0,05$  табличное значение критерия Стьюдента ( $t_{\text{табл}}$ ) равно 2,23.

На диаграмме (рис. 1) для четырех контрольных составов наглядно показан вклад каждой составляющей приведенного полинома (ряды 1...8) в расчетное значение сорбционной емкости.

Основной вклад (94,7...97,8 %) в расчетное значение сорбционной емкости вносит линейная часть полинома ( $1,08x_1$ ;  $0,72x_2$ ;  $6,62x_3$ ) с преобладающим содержанием опилок в смеси и их влиянием (40...81 %).

Для нелинейной части полинома наблюдается явление антагонизма, связанное с квадратичными коэффициентами, содержащими шлак и опилки ( $\beta_{13}$ ) или уголь и опилки ( $\beta_{23}$ ). Синергизм обусловлен кубическим коэффициентом  $\beta_{123}$ , величина отклика при этом составляет 9...13 % от общего расчетного значения сорбционной емкости.

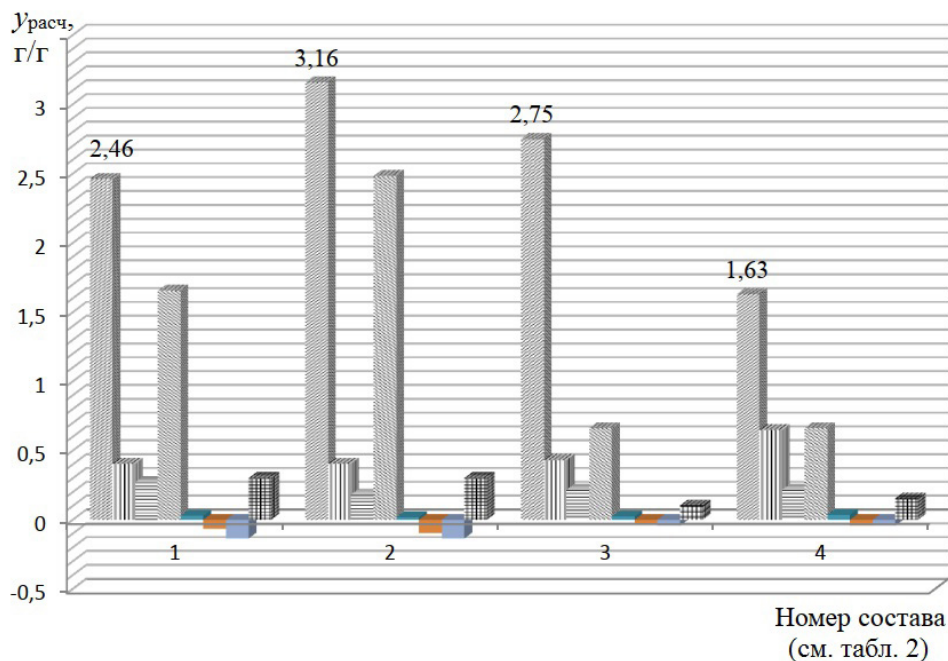


Рис. 1. Диаграмма вклада составляющих полинома в расчетное значение сорбционной емкости:  
 ряд 1 – общее расчетное значение сорбционной емкости;  
 ряды 2...4 – вклад линейных частей полинома;  
 ряды 5...7 – вклад квадратичных составляющих полинома;  
 ряд 8 – вклад кубической составляющей полинома

С применением полиномиальной модели (2) рассчитаны координаты 69 точек (сорбционных составов), построены проекции изолиний равного уровня сорбционной емкости и диаграмма, связывающая сорбционную емкость с компонентным составом смеси (рис. 2).

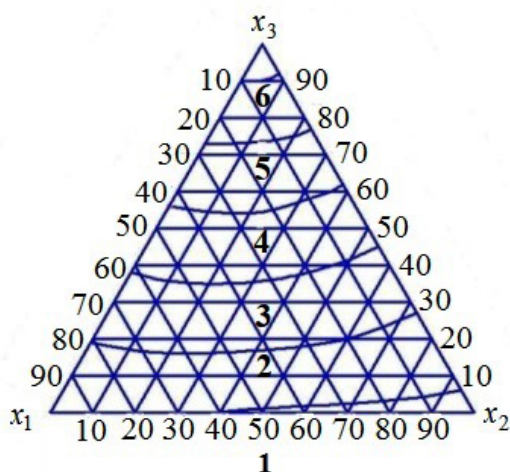


Рис. 2. Треугольная диаграмма «состав-свойство»

Вершины треугольника соответствуют чистым веществам: шлаку, углю и опилкам, стороны – их двойным смесям, точки внутри симплекса – тройным смесям. Каждая точка треугольника соответствует определенному компонентному составу тройной смеси и, наоборот, каждый состав характеризуют одной определенной точкой.

**Выводы.** Получена адекватная эксперименту математическая модель в виде полинома неполного третьего порядка, которая использована для расчета и установления оптимального компонентного состава сорбентов. Исследовано влияние содержания шлака, угля марки ДГ и опилок на сорбционную емкость многокомпонентных природных сорбентов. Построена диаграмма «состав-свойство», которая позволяет прогнозировать сорбционную емкость сорбентов при любом заданном соотношении шлака, угля марки ДГ и опилок, что перспективно при решении вопроса получения природных сорбентов с требуемыми свойствами.

#### Список литературы / References

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

Akhmadiev F.G., Gil'fanov R.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya "sostav-svoistvo" mnogokomponentnykh smesei* [Mathematical modeling and optimization of multicomponent "composition-characteristic" mixtures]. *Izvestiya KGASU – News of the KSUAE*, 2012, no. 2(20), pp. 289-297. (In Russian).

2. Кононюк, А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента): монография: в 4 кн. Кн. 3 / А.Е. Кононюк. – К.: Освіта України, 2011. – 456 с.

Kononyuk A.E. *Osnovy nauchnykh issledovaniy (obshchaya teoriya eksperimenta). V 4 knigakh. Kniga 3. Monografiya* [Fundamentals of scientific investigations (general theory of experiment). Monograph. 4-book edition. Book 3]. Kiev, Osvita Ukrainy, 2011, 456 p. (In Russian).

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

Agarkov An.V., Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N. *Sposobnost' poristyykh materialov pogloshhat' avariino khimicheski opasnye veshchestva* [[Capacity of porous materials to absorb chemically hazardous substances conducive to accident]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 94-99. (In Russian).

4. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1978. – 319 с.

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

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

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

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

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

## INFLUENCE OF MULTICOMPONENT SORBENTS COMPOSITION ON THEIR SORPTION CAPACITY

**Purpose.** Establishing of a numerical relationship between the content of components in a composition and the sorption capacity of the sorbents based on long-flame gas coal, boiler slag and sawdust for selection of the materials with improved sorptive characteristics.

**Methods.** Gravimetric method of determination of the sorption capacity of materials. Simplex-lattice method of the experiment planning. Graphic method of presenting the results in the form of a diagram and a “composition-characteristic” concentration triangle.

**Results.** The benzene sorption capacity of samples of long-flame gas coal, boiler slag with fraction of 0.315...0.5 mm and coniferous sawdust with fraction of 2...3 mm, their two- and three-component mixtures has been determined. The adequacy has been verified for the mathematical model in the form of the non-complete tertiary polynomial. There have been plotted the diagram of the polynomial components input into the sorption capacity expected value, the “composition-characteristic” triangle diagram and the projections of equal level isolines of the sorption capacity of the investigated compositions.

**Scientific novelty.** The dependence of the benzene sorption capacity on the composition of the two- and three-component mixtures based on long-flame gas coal, boiler slag and sawdust has been established for the first time. The non-complete tertiary polynomial model has been plotted for calculation of the rational component composition of the sorbents and minimization of the required number of the experiments.

**Practical value.** The investigation results may be applied in derivation of the “component composition-characteristic” correlation dependences with the purpose to optimize the formulae of the sorbents designed for containment of the zones of accident spillages of chemically hazardous substances. The plotted “composition-characteristic” triangle diagram makes it possible to predict the sorption capacity of the sorbents with any given ratio of the components which is promising for solution of the problem with natural sorbents production with required characteristics. Due to the application of the objective function numerical modeling the duration of the experimental investigations has been reduced.

**Keywords:** “composition-characteristic” diagram; mathematical model; multicomponent mixtures; polynomial; natural sorbent; sorption capacity.

УДК 544.723.5 + 66.074.378.1

*Валерий Васильевич Шаповалов, д-р хим. наук, проф., зав. каф.;**e-mail: wvshapovalov@gmail.com;**Юлия Николаевна Ганнова, канд. хим. наук, доц.; e-mail: gannovaj@mail.ru;**Тамара Викторовна Шаповалова, ст. преп.; e-mail: tv-sh-lova@mail.ru;**Алина Анатольевна Берестовая, ст. преп.; e-mail: berestova865@gmail.com**Государственное образовательное учреждение высшего и профессионального образования**«Донецкий национальный технический университет»**283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09*

## АДСОРБЕНТЫ ДИОКСИДА СЕРЫ НА ОСНОВЕ $\text{CaO}$ И $\text{CaCO}_3$ , АКТИВИРОВАННЫЕ НИТРАТОМ ЛИТИЯ

**Цель.** Получение высокоактивных хемосорбентов диоксида серы на основе оксида и карбоната кальция.

**Методы.** Дифференциально-термический анализ для определения температур взаимодействия активатора с соединениями кальция и систем с  $\text{SO}_2$ ; ИК-спектроскопия для определения качественного состава продуктов реакции.

**Результаты.** Выявлена эффективность поглощения диоксида серы оксидом и карбонатом кальция, пропитанных нитратом лития в качестве активатора. Установлены температуры начала взаимодействия систем  $\text{LiNO}_3\text{--CaCO}_3$ ,  $\text{LiNO}_3\text{--CaO}$  с диоксидом серы.

**Научная новизна.** Впервые установлено, что нитрат лития  $\text{LiNO}_3$  – мощный активатор процессов взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CaO}$ . Эффект активации обусловлен малым размером иона  $\text{Li}^+$  и его высокой подвижностью. Диффузия  $\text{Li}^+$  в кристаллические решетки  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CaO}$  вызывает их разупорядочение и повышение реакционной способности. Впервые установлено, что активирующий эффект нитрата лития в реакциях  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CaO}$  с  $\text{SO}_2$  проявляется при температуре  $\sim 200\ldots 450^\circ\text{C}$  и обусловлен устойчивостью атома  $\text{N}^{+5}$  нитрат-иона в  $\text{LiNO}_3$  при этой же температуре к восстановлению соединениями серы  $\text{S}^{+4}$  в  $\text{SO}_2$ . При температуре выше  $450^\circ\text{C}$   $\text{SO}_2$  восстанавливает в активаторе: на первой стадии нитрат-ион  $\text{NO}_3^-$  до нитрит-иона  $\text{NO}_2^-$  и далее до  $\text{N}_2$  и оксида лития  $\text{Li}_2\text{O}$ , что выводит активатор из активной формы.

**Практическая значимость.** Данные об активирующей способности соединений лития в процессах взаимодействия  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CaO}$  с  $\text{SO}_2$  могут служить базой для разработки нового класса сорбентов на основе соединений кальция, активированных солями щелочных металлов.

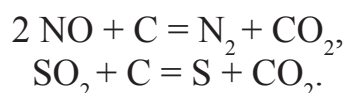
**Ключевые слова:** диоксид серы; оксид кальция; карбонат кальция; нитрат лития; хемосорбция; активация процесса.

**Постановка проблемы.** Изучение влияния нитрата лития  $\text{LiNO}_3$  на процесс хемосорбции диоксида серы в системах  $\text{SO}_2\text{--CaO}$ ,  $\text{SO}_2\text{--CaCO}_3$ .

**Анализ последних исследований.** Общеизвестно, что диоксид серы  $\text{SO}_2$  относится к вредным веществам, отрицательно воздействующим на биологические и техногенные объекты как в чистом виде, так и особенно после его превращения в атмосфере в серную кислоту. Кроме того, вследствие несовершенства методов очистки выбросы в атмосферу  $\text{SO}_2$ , особенно от предприятий топливно-энергетического комплекса и предприятий по производству цветных металлов, остаются существенными. Этим обусловлены усовершенствование известных способов очистки и разработка

более совершенных методов. Сегодня существует два основных направления снижения выбросов оксида серы энергетическими установками, сжигающими серосодержащее топливо: предварительное (перед сжиганием) снижение содержания серы в исходном топливе (десульфуризация топлива); очистка дымовых газов от оксидов серы с помощью специальных установок [1]. В мокром способе вследствие кислотных свойств сорбцию  $\text{SO}_2$  проводят веществами основной природы, из которых наиболее доступны суспензии или растворы гидроксидов и карбонатов щелочноземельных металлов, в основном кальция [1] (см. также патент RU 2438761 «Способ и система комплексной сухой и мокрой очистки „дымового газа“»). Использование водных растворов ограничено низкой температурой очищаемого газа, в то время как, например, отходящие дымовые газы имеют температуру примерно 200 °С.

К сухим способам относится сорбция диоксида серы углеродными поглотителями (активные угли и полукокс). Так, по данным патента RU 2676642 «Способ комплексной очистки „дымовых газов“», рекомендуется горячие дымовые газы температурой 250...500 °С пропускать через графитовый механический фильтр, на котором происходит частичное восстановление оксида азота (II) NO и диоксида серы (IV)  $\text{SO}_2$  по реакциям

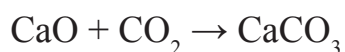


Процесс усложняется образованием кроме диоксида углерода  $\text{CO}_2$  также оксида углерода CO, который рекомендуется окислять до  $\text{CO}_2$  на гопкалите (см. патент RU 2676642).

Применение в качестве реагента недорогих и недефицитных природных твердофазных материалов затруднено из-за их низкой химической активности в приемлемом интервале температур. Так, например, известь или карбонаты кальция в виде мела, известняка или доломита используют при высокой температуре, добавляя их непосредственно в топку печи (см. патент RU 2341729 «Способ снижения выделений диоксида серы из бойлера с циркулирующим псевдоожиженным слоем»).

Несмотря на большое количество работ, посвященных проблемам очистки газов от  $\text{SO}_2$ , поиск новых сорбентов весьма актуален.

В работе [2] установлено, что нитрат лития значительно ускоряет реакцию



и снижает температуру взаимодействия с 370 до 180 °С.

По данным работ [2, 3], причина активации реакций в системе  $\text{CaO-LiNO}_3-\text{CO}_2$  заключается в разупорядочении кристаллической решетки нитрата лития с образованием ионов лития, которые проникают в кубическую кристаллическую решетку CaO и вызывают ее дестабилизацию. Исходя из этого можно было ожидать, что такой же эффект проявится и при взаимодействии CaO и  $\text{SO}_2$ , в то

время как активация других типов соединений, обладающих более сложными кристаллическими решетками, была неочевидной.

**Методика эксперимента.** Вследствие высокой реакционной способности  $\text{SO}_2$  при высокой температуре реакционная зона в лабораторной установке дифференциально-термического анализа (далее – ДТА) выполнена из кварцевых трубок (6) (рис. 1). Диоксид серы получали путем взаимодействия сульфита натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  с раствором серной кислоты и перед подачей в установку пропускали через трубку с силикагелем (3) для удаления влаги и следов серной кислоты. Для сглаживания пульсаций  $\text{SO}_2$  использовали эластичную емкость (4). Эталонем служил  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Температуру и разность температур образца и эталона фиксировали двухкоординатным самописцем.

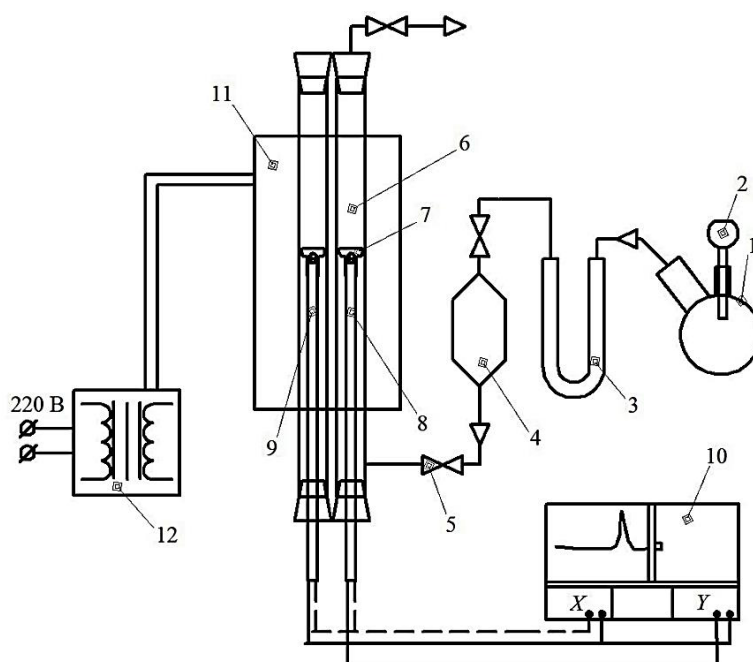


Рис. 1. Схема установки дифференциально-термического анализа:

- 1 – реактор для получения  $\text{SO}_2$ ; 2 – емкость для серной кислоты; 3 – трубка с осушителем – силикагелем; 4 – буферная емкость; 5 – кран подачи газа в реакционную зону; 6 – кварцевая трубка; 7 – тигель для образца; 8, 9 – термопары; 10 – самописец; 11 – трубчатая печь; 12 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) с датчиком напряжения

ИК-спектры записывали на спектрофотометре Specord 75IR. Применяли методику приготовления образцов растиранием с вазелиновым маслом.

**Результаты и их обсуждение.** Принципиальное отличие диоксида серы от диоксида углерода заключается в том, что атом  $\text{S}^{+4}$  в составе  $\text{SO}_2$  обладает выраженными восстановительными и окислительными свойствами. Поэтому реакции  $\text{SO}_2$  могут протекать как с изменением, так и без изменения степени окисления серы. В табл. 1 на основе данных работы [4] приведены результаты расчета изобарно-изотермических потенциалов и констант равновесия реакций ряда соединений щелочных и щелочноземельных металлов с  $\text{SO}_2$ . Как видно

из приведенных данных, возможны почти все рассмотренные процессы, кроме реакций  $\text{SO}_2$  с фосфатами, что подтверждается отрицательными значениями  $\Delta G$  и, соответственно, положительными значениями констант равновесия, рассчитываемыми по уравнению

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G^\circ}{RT}.$$

В отсутствие окислителей реакции взаимодействие  $\text{SO}_2$  с оксидами щелочноземельных металлов (табл. 1, реакции 1–4) и соответствующими карбонатами (реакции 18–21) протекают с образованием сульфитов без изменения степени окисления серы. При этом в ряду  $\text{MgO}$ – $\text{CaO}$ – $\text{SrO}$ – $\text{BaO}$  с увеличением основных свойств оксидов симбатно увеличиваются значения теплот и констант равновесия реакций. Такая же зависимость наблюдается и при взаимодействии карбонатов металлов с  $\text{SO}_2$  (реакции 18–21), но значения констант равновесия значительно меньше, чем при взаимодействии диоксида серы с оксидами металлов.

Таблица 1

Термодинамические характеристики реакций соединений щелочноземельных металлов с диоксидом серы при стандартных условиях

| №  | Реакция                                                                                             | $\Delta H_{298^\circ}$<br>кДж/моль | $\Delta S_{298^\circ}$<br>Дж/(моль·К) | $\Delta G_{298^\circ}$<br>кДж/моль | $\ln K_p$ |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1  | $\text{MgO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgSO}_3$                                                | -116,5                             | -188,9                                | -60,2                              | 24,298    |
| 2  | $\text{CaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3$                                                | -227,4                             | -186,4                                | -171,9                             | 69,382    |
| 3  | $\text{SrO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{SrSO}_3$                                                | -299,8                             | -189,5                                | -243,3                             | 98,201    |
| 4  | $\text{BaO} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{BaSO}_3$                                                | -351,8                             | -199,6                                | -292,3                             | 117,978   |
| 5  | $\text{MgO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{MgSO}_4$                               | -386,4                             | -286,2                                | -301,1                             | 121,53    |
| 6  | $\text{CaO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$                               | -492,0                             | -283,6                                | -407,5                             | 164,476   |
| 7  | $\text{SrO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{SrSO}_4$                               | -555,1                             | -283,3                                | -470,7                             | 189,984   |
| 8  | $\text{BaO} + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{BaSO}_4$                               | -611,5                             | -289,1                                | -525,4                             | 212,062   |
| 9  | $2 \text{LiNO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -106,3                             | 204,4                                 | -167,2                             | 67,485    |
| 10 | $2 \text{NaNO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -84,9                              | 148,5                                 | -129,2                             | 52,148    |
| 11 | $2 \text{KNO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NO}_2$                    | -80,9                              | 141,6                                 | -123,2                             | 49,726    |
| 12 | $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgSO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -130,9                             | 159,7                                 | -178,49                            | 72,042    |
| 13 | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -122,5                             | 145,6                                 | -165,9                             | 66,961    |
| 14 | $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{SrSO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -102,5                             | 159,2                                 | -149,9                             | 60,503    |
| 15 | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{BaSO}_4 + 2 \text{NO}_2$                  | -113,7                             | 149,9                                 | -158,4                             | 63,934    |
| 16 | $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{SO}_2 \rightarrow 3\text{MgSO}_3 + 0,5\text{P}_4\text{O}_{10}$ | 94,1                               | -560,5                                | 261,1                              | -105,385  |
| 17 | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{SO}_2 \rightarrow 3\text{CaSO}_3 + 0,5\text{P}_4\text{O}_{10}$ | 12,0                               | -561,7                                | 179,4                              | -72,41    |
| 18 | $\text{MgCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgSO}_3 + \text{CO}_2$                               | -15,9                              | -14,0                                 | -11,7                              | 4,722     |
| 19 | $\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$                               | -50,0                              | -26,0                                 | -42,3                              | 17,073    |
| 20 | $\text{SrCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{SrSO}_3 + \text{CO}_2$                               | -65,2                              | -18,9                                 | -59,6                              | 24,056    |

Окончание табл. 1

| №<br>п/п | Реакция                                                                                | $\Delta H_{298^\circ}$ ,<br>кДж/моль | $\Delta S_{298^\circ}$ ,<br>Дж/(моль·К) | $\Delta G_{298^\circ}$ ,<br>кДж/моль | $\ln K_p$ |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 21       | $\text{BaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{BaSO}_3 + \text{CO}_2$                  | -99,9                                | -27,8                                   | -91,6                                | 36,972    |
| 22       | $\text{MgCO}_3 + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{MgSO}_4 + \text{CO}_2$ | -285,7                               | -111,1                                  | -252,6                               | 101,955   |
| 23       | $\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2$ | -314,6                               | -123,2                                  | -277,9                               | 112,166   |
| 24       | $\text{SrCO}_3 + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{SrSO}_4 + \text{CO}_2$ | -320,5                               | -112,4                                  | -287,0                               | 115,839   |
| 25       | $\text{BaCO}_3 + \text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{BaSO}_4 + \text{CO}_2$ | -359,6                               | -117,3                                  | -324,6                               | 131,015   |
| 26       | $4 \text{Na}_2\text{SO}_3 \rightarrow 3 \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{S}$  | -164,1                               | +58,1                                   | -147,2                               | 59,413    |

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, соединения серы со степенью окисления +4 в присутствии окислителей (кислорода или нитрат-иона) термодинамически неустойчивы и окисляются до  $\text{S}^{+6}$  в составе сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$ . Окисление сопровождается значительным увеличением теплоты взаимодействия  $\text{SO}_2$  с соответствующими реагентами (табл. 1, реакции 5–8 и 22–25).

**Взаимодействие в системе  $\text{CaCO}_3\text{--SO}_2$ .** Взаимодействие диоксида серы с карбонатом кальция сопровождается выделением 50 кДж теплоты на 1 моль  $\text{SO}_2$  (табл. 1, реакция 19). Термограмма процесса взаимодействия представлена на рис. 2 (кривая 1). В условиях эксперимента фиксируемое экзотермическое взаимодействие  $\text{CaCO}_3$  с  $\text{SO}_2$  начинается при температуре, близкой к 590 °С.

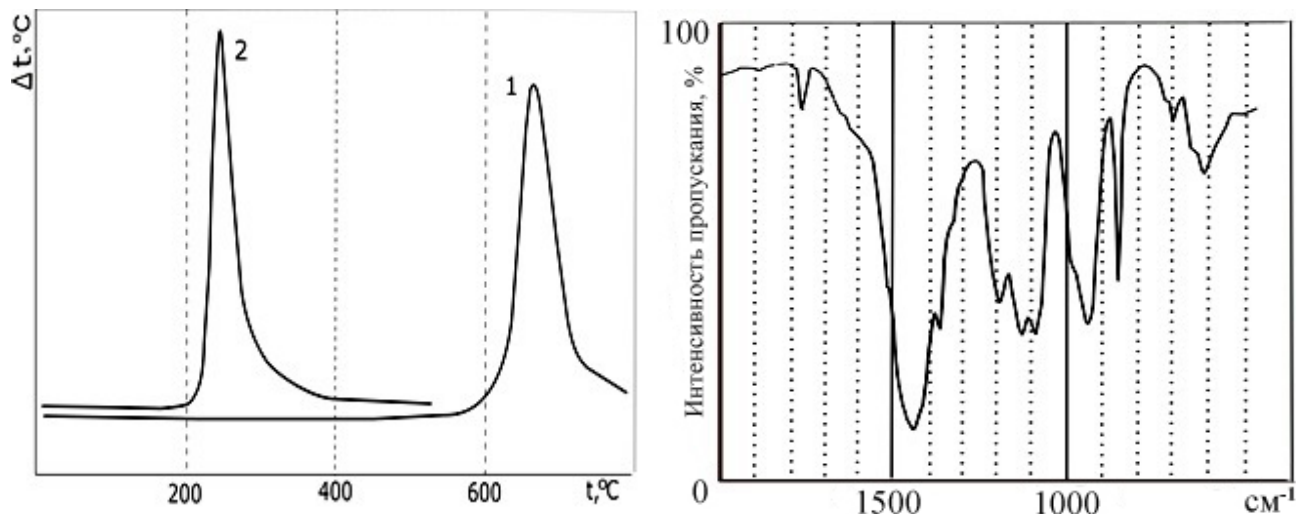


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$  (1) и системой  $\text{CaCO}_3\text{--LiNO}_3$  (2) и ИК-спектр продуктов взаимодействия

На ИК-спектре (см. рис. 2) продуктов взаимодействия присутствуют полосы поглощения при 700...720 и 950...970  $\text{cm}^{-1}$ , характерные для валентных колебаний S–O сульфит-иона  $\text{SO}_3^{2-}$ . Полосы поглощения при 1100...1200  $\text{cm}^{-1}$  относятся к валентным колебаниям S–O в группе  $\text{SO}_4^{2-}$ , а при 1400...1500  $\text{cm}^{-1}$  – к иону  $\text{CO}_3^{2-}$  непрореагировавшего  $\text{CaCO}_3$ .

В присутствии  $\text{LiNO}_3$  взаимодействие  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$  с экзотермическим

эффектом начинается, по данным ДТА, при температуре 210 °С. ИК-спектр продуктов взаимодействия принципиально не отличается от представленного на рис. 2. Полосы поглощения валентных колебаний N–O нитрата иона  $\text{NO}_3^-$  находятся в том же диапазоне волновых чисел, что и полосы  $\text{CO}_3^{2-}$ , и на ИК-спектре отдельно не идентифицируются.

В табл. 2 приведен пример первичных экспериментальных данных взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$ .

Таблица 2

Количественные характеристики взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaCO}_3$

| Система                         | Масса образца |        | Количество $\text{LiNO}_3$ в образце |         | Масса адсорбированного $\text{SO}_2$ |        | Емкость по $\text{SO}_2$ , моль $\text{SO}_2$ / моль $\text{CaCO}_3$ |
|---------------------------------|---------------|--------|--------------------------------------|---------|--------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------|
|                                 | г             | моль   | г                                    | моль    | г                                    | моль   |                                                                      |
| $\text{CaCO}_3 - \text{LiNO}_3$ | 0,2030        | 0,0020 | 0,0234                               | 0,00034 | 0,0960                               | 0,0015 | 0,8866                                                               |
| $\text{CaCO}_3$                 | 0,2441        | 0,0024 | –                                    | –       | 0,1366                               | 0,0021 | 0,8748                                                               |

В пересчете на удельные характеристики адсорбционная емкость как активированного, так и неактивированного  $\text{CaCO}_3$  составляет около 200 нормальных литров  $\text{SO}_2$  на 1 кг  $\text{CaCO}_3$ . При этом температура взаимодействия активированного нитратом лития карбоната кальция примерно на 400 °С ниже, чем неактивированного.

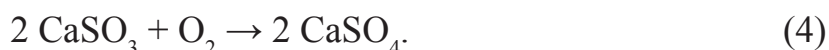
Исходя из полученных данных, взаимодействие  $\text{CaCO}_3$  с  $\text{SO}_2$  в основном происходит по уравнению



Вопрос образования сульфата кальция  $\text{CaSO}_4$  в системе  $\text{CaCO}_3 - \text{SO}_2$  остается открытым. Его образование может быть связано с протеканием ряда следующих реакций:



В присутствии следов кислорода возможна реакция



Реакции (2) – (4) являются экзотермическими и термодинамически возможными.

**Взаимодействие в системе  $\text{CaO} - \text{SO}_2$ .** Оксид кальция в условиях ДТА начинает реагировать с  $\text{SO}_2$  при температуре 385 °С с сильным экзотермическим эффектом (рис. 3, кривая 1).

В присутствии  $\text{LiNO}_3$  взаимодействие начинается при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$  и сопровождается резким экзотермическим эффектом. Массивные образцы из  $\text{CaO-LiNO}_3$ , предварительно разогреты до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  и помещенные в атмосферу чистого  $\text{SO}_2$ , раскаляются докрасна, а температура превышает  $700\text{ }^\circ\text{C}$  (см. табл. 3).

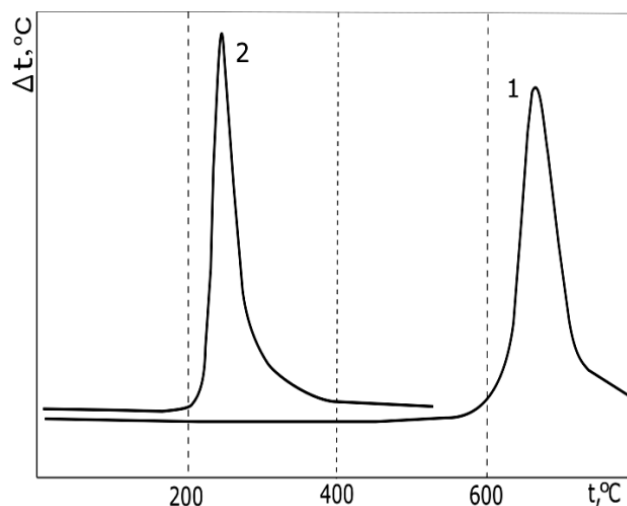


Рис. 3. Кривые дифференциально-термического анализа взаимодействия  $\text{SO}_2$  с  $\text{CaO}$  (1) и системой  $\text{CaO-LiNO}_3$  (2). Содержание  $\text{LiNO}_3$  10 % мольных

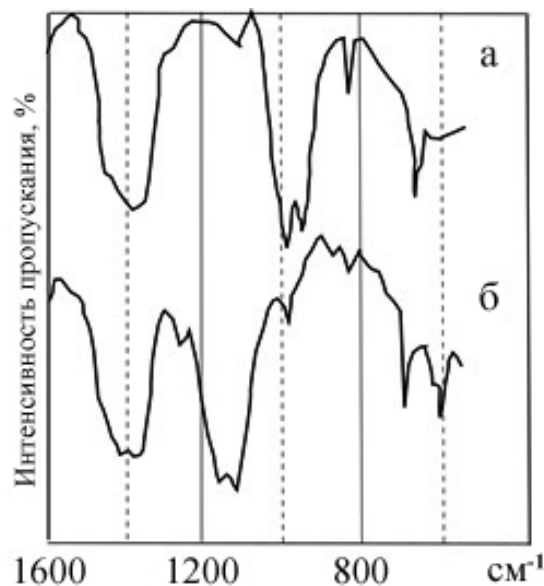


Рис. 4. ИК-спектры механической смеси  $\text{LiNO}_3\text{-CaSO}_3$  (спектр а) при мольном соотношении 1:1 и продуктов ее взаимодействия (спектр б)

На ИК-спектре продуктов реакции присутствуют полосы поглощения  $950\text{...}970\text{ см}^{-1}$ ,  $700\text{...}720\text{ см}^{-1}$ , характерные для связи  $\text{S}=\text{O}$  сульфит-иона. Так же есть полосы поглощения  $1100\text{...}1120\text{ см}^{-1}$ , характерные для связи  $\text{S}=\text{O}$  сульфат-иона.

Обращает на себя внимание следующий факт: несмотря на то, что расчетное

количество адсорбированного  $\text{SO}_2$  должно составлять 1 моль на 1 моль  $\text{CaO}$  или  $\text{CaCO}_3$ , в реальных условиях эта величина (см. табл. 2) меньше. Причем если в случае с  $\text{CaCO}_3$  она приближается к 1, то для  $\text{CaO}$  эта величина существенно меньше. Причина, вероятно, заключается в том, что в случае с  $\text{CaO}$  осуществляется реакция присоединения, что приводит к увеличению плотности образца и затруднению доступа  $\text{SO}_2$  к поверхности  $\text{CaO}$ . В случае с  $\text{CaCO}_3$  (уравнение (2)) взаимодействие представляет собой реакцию обмена без существенного увеличения плотности и пористости образца.

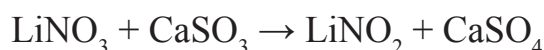
Таблица 3

| Система                      | Масса образца |        | Количество $\text{LiNO}_3$ в образце |         | Прирост массы $\text{SO}_2$ |         | Емкость по $\text{SO}_2$ , моль $\text{SO}_2$ /моль $\text{CaCO}_3$ |
|------------------------------|---------------|--------|--------------------------------------|---------|-----------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------|
|                              | г             | моль   | г                                    | моль    | г                           | моль    |                                                                     |
| $\text{CaO} + \text{LiNO}_3$ | 0,1235        | 0,0022 | 0,0180                               | 0,00026 | 0,0636                      | 0,0010  | 0,4512                                                              |
| $\text{CaO}$                 | 0,1707        | 0,0031 | –                                    | –       | 0,0815                      | 0,00127 | 0,4178                                                              |

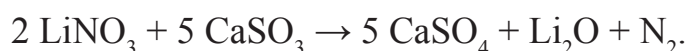
**Взаимодействие в системе  $\text{LiNO}_3\text{--CaSO}_3$ .** Наличие в системе в качестве активатора  $\text{LiNO}_3$  как потенциального окислителя предполагает возможность окисления сульфит-иона  $\text{SO}_3^{2-}$  в сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$ . На рис. 4 (спектр а) представлен ИК-спектр смеси  $\text{LiNO}_3\text{--CaSO}_3$  при мольном соотношении компонентов  $\text{LiNO}_3:\text{CaSO}_3 = 1:1$ . ИК-спектр содержит полосы поглощения при  $1360\text{ см}^{-1}$  и  $836\text{ см}^{-1}$ , характерные для нитрат-иона, а также  $950\text{--}970\text{ см}^{-1}$ , характерные для сульфит-иона. Взаимодействие между компонентами происходит при температуре  $450\text{ }^\circ\text{C}$ .

После взаимодействия системы  $\text{LiNO}_3\text{--CaSO}_3$  в ИК-спектре (рис. 4, спектр б) наблюдаются полосы поглощения при  $1100\text{--}1120\text{ см}^{-1}$ , что характерно для сульфат-иона, и полосы поглощения в области  $1350\text{ см}^{-1}$ , которые относятся к нитрат-иону. Очень слабо проявляются полосы поглощения нитрит-иона при  $1250\text{ см}^{-1}$ .

Полученные данные свидетельствуют о том, что взаимодействие по схеме



практически не протекает либо является промежуточной стадией более глубокого восстановления  $\text{N}^{+5}$ . Тот факт, что в системе состава  $\text{LiNO}_3:\text{CaSO}_3 = 1:1$  после взаимодействия фиксируется только наличие сульфат- и нитрат-ионов, свидетельствует о том, что в реакции участвует лишь некоторая часть нитрата лития с глубокой степенью восстановления  $\text{N}^{+5}$  и образованием соединений, не активных в ИК-области. Этому может соответствовать реакция

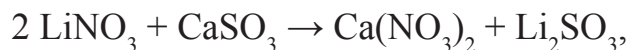


При мольном же соотношении  $\text{LiNO}_3:\text{CaSO}_3 = 1:1$  (5:5) в этом случае будет справедлива схема процесса



при которой часть нитрата лития остается в свободном состоянии. Поскольку  $\text{Li}_2\text{O}$  в исследуемой области спектра не имеет выраженных полос поглощения, то в ИК-спектре будут фиксироваться полосы поглощения, относящиеся к ионам  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Это не противоречит эксперименту.

Для проверки данного предположения было изучено взаимодействие между нитратом натрия  $\text{NaNO}_3$  и сульфитом натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . Замена ионов лития и кальция произведена для исключения артефактов, которые могут наблюдаться в результате обменного взаимодействия типа



затрудняющего интерпретацию результатов.

На кривой ДТА смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  при мольном соотношении 2:5 (рис. 5) кроме эндотермических эффектов близко расположенных фазовых переходов  $\text{NaNO}_3$  при температуре примерно  $300^\circ\text{C}$  наблюдается мощный экзотермический эффект окисления  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  нитратом натрия при температуре  $450^\circ\text{C}$ . В ИК-спектре продукта реакции содержатся только полосы поглощения сульфат-иона.

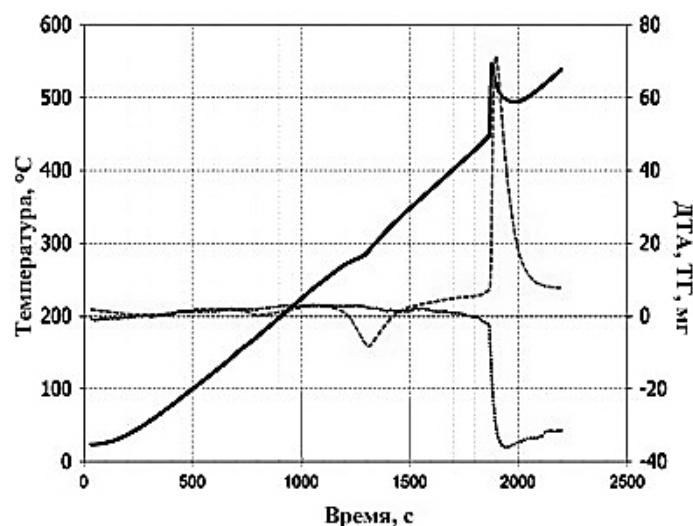
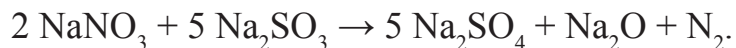


Рис. 5. Кривые ДТА и ТГ взаимодействия смеси  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в мольном соотношении 2:5:

----- ДТА; ———— температура; ..... ТГ, мг

Водный раствор продуктов реакции имеет щелочную среду с  $\text{pH} > 12$ , что обусловлено образованием  $\text{NaOH}$  из  $\text{Na}_2\text{O}$ . Титрованием раствора кислотой установлено преобразование двух молей  $\text{NaNO}_3$  в один моль  $\text{Na}_2\text{O}$ . Потеря массы, по данным термогравиметрии (ТГ), составляет 3,45 %. Полученные данные соответствуют следующей схеме превращения:



Таким образом, взаимодействие  $\text{LiNO}_3$  с  $\text{CaSO}_3$  по схеме (4) подтверждается комплексом экспериментальных данных.

**Выводы.** Нитрат лития – мощный активатор процессов хемосорбции  $\text{SO}_2$  оксидом и карбонатом кальция, снижающий температуру их взаимодействия с диоксидом серы от 200 до 400 °С соответственно. Этот эффект обусловлен малым размером иона  $\text{Li}^+$ , который, диффундируя в кристаллические решетки  $\text{CaO}$  и  $\text{CaCO}_3$ , вызывает их разупорядочение и увеличение реакционной способности. При температуре около 450 °С нитрат-ион в  $\text{LiNO}_3$  восстанавливается соединениями серы  $\text{S}^{+4}$  до азота, а литий образует  $\text{Li}_2\text{O}$ , что снижает подвижность иона  $\text{Li}^+$  и может вызвать уменьшение его активирующих свойств. Вследствие этого температуру адсорбента следует поддерживать до приведенного выше значения. В среде чистого  $\text{SO}_2$  его реакция с  $\text{CaO}$ , активированным нитратом лития, протекает в режиме горения.

С научной точки зрения результаты исследования представляют интерес для разработки методов активации гетерогенных твердофазных систем. Результаты могут быть использованы для разработки эффективных адсорбентов кислых газов.

#### Список литературы / References

1. Соловьев, А.К. Очистка дымовых газов от оксидов серы / А.К. Соловьев, В.О. Михеев, П.С. Пуликов // Вестник Сибирского гос. индустр. ун-та. – 2014. – № 3(9). – С. 33 – 36.

Solovyov A.K., Mikheev V.O., Pulikov P.S. *Ochistka dymovykh gazov ot oksidov sery* [Treatment of flue gases from sulphur oxides]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta – Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2014, no. 3(9), pp. 33-36. (In Russian).

2. Шаповалова, Т.В. Модель взаимодействия в системах  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$  и  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$ – $\text{CO}_2$  / Т.В. Шаповалова, О.В. Куликовская // Научные труды ДонНТУ. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Вып. 15(163). – С. 76 – 86.

Shapovalova T.V., Kulikovskaya O.V. *Model' vzaimodeistviya v sistemakh  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$  i  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$ – $\text{CO}_2$*  [Model of interaction in  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$  and  $\text{LiNO}_3$ – $\text{CaO}$ – $\text{CO}_2$  systems]. *Nauchnye trudy DonNTU. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Proceedings of the Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and chemical technology*, 2010, issue 15(163), pp. 76-86. (In Russian).

3. Куликовская, О.В. Взаимодействие в системе  $\text{CaO}$ – $\text{LiNO}_3$  / О.В. Куликовская, В.В. Шаповалов // Научные труды ДонНТУ. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Вып. 14(162). – С. 57 – 62.

Kulikovskaya O.V., Shapovalov V.V. *Vzaimodeistvie v sisteme  $\text{CaO}$ – $\text{LiNO}_3$*  [Interaction in  $\text{CaO}$ – $\text{LiNO}_3$  system]. *Nauchnye trudy DonNTU. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Proceedings of the Donetsk National Technical*

University. Series: Chemistry and chemical technology series, 2010, issue 14(162), pp. 57-62. (In Russian).

4. База данных «Термические константы веществ». URL: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html> (дата обращения: 23.06.2021).

*Baza dannykh "Termicheskie konstanty veshhestv"* [Data base "Thermal constants of substances"]. Available at: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html> (accessed 23.06.2021).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 23.07.2021

*Valery Vasilyevich Shapovalov, Dr. Sci. (Chem.), professor, department chair;*

*e-mail: wwshapovalov@gmail.com;*

*Yulia Nikolayevna Gannova, Cand. Sci. (Chem.), associate professor; e-mail: gannovaj@mail.ru;*

*Tamara Viktorovna Shapovalova, senior lecturer; e-mail: tv-sh-lova@mail.ru;*

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

*The State Educational Institution of Higher Occupational Education*

*"Donetsk National Technical University"*

*283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09*

## SORBENTS OF SULPHUR DIOXIDE BASED ON $\text{CaO}$ AND $\text{CaCO}_3$ ACTIVATED BY LITHIUM NITRATE

**Purpose.** Generation of the highly active sulphur dioxide chemisorbents based on calcium oxide and calcium carbonate.

**Methods.** Differential thermal analysis for detecting the temperatures of interaction of an activator with the calcium compounds and interaction of the systems with  $\text{SO}_2$ ; infrared spectroscopy for identifying the quality profile of reaction products.

**Results.** There has been detected the sulphur dioxide effective sorption by calcium oxide and calcium carbonate impregnated by lithium nitrate acting as the activator. The temperatures of the interaction onset of  $\text{LiNO}_3\text{--CaCO}_3$  and  $\text{LiNO}_3\text{--CaO}$  systems with sulphur dioxide have been established.

**Scientific novelty.** It has been established for the first time that lithium nitrate ( $\text{LiNO}_3$ ) is the powerful activator of the interaction processes of  $\text{SO}_2$  with  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaO}$ . The activation effect is provided by the small size of  $\text{Li}^+$  ion and its high mobility. The  $\text{Li}^+$  diffusion into  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaO}$  crystal lattices causes their disorder and increase in the reactivity. It has been registered for the first time that the lithium nitrate activating effect in reactions of  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaO}$  with  $\text{SO}_2$  manifests itself at the temperatures of  $\sim 200\text{--}450^\circ\text{C}$  and it is determined by  $\text{N}^{+5}$  nitrate ion atom stability in  $\text{LiNO}_3$  to the recovery by  $\text{S}^{+4}$  sulphur compounds in  $\text{SO}_2$  compounds at the same temperature. At the temperature over  $450^\circ\text{C}$   $\text{SO}_2$  recovers in the activator: the nitrate ion into the nitrite ion at the first stage and further on it is the recovery up to  $\text{N}_2$  and lithium oxide ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) which extricates the activator out of the active form.

**Practical value.** The data on activating capability of lithium compounds in the interaction processes of  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaO}$  with  $\text{SO}_2$  may serve as a basis for development of a new class of sorbents based on calcium compounds activated by alkali salts.

**Keywords:** sulphur dioxide; calcium oxide; calcium carbonate; calcium nitrate; chemisorption; process activation.

**УДК 661.183"ХП-И"**

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

*Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: oszd\_niigd\_1@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*

## **РАЗРАБОТКА ОБЪЕМНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА**

**Цель.** Исследовать процессы массообмена при анализе сорбентов диоксида углерода, применяемых в дыхательной аппаратуре, объёмным методом.

**Методы.** Экспериментальные и расчетные методы исследований.

**Результаты.** Полученные эмпирические данные позволили определить необходимую массу навески сорбента, случайную и систематическую погрешности измерений объёмным методом анализа. Проведенные сравнительные исследования объёмного и манометрического методов анализа подтверждают достоверность результатов.

**Научная новизна.** Обоснованы результаты исследований, которые приняты при разработке методики объёмного метода анализа поглотителей.

**Практическая значимость.** На основе полученных результатов исследований разработана методика анализа сорбентов диоксида углерода объёмным методом, что позволит повысить безопасность работ при определении качества сорбента, применяемого в дыхательных аппаратах.

**Ключевые слова:** сорбент; диоксид углерода; дыхательный аппарат; респиратор; известковый химический поглотитель; массовая доля; химически связанный диоксид углерода.

**Постановка проблемы.** При определении качества известкового химического поглотителя (далее – ХП-И), применяемого в качестве сорбента диоксида углерода в дыхательных аппаратах согласно ГОСТ 6755-88 «Поглотитель химический известковый ХП-И. Технические условия», проводят анализ манометрическим методом, требующим применения ртутного мановакуумметра открытого типа. Использование водяных затворов и улавливателей паров ртути полностью не устраняет опасности заражения лабораторного помещения и отравления работников. Существующие стрелочные и электронные манометры не обеспечивают необходимой точности в требуемом диапазоне.

Поэтому исследование массообмена сорбента в процессе его анализа и разработка методики определения его качества – актуальные вопросы.

**Анализ последних исследований.** Существуют различные методы определения количества диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). В основу этих методов положены химические, физико-химические и физические принципы. Однако из-за низкой концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе во многих методах определения его количества погрешности настолько велики, что превосходят его обычную концентрацию в воздухе.

Институтом биохимии им. А.Н. Баха РАН разработан метод, который в диапазоне концентраций 0,01...0,11 % имеет расхождение между

теоретическими и экспериментально полученными значениями не более 2 %. Данный метод основан на фиксации точки эквивалентности при нейтрализации водного раствора  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  содержащимся в воздухе диоксидом углерода  $\text{CO}_2$  с помощью измерения электропроводности раствора [1]. Для измерения диоксида углерода этим методом разработан прибор, обеспечивающий полное поглощение диоксида углерода раствором гидроксида бария, измерение объёма воздуха, пропускаемого через раствор  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , и измерение электропроводности раствора (рис. 1). Данный метод, несмотря на заявленную простоту, все-таки требует определенного приборного оснащения.

Высокоточные аналитические весы необходимы и при использовании метода определения диоксида углерода по плотности газа. К тому же данный метод имеет определённое ограничение: он применим при наличии в газовой смеси только двух компонентов (диоксида углерода и метана) [2].

Методы определения количества связанного диоксида углерода в разных веществах имеют свои особенности, обусловленные свойствами самого вещества и спецификой технологических процессов, в которых данные методы применяются [3]. Стандартные методы количественного определения связанного диоксида углерода основаны на измерении количества  $\text{CO}_2$ , выделяющегося при разложении карбонатов соляной кислотой [4].

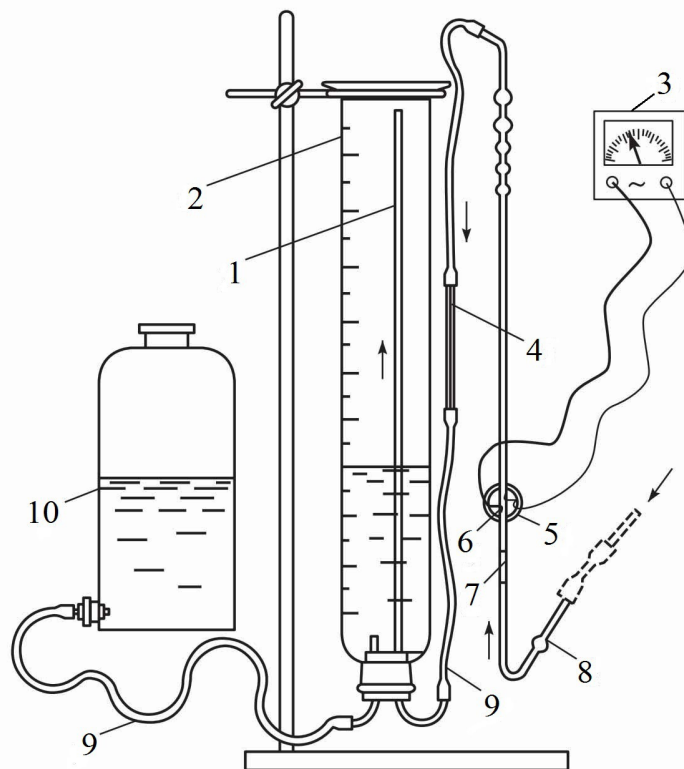


Рис. 1. Прибор для определения диоксида углерода в воздухе [1]:

- 1 – стеклянная трубка внутри цилиндра; 2 – мерный цилиндр; 3 – кондуктометр;  
4 – стеклянный капилляр; 5 – ребра жесткости; 6 – платиновые электроды; 7 – аликвота  
раствора гидроксида бария  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ; 8 – сорбционная трубка; 9 – шланги  
из красной резины; 10 – склянка для уравнивания давления.  
Стрелками указано движение анализируемого воздуха в приборе

При определении количества связанного диоксида углерода гравиметрическим методом после воздействия раствором соляной кислоты на навеску исследуемого вещества происходят разложение карбонатов и образование диоксида углерода, затем выделившийся диоксид углерода поглощается специальным сорбентом. Измерение увеличившейся массы поглотителя  $\text{CO}_2$  позволяет определять значение связанного диоксида углерода. При гравиметрическом методе определения  $\text{CO}_2$  применяют установку, состоящую из реакционной колбы, поглотительной и очистительной систем. Гравиметрический метод определения связанного диоксида углерода предполагает кипение содержимого реакционной колбы в течение 30 мин.

Объёмный метод определения связанного диоксида углерода, в отличие от гравиметрического, не предусматривает нагревания и заключается в измерении объёма диоксида углерода, выделившегося в результате воздействия раствора кислоты на навеску вещества и разложения карбонатов [4].

Разработка методики применения данного метода для анализа ХП-И требовала определения погрешностей измерения, массы навески исследуемого вещества, сравнения с результатами, полученными при использовании манометрического метода, применение которого регламентировано ГОСТ 6755-88.

**Результаты исследований.** Для определения возможности применения объёмного метода для связанного диоксида углерода проведены исследования с поверочной газовой смесью, имеющей регламентированное содержание газообразного диоксида углерода. Для отбора из баллона и ввода в газоаналитический аппарат определённого объёма поверочной газовой смеси использовали приспособление, представленное на рис. 2.



Рис. 2. Приспособление для отбора газовой смеси:

1 – газовый баллон; 2 – клапан тонкой регулировки; 3 – резиновая трубка;  
4 – резиновая камера

Отбор из баллона и ввод в газоаналитический аппарат определённого объёма поверочной газовой смеси производили следующим способом. К баллону с поверочной газовой смесью через клапан тонкой регулировки присоединили резиновую трубку с резиновой камерой.

После открытия вентиля баллона и клапана тонкой регулировки резиновую камеру заполнили поверочной газовой смесью. Затем закрыли вентиль баллона и клапан тонкой регулировки. Иглой шприца прокололи резиновую трубку и отобрали 20 см<sup>3</sup> поверочной газовой смеси. Газовую смесь из шприца через прокол в резиновой трубке ввели в газоаналитический аппарат и провели газовый анализ. Использовали поверочную газовую смесь с концентрацией CO<sub>2</sub> 2,520 %, остальной объём составил азот (N<sub>2</sub>). Таким образом, в пробе объёмом 20 см<sup>3</sup> содержалось 0,504 см<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>.

Аналогично провели исследования с заполнением всей ёмкости шприца (20 см<sup>3</sup>) диоксидом углерода из транспортного баллона (содержание CO<sub>2</sub> в баллоне – не менее 95 %); с заполнением шприца 10 см<sup>3</sup> диоксида углерода из транспортного баллона и 10 см<sup>3</sup> атмосферного воздуха (содержание CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе – около 0,04 %).

Таким образом, в пробе объёмом 20 см<sup>3</sup>, полностью заполненной диоксидом углерода из транспортного баллона, содержалось не менее 19 см<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>, в пробе, содержащей 10 см<sup>3</sup> диоксида углерода и 10 см<sup>3</sup> атмосферного воздуха, – 9,5 см<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (см. табл. и рис. 3).

#### Результаты определения объёма CO<sub>2</sub> в газовых смесях при помощи газоаналитического аппарата

| №  | Поверочная газовая смесь<br>(содержащая<br>2,520 % CO <sub>2</sub> ), см <sup>3</sup> | Газовая смесь<br>(содержащая не менее<br>47,5 % CO <sub>2</sub> ), см <sup>3</sup> | Газовая смесь<br>(содержащая не менее<br>95 % CO <sub>2</sub> ), см <sup>3</sup> |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 0,20                                                                                  | 8,35                                                                               | 13,50                                                                            |
| 2  | 0,30                                                                                  | 8,50                                                                               | 15,70                                                                            |
| 3  | 0,40                                                                                  | 8,10                                                                               | 15,40                                                                            |
| 4  | 0,30                                                                                  | 8,00                                                                               | 15,75                                                                            |
| 5  | 0,35                                                                                  | 8,05                                                                               | 15,80                                                                            |
| 6  | 0,35                                                                                  | 7,90                                                                               | 15,50                                                                            |
| 7  | 0,35                                                                                  | 8,00                                                                               | 15,70                                                                            |
| 8  | 0,35                                                                                  | 7,90                                                                               | 15,70                                                                            |
| 9  | 0,35                                                                                  | 7,90                                                                               | 15,55                                                                            |
| 10 | 0,40                                                                                  | 8,00                                                                               | 15,60                                                                            |

Результаты экспериментальных исследований показали возможность определения диоксида углерода при помощи газоаналитического аппарата. Несколько меньшее значение объёма CO<sub>2</sub> в экспериментальных исследованиях по сравнению с расчётным могло быть обусловлено возможными утечками через иглу шприца из-за невозможности её герметизации. Применение подобного

метода ввода и отбора газовой смеси при помощи шприца описано в ГОСТ Р ИСО 6144-2008 «Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Статический объемный метод». Данный стандарт регламентирует применение газонепроницаемых мерных шприцов с уплотнительными прокладками из политетрафторэтилена.

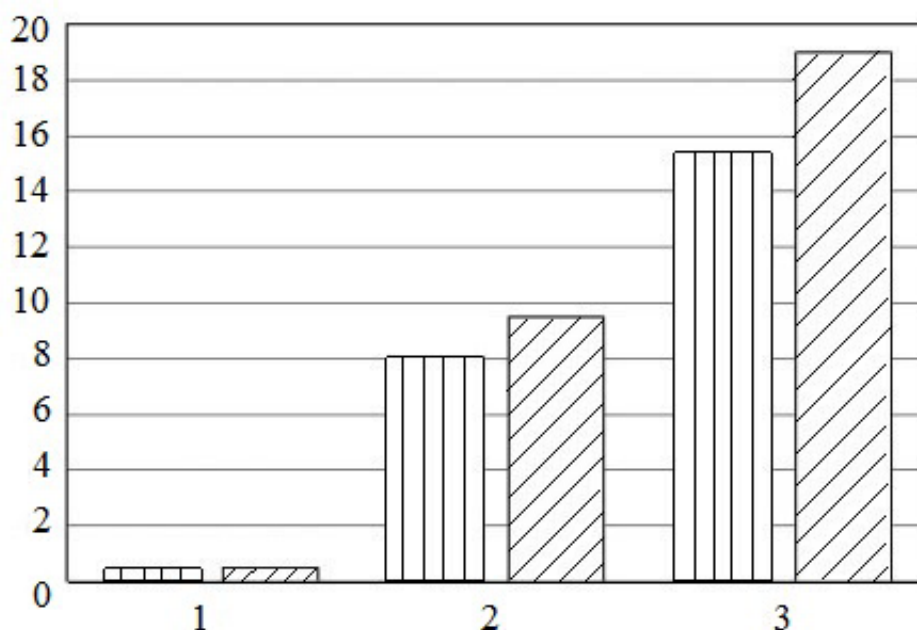


Рис. 3. Сравнение результатов определения объема CO<sub>2</sub> в газовых смесях:

▬ – объёмным методом; ▨ – расчётным методом; 1 – объём поданного диоксида углерода 0,504 см³; 2 – объём поданного диоксида углерода 9,5 см³; 3 – объём поданного диоксида углерода 19 см³

Для исключения влияния негерметичности на результаты анализа были проведены сравнительные исследования выборки, полученной с помощью объёмного метода анализа, и контрольной выборки, в которой содержание связанного диоксида углерода определяли манометрическим методом согласно ГОСТ 6755-88.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. Провели подготовку и отобрали пробы ХП-И. После растирания вещества от пробы отобрали по 1 г ХП-И для определения количества связанного диоксида углерода манометрическим способом и объёмным способом. Аналогично провели исследования с массой навески 0,5 г.

Массовую долю  $x$  связанного диоксида углерода в процентах при использовании объёмного метода вычислили по формуле

$$x = \left( \frac{VK \cdot 1,977 \cdot 100}{1000 \cdot m} \right) / 2,$$

где  $K$  – коэффициент-множитель приведения объёма газа к нормальным условиям (0 °С и 760 мм рт. ст.); определяется по ГОСТ 2939-63 «Газы. Условия для определения объема»;

- $m$  – масса навески ХП-И, г;  
 1,977 – масса 1 дм<sup>3</sup> диоксида углерода при нормальных условиях, г;  
 2 – делитель, обусловленный двойным значением цены деления шкалы измерительной бюретки;  
 $V$  – объём выделившегося из навески ХП-И и поглощенного в аппарате диоксида углерода, см<sup>3</sup>; который определяют по формуле

$$V = V_1 - V_2, \quad (1)$$

где  $V_1$  – первоначальный объём газа в бюретке, см<sup>3</sup>;  
 $V_2$  – объём газа в бюретке после поглощения CO<sub>2</sub>, см<sup>3</sup>.

После определения массовой доли связанного диоксида углерода определяли среднюю разность между выборками с попарно связанными вариантами и выполнили расчет случайной и систематической погрешностей измерения объёмным методом.

Исследования показали, что при массе навески, равной 0,5 г, разница между выборками (полученными с помощью манометрического и объёмного методов) статистически достоверна, то есть невозможно утверждать, что результаты, полученные разными методами, идентичны. При массе навески, равной 1 г, выборки относятся к одной генеральной совокупности, то есть результаты объёмного метода соответствуют результатам манометрического. Такое влияние массы навески на результат определения связанного диоксида углерода может объясняться влиянием случайных погрешностей (изменение температуры, степень герметичности установки), значение которых при малых объёмах анализируемого вещества возрастает.

Расчёт случайной и систематической погрешностей измерения массовой доли связанного диоксида углерода объёмным методом в навеске массой 1 г проводили согласно МИ 2083-90 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей: рекомендация». Полученное значение составного критерия показало нормальное распределение результатов измерения массовой доли связанного диоксида. Доверительные границы случайных погрешностей  $\varepsilon$ , вычисленные в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения», равны 0,0258 %.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения  $\Theta(P)$  (без учета знака) при вероятности  $P$  согласно МИ 2083-90 в общем случае вычисляются по формуле

$$\Theta(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \Theta_i^2},$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом  $m$  составляющих  $\Theta_i$ . При доверительной вероятности  $P = 0,95$  поправочный коэффициент  $k$  принимают равным 1,1;

$b_i$  – частные производные,  $\partial f / \partial a_i$ .

В нашем случае в формуле по определению массовой доли связанного диоксида углерода две переменные: масса навески ХП-И и объём газовой смеси, измеренный газоаналитическим аппаратом. При определении массовой доли связанного диоксида углерода формула (1) приобретает следующий вид:

$$\Theta(P) = k \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial V}\right)^2 \Theta_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial m}\right)^2 \Theta_2^2},$$

где  $\frac{\partial f}{\partial V} = \frac{K \cdot 1,977 \cdot 100}{m \cdot 1000 \cdot 2}, \%$ ;

$$\frac{\partial f}{\partial m} = -\frac{\bar{V}K \cdot 1,977 \cdot 100}{m^2 \cdot 1000 \cdot 2}, \%$$

$\Theta_1$  – систематическая погрешность измерения объёма, %;

$\Theta_2$  – систематическая погрешность измерения массы, %.

В результате вычислений систематическая погрешность  $\Theta(P)$  равна 0,0810. Погрешность результата косвенного измерения оценивают на основе композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей.

Для этого определяют отношение суммы систематических погрешностей и случайной погрешности

$$\frac{\Theta(P)}{S(\bar{x})} = \frac{0,0810}{0,01241} = 6,52.$$

Поскольку для результатов экспериментального определения массовой доли связанного диоксида углерода при помощи объёмного метода  $0,8 \leq \frac{\Theta(P)}{S(\bar{x})} \leq 8,0$ , то доверительную границу погрешности результата косвенного измерения  $\Delta(P)$  вычисляют согласно МИ 2083-90 (без учета знака) по формуле

$$\Delta(P) = K_2(\varepsilon(P) + \Theta(P)),$$

где  $K_2$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и отношения  $\Theta(P)/S(\tilde{A})$ .

В нашем случае  $\Theta(P)/S(\tilde{A}) = 6,52$ .

Согласно п. 2.6.3 МИ 2083-90 (для вероятности  $P = 0,95$ )  $K_2 = 0,79$  при  $\Theta(P)/S(\tilde{A}) = 6$ , и  $K_2 = 0,8$  при  $\Theta(P)/S(\tilde{A}) = 7$ , значение коэффициента  $K_2$  принимаем равным 0,795. Тогда

$$\Delta(P) = 0,795(0,0258 + 0,0810) = 0,084 \text{ \%}.$$

Таким образом, доверительная граница погрешности результата косвенного измерения объёмным методом  $\Delta(P)$  не превышает систематической погрешности манометрического метода, регламентированной ГОСТ 6755-88 на уровне 0,1 %. Следовательно, разработанный объёмный метод определения доли связанного диоксида углерода может иметь применение на практике.

**Выводы.** Экспериментальные исследования показали, что для определения связанного диоксида углерода возможно применение объёмного метода анализа. С помощью проведенных сравнительных испытаний ХП-И объёмным и манометрическим методами определены масса навески, позволяющая получать наиболее объективные результаты, случайная, систематическая и суммарная погрешности результата косвенного измерения.

#### Список литературы / References

1. Малыгин, А.Г. Простой химический метод определения диоксида углерода в воздухе / А.Г. Малыгин, В.Д. Пономарева // Журнал аналитической химии. – 2007. – Т. 62, № 1. – С. 23 – 31.

Malygin A.G., Ponomaryova V.D. *Prostoi khimicheskii metod opredeleniya dioksida ugleroda v vozdukh* [Simple chemical method of detection of carbon dioxide in the air]. *Zhurnal analiticheskoi khimii – Analytical chemistry journal*, 2007, vol. 62, no. 1, pp. 23-31. (In Russian).

2. Дибиров, Я.А. Упрощённый и достоверный метод определения концентраций метана и диоксида углерода в биогазе / Я.А. Дибиров, К.Я. Дибиров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 11-1(77). – С. 42 – 47.

Dibirov Ya.A., Dibirov K.Ya. *Uproshhyonnyi i dostovernnyi metod opredeleniya kontsentratsii metana i dioksida ugleroda v biogaze* [Simplified and reliable method of detection of methane and carbon dioxide concentrations in biogas]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal – International scientific research journal*, 2018, no. 11-1(77), pp. 42-47. (In Russian).

3. Лутков, И.П. Сравнительная характеристика гравиметрического и модифицированного объёмного метода определения диоксида углерода в газированных напитках / И.П. Лутков // Виноградарство и виноделие. – 2018. – Т. 47. – С. 68 – 70.

Lutkov I.P. *Sravnitel'naya kharakteristika gravimetricheskogo i modifitsirovannogo ob'yomnogo metoda opredeleniya dioksida ugleroda v gazirovannykh napitkakh* [Comparative characteristics of the gravimetric and modified volumetric method of detection of carbon dioxide in carbonated soft drinks]. *Vinogradarstvo i vinodelie – Viniculture and wine production*, 2018, vol. 47, pp. 68-70. (In Russian).

4. Самойлик, В.Г. Классификация твердых горючих ископаемых и методы

их исследований: монография / В.Г. Самойлик. – Харьков: Водный спектр Джи-Ем-Пи, 2016. – 308 с.

Samoilik V.G. *Klassifikatsiya tvyordykh goryuchikh iskopaemykh i metody ikh issledovaniy: monografiya* [Classification of solid fossil fuels and methods of their investigations: a monograph]. Kharkov, Vodnyi spektr Dzhi-Em-Pi Publ., 2016, 308 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 10.06.2021

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

*Lyubov Alekseyevna Zborshchik*, senior scientific associate; e-mail: oszd\_niigd\_1@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*

## DEVELOPMENT OF VOLUMETRIC METHOD OF ANALYSIS OF CARBON DIOXIDE SORBENTS

**Purpose.** To investigate the mass exchange processes proceeding during the analysis of the carbon dioxide sorbents used in the breathing apparatus applying the volumetric method.

**Methods.** Experimental and calculation methods of investigations.

**Results.** The obtained empirical data have made it possible to determine the required sample weight of the sorbent, the random and systematic errors of measuring applying the volumetric method of analysis. The conducted comparative investigations of the volumetric and manometric methods of analysis have confirmed the validity of results.

**Scientific novelty.** The results of investigations have been substantiated and taken into account for the development of the volumetric method of analysis of the sorbents.

**Practical value.** Based on the obtained results of the investigations the methodology of the carbon dioxide sorbents analysis by the volumetric method has been developed enabling the improvement of the labor safety during the quality test of the sorbent used in the breathing apparatuses.

**Keywords:** *sorbent; carbon dioxide; breathing apparatus; respirator; chemical lime sorbent; mass fraction; chemically bound carbon dioxide.*

### 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. Подрисовочные 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 сверстанный вариант для просмотра.

Рукописи статей, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

**Статьи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.**

# Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал  
2021, № 3(58)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Редактор А.С. Набиулина

Переводчик Л.А. Ахундова

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*

**Поступившие на издание статьи проходят рецензирование**

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к использованию 25.08.2021.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-60

Объем 6,51 Мб

E-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

**Дата размещения на сайте 26 августа 2021 г.**