



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

№ 4(58)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 4(58). – 126 с.

Изложены результаты исследований в области защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях, техногенной безопасности, предупреждения и тушения пожаров на шахтах, создания горноспасательной техники, спасения людей при подземных авариях. Журнал внесен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (приказ МОН ДНР № 1134 от 01.11.2016).

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	В.В. Мамаев – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	С.П. Греков
д-р техн. наук	С.Е. Гулько
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
д-р мед. наук	В.В. Черкесов
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 8 от 25.11.2021).

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. 4(58)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2021

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2021. – No. 4(58). – 126 p.

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

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

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

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.)	S.Ye. Gul'ko
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V.V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 8 from 25.11.2021).

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., Пейтибай Г.И.,
Галухин Н.А.**
Совершенствование рецептуры
быстротвердеющих смесей
на основе цементного вяжущего

7

Греков С.П., Орликова В.П.
Влияние химической активности угля
на процесс поглощения кислорода

16

**Булгаков Ю.Ф., Дикенштейн И.Ф.,
Мельникова В.В.**

Накопление метана в тупиковых
выработках при их заполнении пеной
во время взрывных работ

28

**Коляда А.Ю., Осадчий А.В.,
Разиньков С.В.**

Пожарная опасность
шахтных кабельных сетей

39

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

**Головченко Е.А., Орликова В.П.,
Момот Д.И.**
Идентификация вида сгорающего
вещества при аварии в угольной шахте

47

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,
Непочатых И.Н., Храпоненко О.В.**
Огнезащита древесины
с помощью состава на основе силиката

56

**Симонов А.М., Карнаух Н.В.,
Агарков Ал.В.**
Мониторинг газовой обстановки
на горных отводах шахт, в зданиях
и сооружениях

65

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

**Ageyev V.G., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A.**

Improvement of formulation
of high-early-strength mixes
based on cement binder

Grekov S.P., Orlikova V.P.
Influence of coal chemical activity
on oxygen absorption process

**Bulgakov Yu.F., Dikenshteyn I.F.,
Melnikova V.V.**
Methane accumulation in blind workings
being foam filled during blasting

**Kolyada A.Yu., Osadchiy A.V.,
Razinkov S.V.**
Fire hazard of mine cable networks

II. Safety in emergencies

**Golovchenko Ye.A., Orlikova V.P.,
Momot D.I.**
Identification of type of burning materials
during accident in coal mine

**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,
Nepochatykh I.N., Khraponenko O.V.**
Fire protection of timber
by silicate-based composition

**Simonov A.M., Karnaukh N.V.,
Agarkov Al.V.**
Monitoring of gas conditions at
claims of coal mines, in buildings and
constructions

Гуржий В.В., Березин А.А.
Совокупные признаки
аварийных режимов работы
в контактных соединениях
электроустановок

77

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

**Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А.,
Францев В.И.**
Малогобаритный шланговый аппарат
для ведения работ
в загрязненных средах

83

Дикенштейн И.Ф., Кравец О.П.
Анализ эффективности осуществления
надзорной деятельности
в сфере пожарной безопасности

92

Иваненко А.Ф., Булатников А.А.
Требования к индивидуальным
устройствам контроля
функционального состояния
горноспасателя

99

Мачикина Д.В.
Проблемы экологической безопасности
предприятий тепловой энергетики
угледобывающих регионов

111

Gurzhiy V.V., Berezin A.A.
Comprehensive characteristics
of emergency operation modes
in contact joints of electrical installations

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

**Pletenetskiy R.S., Zborshchik L.A.,
Frantsev V.I.**
Small-size hose type breathing apparatus
for conducting works
in contaminated environments

Dikenshteyn I.F., Kravets O.P.
Effectiveness analysis of executing
the supervising activity
in the field of fire safety

Ivanenko A.F., Bulatnikov A.A.
Requirements to personal monitoring
devices of mine-rescuer's functional state

Machikina D.V.
Environmental safety problems
of thermal power enterprises
of coal-mining regions

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [622.868.42:622.81]:[691.535+669.162.275.2];
[622.868.42:622.81]:[691.535+662.613.136]

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО

Цель. Совершенствование быстротвердеющих малокомпонентных цементных смесей для сокращения времени набора минимально необходимой прочности.

Методы. Информационно-аналитические исследования быстротвердеющих цементных смесей; экспериментальные исследования минимально необходимой прочности на сжатие образцов-балочек; статистическая обработка эмпирического материала.

Результаты. Разработаны рецептуры цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей для возведения взрывоустойчивых перемычек.

Научная новизна состоит в разработке малокомпонентных цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей, в которых наполнители – отходы промышленного производства (доменный шлак металлургического завода и зола-уноса с электрофильтров теплоэлектростанции) – использованы без предварительной подготовки (в состоянии поставки) с добавкой пластификатора.

Практическая значимость. Сокращение времени сооружения взрывоустойчивых перемычек из разработанных цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей.

Ключевые слова: взрывоустойчивая перемычка; цементные смеси; экспериментальные исследования; прочность; кинетика твердения; сжатие.

Постановка проблемы. Взрывоустойчивыми перемычками изолируют эндогенные пожары на аварийных участках угольных шахт, когда тушение активным способом не приводит к ликвидации пожара на шахтах, опасных по взрывам газа, и для изоляции отработанных добычных участков. Непрерывное литье гипсового раствора в межопалубочное пространство – наиболее прогрессивная из традиционных технологий возведения взрывоустойчивых сооружений. Она основана на гидромеханическом способе возведения взрывоустойчивых гипсовых перемычек с помощью смесительно-нагнетательных агрегатов типа «Монолит». Обобщение опыта возведения и эксплуатации гипсовых перемычек показало недостатки, свойственные гипсу [1, 2, 3]:

- быстрая схватываемость ограничивает дальность подачи гипсового вяжущего;
- низкая влагостойкость приводит к потере прочности гипса в два раза;

- увлажненный гипсовый моноблок склонен к ползучести, вследствие чего под действием собственного веса (без учета горного давления) перемышка оседает и теряет герметичность.

В отличие от гипса смеси на основе цементного вяжущего – водостойкие, однако имеют более длительное время набора прочности на сжатие. Так, дешевые малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси [2] имеют время твердения, при котором прочность на сжатие равна 3 МПа:

- для цементно-шлаковой смеси – 6,5...7,0 ч;
- для цементно-зольной смеси – 15,5...16,0 ч.

Аналогичный показатель для дорогой импортной смеси «Текбленд» равен 2,0 ч, что свидетельствует об имеющемся резерве уменьшения времени набора прочности малокомпонентных цементных смесей с низкой стоимостью.

Анализ последних исследований. Положительный опыт применения быстротвердеющего материала «Текбленд» на шахте ОАО «Южный Кузбасс» описан в работе [1], где приведена технология возведения перемышки путем литья материала «Текбленд» с помощью пенобетонного насоса Mono-WT820 в межопалубочное пространство, ограниченное щитовой опалубкой. Отмечены преимущества такой технологии: подача быстротвердеющей смеси на большие расстояния (до 250 м), высокая производительность (4...5 м³/ч), уменьшение толщины перемышки в два раза, низкая трудоемкость возведения. Указаны и недостатки: повышенные требования к герметичности опалубки, существенная усадка материала «Текбленд», достигающая 40...80 мм, что приводит к разгерметизации аварийного участка после возведения перемышки. В работе [4] путем лабораторных исследований изучен «Текбленд» и определен его состав. Наиболее важный компонент, входящий в состав «Текбленда», – дефицитный и дорогой быстротвердеющий глиноземистый цемент. Из-за нестабильности характеристик в подземных условиях угольных шахт авторы работы [4] отнесли «Текбленд» к материалам ограниченного применения.

Разработке недорогих малокомпонентных цементных смесей с использованием промышленных отходов предприятий посвящена статья [2]. Разработаны цементно-шлаковая и цементно-зольная смеси, получены аппроксимирующие выражения зависимости предела прочности на сжатие от времени твердения. Недостаток состоит в большом времени набора прочности на сжатие. В статье [5] рассмотрена технология возведения перемычек с использованием специализированного состава с активированным микроцементом, который состоит из двух компонентов: микропорошка серого цвета и отвердителя (жидкости) на основе органических веществ. Производство композиционного состава освоено на собственном заводе.

В работе [6] приведен состав специализированного микроцементного порошка:

- портландцемент марки ПЦ-500 – до 45 %;
- золошлаковые отходы – до 50 %;
- добавки (ускорители, стабилизаторы, наполнители) – остальное.

Характерно, что в разработанном цементном составе с целью ускорения

твердения снижено водотвердое отношение до 0,25 при сохранении подвижности смеси, что компенсируется применением пластификаторов. Применяемые добавки не раскрываются. Недостаток состоит в необходимости помола золошлаковых отходов до порошкообразного состояния.

Цель исследования. Совершенствование дешевых малокомпонентных цементных смесей с наполнителем в виде отходов промышленных предприятий для ускорения твердения.

Результаты исследования. После проведенных нами исследований [2, 3] получены малокомпонентные цементно-шлаковая и цементно-золевая быстротвердеющие смеси, в которых использованы отходы промышленного производства: отвальный шлак Донецкого металлургического завода; зола-уноса с электрофильтров Зуевской ТЭС; портландцемент ПЦ-I-500; ускоритель твердения. Предложенные цементные смеси отличаются от известных прежде всего малокомпонентностью и низкой стоимостью. Низкая стоимость обусловлена отсутствием затрат на осуществление энергоемких технологических процессов подготовки исходного сырья (сушка, помол до порошкообразного состояния).

Таким образом, при создании цементных смесей использована идея применения всех компонентов в состоянии поставки, что отличает разработанные быстротвердеющие смеси от уже известных.

Разработанные рецептуры цементно-шлаковой и цементно-золевой смесей взяты за основу для совершенствования быстротвердеющего материала в части сокращения времени набора минимально необходимой прочности на сжатие, что позволит повысить оперативность возведения взрывоустойчивых перемычек из смесей на основе цементных вяжущих.

Один из возможных способов сокращения времени набора прочности цементных смесей – применение добавок-пластификаторов, которые позволят увеличить подвижность цементной смеси исходного состава без увеличения водоцементного отношения [7]. В результате конечные прочностные характеристики цементного материала улучшатся. Например, при получении равноподвижных смесей за счет сокращения расхода воды и, как следствие, уменьшения значения водоцементного отношения в конечном итоге цементная смесь приобретает повышенную прочность и водонепроницаемость. Основываясь на ранее разработанных рецептурах, компонентные составы цементно-шлаковой и цементно-золевой смесей с добавками пластификатора выглядят следующим образом:

- Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : П : 0,3);
- Ц : З : ХК : П : В (7 : 3 : 0,21 : П : 0,4),

где Ц, Ш, ХК, П, В, З – соответственно массовые доли цемента (ЦЭМ I 42,5 ГОСТ 31108-2016), шлака, хлористого кальция, пластификатора, воды, золы-уноса (в скобках указаны численные значения массовых долей).

В качестве пластификатора принят «Пластол Л» – пластифицирующая и ускоряющая твердение добавка.

Методика проведения экспериментальных исследований состояла

в выполнении ряда операций по приготовлению смесей, формированию стандартных образцов-балочек размером $40 \times 40 \times 160$ мм, испытании полученных образцов на специальном оборудовании, обработке и интерпретации эмпирических данных.

Работы проводились согласно ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Компоненты цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей помещали в емкость, добавляли воду с предварительно растворенными в ней хлористым кальцием и пластификатором, тщательно перемешивали механическим способом в течение 5...7 мин. Полученный жидкий раствор заливали в формы для изготовления образцов-балочек ФБС с последующим уплотнением сформованных образцов. Твердение образцов-балочек происходило при температуре окружающей среды $+ (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Предел прочности на сжатие определяли на прессе гидравлического типа ПСУ-10 с точностью измерения $\pm 2 \%$. Предел прочности при изгибе определяли на испытательной машине МИИ-100 с погрешностью показаний $\pm 1 \%$.

Для улучшения растекаемости цементной смеси в межопалубочном пространстве, снижения гидравлического сопротивления при течении через растворопровод, повышения удобоподаваемости в состав рассматриваемой цементной смеси ввели пластификатор «Пластол Л» в количестве 0,9 % от массы цемента. Полученную цементную смесь Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3) подвергли экспериментальным исследованиям. Прочность на сжатие цементной смеси Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3), приведенная в табл. 1, – результат испытаний 72 образцов-балочек. Каждая клетка строки «Прочность на сжатие» соответствует среднему значению шести измерений прочности на сжатие (числу половинок балочек в одной форме ФБС).

Для каждого массива данных, соответствующего длительности твердения 2,0, 2,5, 3,0 ч, находили среднеарифметическое значение, а затем – среднеквадратичное отклонение прочности на сжатие по формуле

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

где S – среднеквадратичное отклонение прочности на сжатие, МПа;

n – число измерений;

σ_i – измеренное i -е значение прочности на сжатие, МПа;

$\bar{\sigma}$ – среднеарифметическое значение прочности на сжатие, МПа.

На основании обработанных экспериментальных данных можно заключить, что прочность на сжатие цементной смеси Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3) равна:

- через 2,0 ч твердения – $(3,0 \pm 1,1)$ МПа;
- через 2,5 ч твердения – $(5,4 \pm 0,7)$ МПа;
- через 3,0 ч твердения – $(7,8 \pm 1,1)$ МПа.

Таблица 1

Прочность на сжатие цементной смеси Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3)

Наименование показателя	Значение показателя в зависимости от времени твердения, ч		
	2,0	2,5	3,0
Прочность на сжатие, МПа	1,9	5,2	6,4
	3,5	5,7	8,4
	4,3	6,2	8,8
	2,3	4,6	7,5
Среднеарифметическое значение прочности на сжатие, МПа	3,0	5,4	7,8
Среднеквадратичное отклонение прочности на сжатие, МПа	1,1	0,7	1,1

Известно, что для сопротивления фронту ударной волны моноблок взрывоустойчивой перемычки должен обладать прочностью на сжатие не менее 3 МПа. Поэтому можно утверждать, что цементная смесь Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3) набирает прочность, достаточную для сопротивления фронту ударной волны, через 2,5 ч твердения (см. рис. 1).

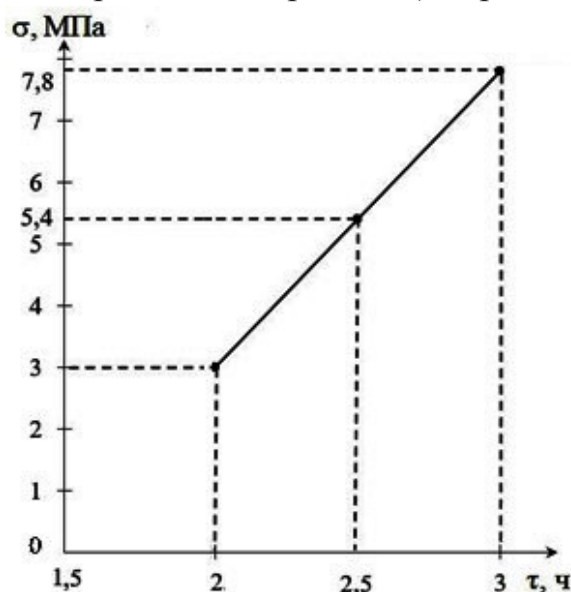


Рис. 1. Кинетика твердения цементной смеси Ц : Ш : ХК : П : В (7 : 3 : 0,28 : 0,06 : 3)

Вторая серия экспериментальных исследований посвящена определению прочности на сжатие цементно-зольной смеси Ц : З : ХК : П : В (7 : 3 : 0,21 : 0,06 : 3,8). Было проведено 144 измерения прочности на сжатие образцов-балочек с зольным заполнителем. Обработаны эмпирические данные и получены среднеарифметические и среднеквадратичные отклонения прочности на сжатие исследуемых образцов. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность на сжатие цементной смеси Ц : 3 : ХК : П : В (7 : 3 : 0,21 : 0,06 : 3,8)

Наименование показателя	Значение показателя в зависимости от времени твердения, ч		
	3,5	4,0	4,5
Прочность на сжатие, МПа	3,2	4,8	4,7
	3,6	4,2	4,6
	3,2	4,3	4,8
	3,6	4,7	5,4
	3,0	3,8	4,8
	3,0	4,0	4,4
	3,0	4,0	4,6
	2,8	3,8	4,4
Среднеарифметическое значение прочности на сжатие, МПа	3,2	4,2	4,7
Среднеквадратичное отклонение прочности на сжатие, МПа	0,3	0,4	0,3

На основании полученных данных (см. табл. 2) заключаем, что прочность на сжатие цементной смеси Ц : 3 : ХК : П : В (7 : 3 : 0,21 : 0,06 : 3,8) равна:

- через 3,5 ч твердения – $(3,2 \pm 0,3)$ МПа;
- через 4,0 ч твердения – $(4,2 \pm 0,4)$ МПа;
- через 4,5 ч твердения – $(4,7 \pm 0,3)$ МПа.

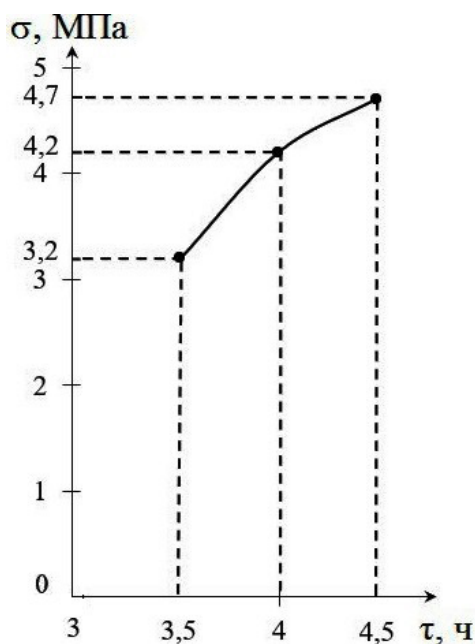


Рис. 2. Кинетика твердения цементной смеси Ц : 3 : ХК : П : В (7 : 3 : 0,21 : 0,06 : 3,8)

Таким образом, минимальное время твердения, при котором моноблок взрывоустойчивой перемычки, выполненной из цементно-зольной смеси, не разрушится при воздействии фронта ударной волны, составляет 3,5 ч, что показано на рис. 2.

Выводы

1. В результате выполненных исследований разработаны малокомпонентные цементно-шлаковая и цементно-зольная смеси с химическим ускорителем твердения, пластификатором и заполнителем в виде промышленных отходов региона (отвальным шлаком металлургического завода и золой-уноса с электрофильтров теплоэлектростанций). Для повышения пластичности разработанных цементных смесей принята дозировка пластификатора 0,9 % от массы цемента, что обеспечивает растекаемость раствора в межопалубочном объеме без присутствия человека.

2. Определено время набора прочности на сжатие 3 МПа (достаточное для сопротивления динамическому воздействию ударной волны):

- для цементно-шлаковой смеси с пластификатором «Пластол Л» – 2,5 ч;
- для цементно-зольной смеси с пластификатором «Пластол Л» – 3,5 ч.

3. Предложенные цементно-шлаковый и цементно-зольный составы не являются конкурирующими, а взаимно дополняют друг друга. Время твердения цементно-шлаковой смеси меньше на 1 ч, а для цементно-зольной смеси расходуют примерно в два раза меньше цемента, что делает ее экономически более выгодной. Поэтому если требуется быстрый ввод в эксплуатацию взрывоустойчивой перемычки, то целесообразно применять цементно-шлаковую смесь. В противном случае лучше использовать более дешевую цементно-зольную смесь.

4. Предложенные цементно-шлаковая и цементно-зольная смеси по скорости набора прочности на сжатие существенно превосходят разработанные ранее в НИИГД «Респиратор» цементные смеси [2]. Так, время набора прочности на сжатие 3 МПа сокращено для:

- цементно-шлаковой смеси в 2,64...2,80 раза;
- цементно-зольной смеси в 4,42...4,57 раза.

Список литературы / References

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

Shundulidi I.A., Chubrikov A.V., Purtov V.A., Korzhov I.B. *Tekhnologiya vozvedeniya izoliruyushhikh, vodoupornykh i vzryvoustoichivykh peremychek na shakhtakh ОАО “Yuzhnyi Kuzbass”* [Construction technology of sealing, water- and blast-resistant stoppings in mines of the ОАО Yuzhnyi Kuzbass]. *Ugol’ – Coal*, 2005, no. 6, pp. 33-35. (In Russian).

2. Пефтибай, Г.И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2018. – № 1. – С. 47 – 52.

Peftibay G.I. *Malokomponentnye bystrotverdeyushhie tsementnye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustoichivyykh peremychek* [Low-component high-early-strength cement mixes for construction of blast-resistant stoppings]. *Vestnik NTs VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti – Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety*, 2018, no. 1, pp. 47-52. (In Russian).

3. Пефтибай, Г.И. Быстротвердеющие цементно-минеральные смеси для возведения взрывоустойчивых шахтных сооружений / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Пожарная и аварийная безопасность: сб. мат-лов XII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году гражданской обороны (Иваново, 29–30 ноября 2017 г.). Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 537 – 540.

Peftibay G.I., Galukhin N.A. *Bystrotverdeyushhie tsementno-mineral'nye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustoichivyykh shakhtnykh sooruzhenii* [High-early-strength cement mineral mixes for erection of blast-resistant mine constructions]. *Pozharnaya i avariinaya bezopasnost': sb. mat-lov XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashhyonnoi Godu grazhdanskoi oborony (Ivanovo, 29-30 noyabrya 2017 g.)* [Fire and emergency safety: collection of papers of the 12th International scientific and practical conference dedicated to the Civil Defence Year, (Ivanovo, November 29-30, 2017)]. *Ivanovo, FGBOU VO Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii Press*, 2017, pp. 537-540. (In Russian).

4. Булат, А.Ф. К выбору строительных смесей для горных технологий / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, Л.В. Левченко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр.; ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 61. – С. 27 – 41.

Bulat A.F., Usachenko B.M., Levchenko L.V. *K vyboru stroitel'nykh smesei dlya gornyykh tekhnologii* [In regards to selection of construction mixes for mining technologies]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhved. sb. nauch. tr.; IGTM im. M.S. Polyakova NAN Ukrainy* [Geotechnical mechanics: interdepartmental collection of scientific papers; M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine]. *Dnepropetrovsk*, 2005, issue 61, pp. 27-41. (In Russian).

5. Нурғалиев, Е.И. Технология скоростного возведения высокопрочных безврубных перемычек с использованием специализированных цементных смесей / Е.И. Нурғалиев, А.Е. Майоров, Г.Н. Роут // Уголь. – 2014. – № 6. – С. 20 – 23.

Nurgaliev E.I., Maiorov A.E., Rout G.N. *Tekhnologiya skorostnogo vozvedeniya vysokoprochnyykh bezvrubovyykh peremychek s ispol'zovaniem spetsializirovannykh tsementnykh smesei* [Technology of rapid erection of no-cut high-strength stoppings utilizing specialized cement mixes]. *Ugol' – Coal*, 2014, no. 6. pp. 20-23. (In Russian).

6. Нурғалиев, Е.И. Реологические характеристики специализированных цементных смесей для комплексной изоляции горных выработок /

Е.И. Нурғалиев, А.Е. Майоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 56 – 64.

Nurgaliev E.I., Maiorov A.E. *Reologicheskie kharakteristiki spetsializirovannykh tsementnykh smesei dlya kompleksnoi izolyatsii gornyykh vyrabotok* [Rheological characteristics of specialized cement mixes for integrated sealing of mine workings]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2018, no. 4, pp. 56-64. (In Russian).

7. Пластифицирующие добавки для бетона: специализиров. произв.-практич. справ. / под ред. В.П. Ложкина. – Калининград: Типография ИП Воронина Е.А., 2013. – 120 с.

Lozhkin V.P. [ed.]. *Plastifitsiruyushhie dobavki dlya betona: spetsializirov. proizv.-praktich. sprav.* [Plasticity agents for concrete: professional manufacturing and practical reference book]. Kaliningrad, Tipografiya IP Voronina E.A. Publ., 2013, 120 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 17.08.2021

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

Georgy Ivanovich Peftibay, 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

IMPROVEMENT OF FORMULATION OF HIGH-EARLY-STRENGTH MIXES BASED ON CEMENT BINDER

Purpose. Improvement of low-component high-early-strength cement mixes for reduction of the minimum early strength gain period.

Methods. Information and analytical investigations of the high-early-strength cement mixes; experimental investigations of the minimum specified compressive strength of the test beams; statistical processing of the empirical material.

Results. The formulations of the cement-slag and cement-ash mixes have been developed for erection of blast-resistant stoppings.

Scientific novelty consists in development of the low-component cement-slag and cement-ash mixes with the fillers, i.e. industrial wastes (furnace slag produced by the metallurgical plant and pulverized fly ash from the heat power plant filters), being utilized without preconditioning (as-received condition) and with the added plasticity agent.

Practical value. Reduction of time for construction of the blast-resistant stoppings made out of the developed cement-slag and cement-ash mixes.

Keywords: *blast-resistant stopping; cement mixes; experimental investigations; strength; hardening kinetics; compression.*

УДК 622.822.225:001.891.572

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, глав. науч. сотр.; e-mail: ober.niigd@list.ru;
Виктория Петровна Орликова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua
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

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ УГЛЯ НА ПРОЦЕСС ПОГЛОЩЕНИЯ КИСЛОРОДА

Цель. Повышение достоверности прогноза эндогенной пожароопасности угля путем установления концентрации поглощенного кислорода на основании полученного аналитического решения задачи хемосорбции окислителя частицами угля определенного размера.

Методы. Математическое моделирование процесса хемосорбции кислорода и апробация полученного решения на экспериментальных данных для углей различной стадии метаморфизма.

Результаты. Установлено влияние степени метаморфизма угля и константы скорости реакции кислорода с адсорбентом на кинетику его поглощения на основе разработанной математической модели.

Научная новизна. Впервые получено аналитическое решение задачи хемосорбции кислорода, которое не только учитывает динамику параметров диффузии и адсорбции, но и позволяет исследовать процесс самонагрева угля при изменении концентрации адсорбата в шахтном воздухе.

Практическая значимость. Аналитическое решение задачи хемосорбции кислорода позволит контролировать развитие процесса самовозгорания углей для предупреждения развития пожароопасной ситуации.

Ключевые слова: *низкотемпературное окисление; хемосорбция кислорода; диффузия; концентрация кислорода; уголь; математическое моделирование.*

Постановка проблемы и её связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Хемосорбция кислорода – одна из стадий низкотемпературного окисления угля, протекающая с выделением теплоты и влияющая на склонность твердого топлива к самовозгоранию. Первый в истории Донбасса эндогенный пожар произошел через год после начала выемки угля, в 1799 г., и до настоящего времени продолжает сопровождать процесс разработки угольных пластов.

Исследования причин и механизмов возникновения и развития эндогенных пожаров, проведенные в НИИГД «Респиратор», позволили установить, что решающая роль в этом процессе принадлежит физико-химическим свойствам угля, главное из которых – скорость окисления при низких температурах, инициирующая выделение теплоты. Кроме того, определено влияние стадии метаморфизма угля, размера его скопления и фракционного состава.

Изучению влияния химической активности углей посвящен ряд работ сотрудников института, основные из которых представлены в монографии [1]. В результате исследования углей как микропористых сорбентов сформулирована математическая задача хемосорбции кислорода и получено ее аналитическое решение в предположении, что протекает необратимая реакция окисления, а процессы тепло- и массообмена на границе потока с поверхностью

пористой частицы подчиняются закону Ньютона–Фурье. Экспериментальные исследования влияния константы скорости окисления угля на процесс его самонагревания проведены при постоянной концентрации окислителя в газовой среде, равной 21 и 100 %, омывающей твердые частицы. Однако в месте шахтного скопления самонагревающегося угля концентрация кислорода может быть ниже 21 %, что при прочих равных условиях уменьшает выделение теплоты и вероятность возникновения пожара.

При исследовании окисления увлажненного угля математическая задача хемосорбции кислорода дополнена участием влаги и показано ее влияние на скорость процесса поглощения окислителя. Результаты получены при постоянной концентрации кислорода, равной 100 %, поэтому не иллюстрируют истинную картину процесса.

Значительный интерес представляют исследования динамики концентрации кислорода в межкусковом пространстве скопления угля, в которых предложено уравнение переноса адсорбтива (воздуха) в глубь скопления частиц угля различной газоносности. Показано, что по пути фильтрации воздуха через угольное скопление концентрация кислорода уменьшается с 9 до 3...5 моль/м³ в зависимости от газоносности угля. Интенсивность снижения существенно зависит от коэффициента диффузии в межкусковом пространстве скопления и скорости фильтрации воздуха, значения которого для частиц угля различного размера рассмотрены в работах [2, 3] и будут использованы в настоящем исследовании.

Резюмируя сказанное, следует, что при изучении сорбции кислорода углями не рассмотрены концентрации кислорода ниже 9,36 моль/м³ и не получено аналитическое решение задачи при совместном влиянии размера скопления и скорости подвигания линии очистного забоя. Кроме того, не учтены значения коэффициента диффузии кислорода в межкусковом пространстве скопления частиц угля.

Таким образом, сформулирована **цель работы** – повышение достоверности прогноза эндогенной пожароопасности угля путем установления концентрации поглощенного кислорода на основании полученного аналитического решения задачи хемосорбции окислителя частицами угля определенного размера.

Результаты исследований. Изучение процесса поглощения кислорода воздуха частицами угля различного размера основано на математической модели, представленной в работе [3]. В ней уголь (адсорбент), в объеме пор которого происходит концентрирование поглощаемого кислорода воздуха (адсорбтива), рассмотрен в виде пористой сферической частицы. Проникновение газа внутрь зерна адсорбента – диффузионный процесс, который определяется изменением концентрации кислорода с течением времени. При моделировании сорбционного процесса принимаем, что реакция окисления – необратимая, второго порядка, продукты которой диффундируют из сорбента.

Дифференциальные уравнения, описывающие сорбционный процесс, приведены в работе [4], и получено аналитическое решение задачи в виде

$$\bar{C}(\rho, Fo_g) = Bi_g \sum_{i=1}^l \frac{\sin \mu_k \rho}{\rho s'_{\mu_k}} \sum_{n=1}^3 \frac{\exp(p_{kn} Fo_g)}{\mu_{kn}} \times \int_0^{Fo_g} [\bar{C}_1(Fo_g) - \bar{C}_0] \exp(-p_{kn} Fo_g) dFo_g + \bar{C}_0; \quad (1)$$

$$\bar{a}_i(\rho, Fo_g) = Ka_i \exp(-Ka_i Fo_g) \times \int_0^{Fo_g} \bar{C}(\rho, Fo_g) \exp(Ka_i Fo_g) dFo_g + \bar{a}_0 \exp(-Ka_i Fo_g), \quad (2)$$

где $s'_{\mu_k} = (-1)^k (\mu_k^2 + Bi_g^2 - Bi_g) / \sqrt{(Bi_g - 1)^2 + \mu_k^2};$ (3)

$$\mu_{kn} = -\frac{1}{2\mu_k} \left[1 + \sum_{i=1}^l \frac{\gamma_i Ka_i^2}{(p_{kn} + Ka_i + \Gamma_i)^2} \right]; \quad (4)$$

p_{kn} – корни уравнения, равные

$$p_{kn} = -\frac{Ka_i(1 + \gamma_i) + \Gamma_i + \mu_k^2}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{Ka_i(1 + \gamma_i) + \Gamma_i + \mu_k^2}{4} \right]^2 - [\gamma_i Ka_i \Gamma_i + \mu_k^2 (Ka_i + \Gamma_i)]}; \quad (5)$$

μ_k – корни уравнения $\operatorname{tg} \mu = -\mu / (Bi_g - 1)$ [3]; (6)

B_k – постоянные коэффициенты, определяемые из соотношения

$$B_k = \frac{6Bi_g^2}{\mu_k^2 (\mu_k^2 + Bi_g^2 - Bi_g)}; \quad (7)$$

C_0 – концентрация кислорода в порах угля в газовой фазе, моль/м³, при $\tau = 0$;

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

γ_i – константа Генри;

Fo_i – диффузионный критерий Фурье;

Bi_g – диффузионное число Био.

В выражениях (1) – (7) приняты следующие безразмерные параметры:

$$Ka_i = \frac{\beta_{li} R_1^2}{D}; \quad \rho = \frac{r}{R_1}; \quad Fo_g = \frac{D\tau}{R_1^2}; \quad \Gamma_i = \frac{ka^* R_1^2 \xi S_{уд}}{D S_{вн}}; \quad Bi_g = \frac{\beta R_1}{D}; \quad (8)$$

$$\bar{C} = \frac{C}{C_0}; \quad \bar{a}_i = \frac{a_i}{\gamma_i C_c}; \quad \bar{C}_1(Fo_g) = \frac{C_1(\tau)}{C_0},$$

где β_{li} – коэффициенты адсорбции, с⁻¹;

β – коэффициент массообмена, м/с;

r – радиальная координата, м;

R_1 – радиус частицы угля, м;

D – коэффициент внутренней диффузии, м²/с;

τ – время, с;

k – константа скорости реакции окисления, м³/(моль·с);

a^* – концентрация адсорбента, моль/м³;

ξ – часть реакционной поверхности угля, участвующей в реакции окисления;

$S_{уд}$ – удельная реакционная поверхность угля, м²/кг, зависящая от выхода летучих веществ V^{daf} , %, и равная

$$S_{уд} = -0,45(V^{daf})^2 + 18,4V^{daf} + 44,8; \quad (9)$$

$S_{вн}$ – внешняя поверхность угля, м²/кг;

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

C_0 – концентрация адсорбтива (кислорода) в газовой фазе при $\tau = 0$, моль /м³;

$C_1(\tau)$ – текущая концентрация кислорода в газовой фазе на границе с зерном адсорбента, моль/м³.

Для установления концентраций кислорода \bar{C} и \bar{a}_i согласно уравнениям (1) и (2) необходимо определить интегралы с учетом изменения концентрации кислорода в окружающей частицы угля газовой фазе $\bar{C}_1(For_g)$. Поэтому воспользуемся результатами исследований [2] динамики концентрации кислорода при отработке пластов прямым порядком с полным обрушением пород кровли, в которых установлена следующая зависимость:

$$C_\tau = 9,3 \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} \omega \tau), \quad (10)$$

из которой запишем выражение для значения относительной концентрации кислорода возле скопления угля, подверженного самонагреванию, в виде

$$B = \frac{C_\tau}{C_0} = \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} x), \quad (11)$$

где ω – скорость подвигания линии очистного забоя, м/сут;

τ – время, сут;

x – расстояние места скопления угля от линии очистного забоя, м.

Динамика текущей концентрации кислорода в межкусковом пространстве скопления самонагревающегося угля зависит от газоносности пласта Q_0 , м³/т, следующим образом [2]:

$$\frac{C_1(\tau)}{C_0} = 1 - \exp\left(-\frac{0,76\bar{\tau}}{0,83 + Q_0\rho_y}\right), \quad (12)$$

где ρ_y – плотность угля, т/м³;

$\bar{\tau}$ – время, безразмерная величина, равная

$$\bar{\tau} = A\tau = \left(\frac{u}{x_1} + \frac{D_1}{x_1^2} \right) \tau, \quad (13)$$

u – скорость потока воздуха через скопление угля, м/с;

x_1 – расстояние по длине скопления угля от места поступления в него воздуха, м;

D_1 – коэффициент диффузии кислорода в межкусковом пространстве угля, м²/с, зависящий от радиуса частиц угля и скорости воздуха и равный $D_1 = 0,384(2uR_1)^{1,162}$ [4].

Подставляя выражение (13) в (12) и используя диффузионный критерий Фурье Fo_g , получим

$$\frac{C_1(\tau)}{C_0} = 1 - \exp\left(-M \frac{Fo_g R_1^2}{D}\right), \quad (14)$$

$$\text{где } M = \frac{0,76}{0,83 + Q_0 \rho_y} \left(\frac{u}{x_1} + \frac{D_1}{x_1^2} \right), \text{ с}^{-1}. \quad (15)$$

С учетом выражения (11) запишем

$$\bar{C}_1(Fo_g) = B \left[1 - \exp\left(-M \frac{Fo_g R_1^2}{D}\right) \right] = B [1 - \exp(-z Fo_g)], \quad (16)$$

$$\text{где } z - \text{ комплексный безразмерный параметр, равный } z = \frac{MR_1^2}{D}. \quad (17)$$

Значение \bar{C}_0 в начальный момент времени принимаем равным нулю, поэтому интеграл в выражении (1) запишем в виде

$$\begin{aligned} \int_0^{Fo_g} \bar{C}_1(Fo_g) \exp(-p_{kn} Fo_g) dFo_g &= B \int_0^{Fo_g} [1 - \exp(-z Fo_g)] \exp(-p_{kn} Fo_g) dFo_g = \\ &= B \int_0^{Fo_g} \exp(-p_{kn} Fo_g) - \exp[-(z + p_{kn}) Fo_g] dFo_g = \\ &= B \left[-\frac{1}{p_{kn}} \exp(-p_{kn} Fo_g) + \frac{1}{z + p_{kn}} \exp[-(z + p_{kn}) Fo_g] \right] \Big|_0^{Fo_g} = \\ &= B \sum_{n=2}^2 \left[\frac{1}{p_{kn}} \{1 - \exp(-p_{kn} Fo_g)\} + \frac{1}{z + p_{kn}} \{ \exp[-(z + p_{kn}) Fo_g] - 1 \} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставим выражения (11) и (18) в уравнения (1) и (2) и усредним по р следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{C} = g_i - \left\{ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^2 \frac{\exp(p_{kn} Fo_g)}{\mu_{kn} p_{kn}} \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} x) \times \right. \\ \left. \times \sum_{n=1}^2 \left[\frac{1}{p_{kn}} \{1 - \exp(-p_{kn} Fo_g)\} + \frac{1}{z + p_{kn}} \{ \exp[-Fo_g (z + p_{kn})] - 1 \} \right] \right\}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\bar{a}_i(\rho, Fo_g) = g_i \frac{Ka_i}{Ka_i + \Gamma_i} \left\{ 1 - \exp[-Fo_g (Ka_i + \Gamma_i)] \right\} -$$

$$- \left\{ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^2 \frac{Ka_i [\exp(p_{kn} Fo_g) - \exp(-Ka_i Fo_g)]}{\mu_{kn} p_{kn} (Ka_i + p_{kn})} \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} x) \times \right. \quad (20)$$

$$\left. \times \sum_{n=1}^2 \left[\frac{1}{p_{kn}} \{ 1 - \exp(-p_{kn} Fo_g) \} + \frac{1}{z + p_{kn}} \{ \exp[-Fo_g (z + p_{kn})] - 1 \} \right] \right\},$$

$$\text{где } g_i = \frac{B_k \mu_k^2}{\mu_k^2 + \gamma_i Ka_i \Gamma_i / (Ka_i + \Gamma_i)}. \quad (21)$$

Для определения комплексного параметра z по выражению (17) с учетом (15) принимаем, что $x_1 = 1$ м [5], поэтому запишем

$$z = \frac{MR_1^2}{D} = \frac{0,76}{0,83 + Q_{0\rho y}} (u + D_1) \frac{R_1^2}{D}. \quad (22)$$

Учитывая, что процессы адсорбции и десорбции описываются аналогичными уравнениями, для нулевого приближения коэффициента адсорбции кислорода β_{1i} можно использовать зависимость коэффициента десорбции метана из газонасыщенных углей в виде [3]

$$\beta_{1i} = a(\tau_n + 1)^n, \quad (23)$$

где $a = 0,0135(V^{daf})^{0,81}$;

$n = 0,0001(V^{daf})^2 - 0,0081V^{daf} - 0,6504$;

τ_n – время от начала обнажения пласта, с.

Значение коэффициента массообмена β установим, используя уравнение Т. Шервуд, Р. Пигфорд и Ч. Уилки, которое получено при пропускании газа с низкой скоростью через твердые частицы, в виде

$$\frac{\beta d_p}{D} = \left(4 + 1,21 \text{Pe}^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

где d_p – диаметр сферической частицы, м;

Pe – число Пекле, равное $\text{Pe} = \frac{d_p \bar{u}}{D}$;

\bar{u} – усредненная по времени скорость в направлении оси x , м/с.

Используя результаты ранее проведенных хроматографических исследований угля различной стадии метаморфизма, по уравнению (24) для $d_p = 0,2$ м определен коэффициент массообмена, равный $1,95 \cdot 10^{-6}$ м/с.

Подставляя соответствующие значения в выражения (19) и (20), определим относительную концентрацию кислорода $\bar{a} = a_i / \gamma_i C_c$ в неподвижной фазе твердых частиц радиусом $R_1 = 0,1$ м при $C_0 = 9,3$ моль/м³ в течение периода, равного пороговому значению комплексного показателя склонности угля

к самовозгоранию. В качестве объекта исследования выбраны угли различной стадии метаморфизма, распространенные в Донбассе и охватывающие диапазон от тощих до жирных. Физико-химические и механические параметры углей, полученные значения критериев адсорбции и химической реакции, а также концентрации кислорода, адсорбированного на твердой поверхности $a_{\text{адс}}$ и прореагировавшего $a_{\text{хим}}$ для $\tau = 30$ сут, представлены в таблице.

Анализ полученных результатов показывает, что из общего количества адсорбированного кислорода только его часть вступает в химическую реакцию. При этом для всех анализируемых углей $a_{\text{адс}}$ снижается по мере уменьшения выхода летучих веществ, чего нельзя сказать о концентрации $a_{\text{хим}}$, которая представляет собой сложную величину, зависящую от физико-химических и кинетических параметров.

Результаты данного исследования позволяют рассмотреть динамику параметра $a_{\text{хим}}$, моль/м³ (рис. 1), из которой следует замедление роста концентрации кислорода в неподвижной фазе у всех исследуемых углей после 20 сут протекания процесса. Для углей марки Т (шахты «Холодная Балка» и им. С.М. Кирова) значения концентрации прореагировавшего кислорода значительно ниже, что можно объяснить влиянием стадии метаморфизма твердого топлива на процесс его окисления. Подтверждением данного влияния является зависимость, представленная на рис. 2,а, показывающая рост прореагировавшего кислорода с увеличением выхода летучих веществ угля.

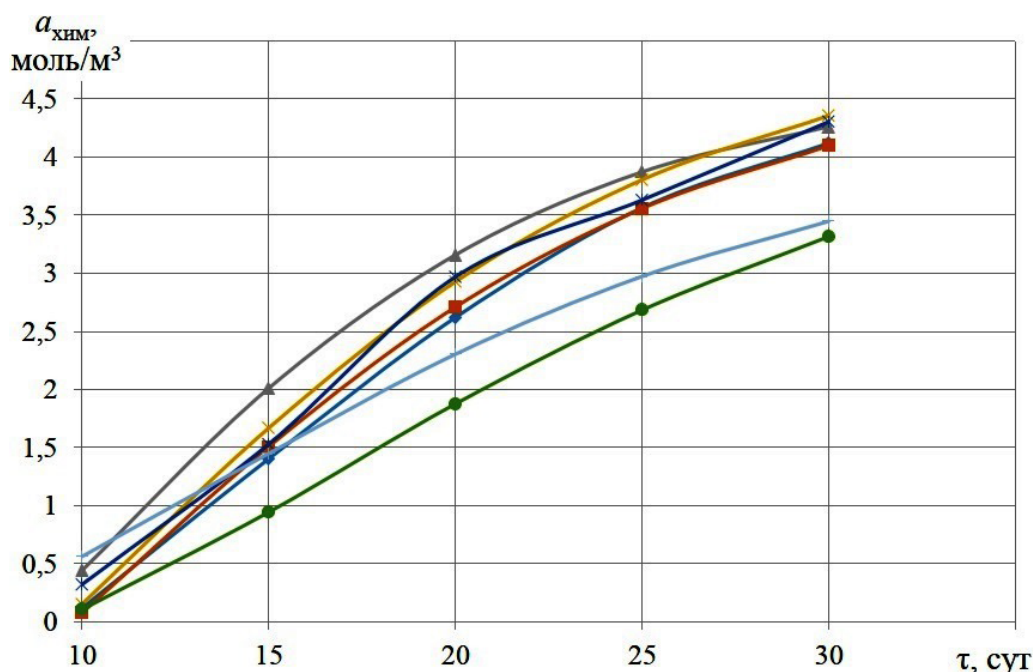


Рис. 1. Динамика концентрации прореагировавшего кислорода в неподвижной фазе угля:

- ▲ – им. А.Ф. Засядько; ● – им. С.М. Кирова; ◆ – Щегловская-Глубокая;
- – Горняк-95; × – УГЛЕКОМ; ж – Рудник 4-21; + – Холодная Балка

Результаты исследования хемосорбции угля различной стадии метаморфизма при $\tau = 30$ сут

Шахта, пласт марка	V^{daf} , %	Др	a_c , моль/м ³	$k \cdot 10^9$, м ³ /(с·моль)	T, К	$S_{уд}$, м ² /кг	ξ	γ	Ka	Γ	\bar{a}	Концентрация кислорода, моль/м ³	
												$a_{адс}$	$a_{хим}$
Им. А.Ф. За- сядько, m_3 , Ж	35	40,8	107083,3	4,968	361,0	137,6	0,0054	4,0	0,188	0,21	0,115	15,708	4,263
Рудник 4-21, h_7 , Жк	32	8,4	107500,0	0,996	368,8	172,8	0,0059	2,8	0,186	0,059	0,165	15,714	4,304
УГЛЕКОМ, m_3 , Ж	31	26,9	108333,0	2,061	361,5	182,8	0,0061	3,5	0,186	0,133	0,134	15,713	4,357
Щегловская- Глубокая, l_3 , К	26	30,3	116666,7	0,888	333,0	219,0	0,0067	3,0	0,192	0,081	0,152	15,691	4,230
Горняк-95, k_8 , К	22	21,3	115000,0	1,612	343,0	231,8	0,0068	3,5	0,204	0,157	0,126	15,640	4,098
Холодная Балка, h_{10} , Т	13	12,2	114000,0	1,430	333,0	208,0	0,0064	2,5	0,246	0,117	0,148	15,400	3,447
Им. С.М. Ки- рова, h_{10} , Т	9	8,3	114166,7	1,168	380,0	174,0	0,0059	2,4	0,258	0,073	0,149	15,319	3,315

Несмотря на разброс экспериментальных данных, аналогичный вид зависимости установлен для параметра, характеризующего способность угля к измельчению, – дробимости (рис. 2,б).

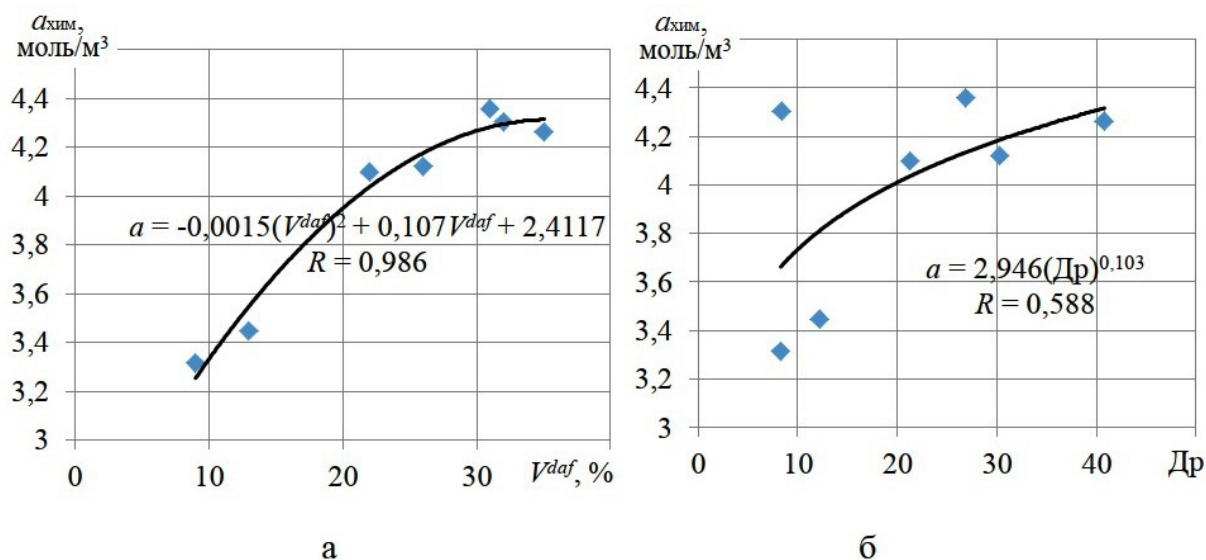


Рис. 2. Зависимость концентрации поглощенного кислорода от выхода летучих веществ угля (а) и дробимости (б)

Данный параметр связан с реагирующей поверхностью угля, поэтому на рис. 3 представлена зависимость, подтверждающая результаты ранее проведенных исследований [6, 7] и показывающая, что максимальные значения $S_{уд}$ характерны для углей средней стадии метаморфизма (см. табл.).

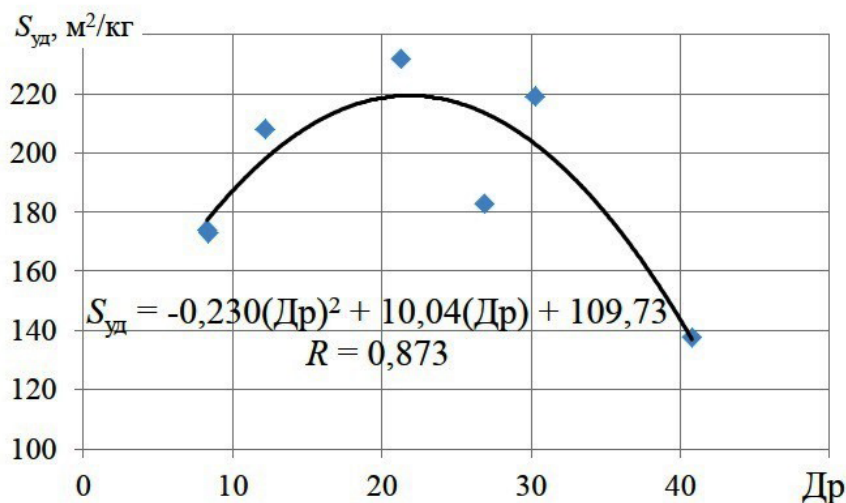


Рис. 3. Зависимость реагирующей поверхности угля от дробимости

В связи с тем, что в данной работе особое внимание уделено хемосорбции кислорода, рассмотрим параметр Γ , определяющий химическую активность угля. В соответствии с формулой (8) параметр Γ зависит не только от поверхности угля, участвующей в реакции окисления (рис. 4,а), но и от константы скорости этой реакции (рис. 4,б).

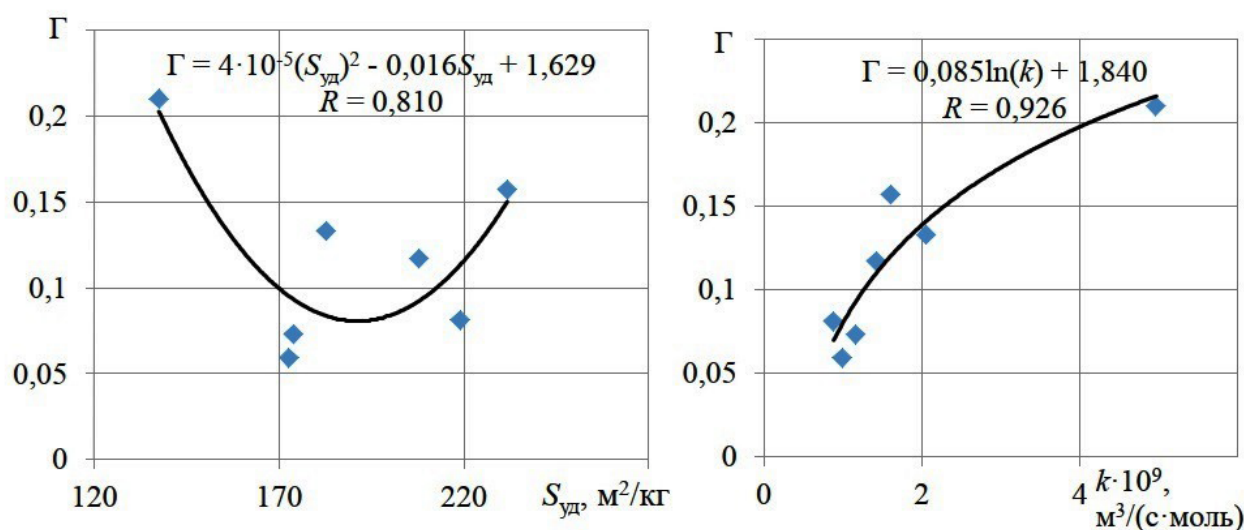


Рис. 4. Зависимость химической активности кислорода от реагирующей поверхности угля (а) и константы скорости окисления (б)

Необходимо отметить, что константа скорости реакции установлена в условиях хроматографического опыта и соответствует критической температуре самовозгорания угля, выше которой изменяется механизм взаимодействия кислорода с углем.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Получено аналитическое решение задачи хемосорбции кислорода частицами угля определенного размера при совместном влиянии динамики концентрации окислителя в шахтном воздухе и параметров диффузии и адсорбции этого процесса. На примере углей различной стадии метаморфизма рассчитаны значения концентрации адсорбированного и прореагировавшего кислорода и проведен анализ влияния различных параметров на определяемую величину. Установлены зависимости, показывающие влияние степени измельчения угля на процесс хемосорбции кислорода и, следовательно, на развитие самонагревания. Поэтому перспективное направление дальнейших исследований – изучение параметров данного процесса и экспериментальное апробирование результатов для частиц угля различного фракционного состава.

Список литературы / References

1. Агеев, В.Г. Профилактика эндогенной пожароопасности: монография / В.Г. Агеев, П.С. Пашковский, С.П. Греков. – Донецк, 2020. – 592 с.
Ageyev V.G., Pashkovskiy P.S., Grekov S.P. *Profilaktika endogennoi pozharoопасnosti: monografiya* [Prevention of spontaneous fire hazard: monograph]. Donetsk, 2020, 592 p. (In Russian).
2. Греков, С.П. Кинетика адсорбции кислорода газонасыщенными углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журн. – Новокузнецк, 2021. – № 7. – С. 341 – 345.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Kinetika adsorbtsii kisloroda gazonasyshhennymi uglyami* [Kinetics of oxygen adsorption by gas-saturated coal]. *Naukoyomkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: nauch. zhurn.* [Science-driven technologies of exploitation and utilization of mineral resources: scientific journal]. Novokuznetsk, 2021, no. 7, pp. 341-345. (In Russian).

3. Греков, С.П. Коэффициенты диффузии метана в углях разных степеней метаморфизма / С.П. Греков, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 3(57). – С. 84 – 91.

Grekov S.P., Vsyakiy A.A. *Koeffitsienty diffuzii metana v uglyakh raznykh stepenei metamorfizma* [Coefficients of methane diffusion in coal of different metamorphic grades]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 3(57), pp. 84-91. (In Russian).

4. Греков, С.П. Определение коэффициентов диффузии кислорода в поры угля на основе изотерм адсорбции / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 3(58). – С. 17 – 23.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Opredelenie koeffitsientov diffuzii kisloroda v pory uglya na osnove izoterm adsorbtsii* [Determination of coefficients of oxygen diffusion into coal pores on the basis of adsorption isotherms]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 3(58), pp. 17-23. (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).

6. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах: монография / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.

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

7. Развитие процесса низкотемпературного окисления углей / П.С. Пашковский, С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 153 – 167.

Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Orlikova V.P., Vsyakiy A.A. *Razvitie protsessa nizkotemperaturnogo okisleniya uglei* [Development of coal low-temperature oxidation process]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": sb. nauch. tr.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": collection of scientific papers]. Donetsk, 2015, issue 52, pp. 153-167. (In Russian).

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Viktoriya Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate;
e-mail: orlikova.69@yandex.ua

*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*

INFLUENCE OF COAL CHEMICAL ACTIVITY ON OXYGEN ABSORPTION PROCESS

Purpose. Improvement of accuracy of coal spontaneous fire hazard prediction by determination of the adsorbed oxygen concentration based on the obtained analytical solution of the problem of oxidizing agent chemisorption by size-defined coal particles.

Methods. The mathematical modeling of the oxygen chemisorption process and testing of the obtained solution on the experimental data for coal of the different metamorphic grades.

Results. The influence of the coal metamorphic grade and the rate constant of oxygen reaction with adsorbent on its adsorption kinetics based on the developed mathematical model has been established.

Scientific novelty. The novel analytical solution of the oxygen chemisorption problem has been obtained with allowance not only for the dynamics of the diffusion and adsorption parameters but also for the investigation of the coal spontaneous combustion process during the adsorbate concentration variation in mine air.

Practical value. The analytical solution of the oxygen chemisorption problem will facilitate a monitoring of the development of the coal spontaneous combustion process for prevention of a fire hazard situation.

Keywords: *low-temperature oxidation; oxygen chemisorption; diffusion; oxygen concentration; coal; mathematical modeling.*

УДК [622.411.33:622.235]:614.842.615

Юрий Фёдорович Булгаков, д-р техн. наук, проф., зав. каф.; e-mail: byf@mine.donntu.org
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»

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

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-40

Виктория Владимировна Мельникова, ассистент; e-mail: viksuta@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»

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

НАКОПЛЕНИЕ МЕТАНА В ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ ИХ ЗАПОЛНЕНИИ ПЕНОЙ ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

Цель. Обоснование параметров взрывобезопасной подачи пены при взрывных работах в тупиковых горных выработках.

Методы. Классические уравнения газообмена в призабойном пространстве тупиковой горной выработки.

Результаты. Рассмотрена модель образования взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси в тупиковой проходческой выработке. Установлена аналитическая зависимость изменения концентрации взрывоопасной среды по мере продвижения пенной пробки в призабойное пространство тупиковой выработки.

Научная новизна. Предложена математическая модель накопления метана в тупиковых горных выработках с учетом источников его выделения.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применены для выбора параметров подачи пены в очистной забой, позволяющих предотвратить возникновение взрывоопасной среды.

Ключевые слова: тупиковая проходческая выработка; взрывные работы; призабойное пространство; пенный поток; концентрация метана.

Постановка проблемы. Интенсификация процесса угледобычи связана с ростом газообильности горных выработок угольных пластов и вмещающих горных пород.

Метан поступает в выработки вследствие его выделения с поверхности угольного пласта, вмещающих пород и из отбитого угля при проведении взрывных работ. При этом концентрация метана в рудничной атмосфере может оказаться больше предельно допустимой, при которой обеспечивается безопасность труда горнорабочих.

Наиболее опасны по накоплению метана тупиковые выработки, бункеры, купола и другие застойные слабо проветриваемые полости. Заполнение таких полостей метаном зависит от скорости его выделения и скорости вентиляционного потока.

Поэтому прекращение вентиляции тупиковых выработок может приводить к их загазованию, взрывам и пожарам.

Отсутствие безопасных подходов к очагу пожара, угроза взрыва метановоздушной смеси осложняют локализацию и ликвидацию пожаров в тупиковых выработках. В настоящее время в них происходит до 12 % всех экзогенных пожаров. До 90 % пожаров в тупиковых выработках происходит в призабойной зоне при нарушении вентиляции.

В начальный период аварии используют воздушно-механическую пену высокой кратности, подавая ее по вентиляционному трубопроводу в забой тупиковой горной выработки. Обладая смачивающей способностью и высокой устойчивостью, пена, заполняя выработку, будет эффективно локализовать и тушить пожар.

По мере продвижения пенного потока к забою уменьшается свободный объем призабойного пространства, повышается метановыделение с обнаженных поверхностей и из отбитого угля вследствие их нагревания продуктами сгорания. Кроме того, очаг пожара действует на передний фронт пенного потока, увеличивая его разрушение. Все это приводит к образованию взрывоопасных зон и возможному взрыву метановоздушной смеси, в связи с чем процесс заполнения пеной тупиковой выработки становится опасным.

Вследствие этого возникает необходимость исследования процесса образования взрывоопасной среды в призабойном пространстве тупиковой горной выработки с очагом пожара при подаче пены, когда из-за нагрева поверхностей увеличивается метановыделение, уменьшается свободный объем тупикового забоя, а передний фронт пенного потока разрушается под действием высокой температуры и синерезиса. Необходимость определения параметров подачи пены диктуется той опасностью, которую представляет собой газозагазованная смесь с содержанием метана, превышающим критическое значение.

Данная задача может быть разбита на ряд менее сложных сопряженных задач:

- образование взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси при подаче пены в забой;
- нагрев поверхностей призабойного пространства при возникновении в нем очага горения;
- температурное воздействие на передний фронт пенного потока продуктами горения;
- дистанционная подача пены в призабойное пространство тупиковой выработки.

В данной работе мы рассмотрим первую из обозначенных задач.

Анализ последних публикаций. Аналитические и экспериментальные исследования накопления метана в горных выработках проведены многими авторами (А.Д. Алексеев, А.П. Алексеев, В.Г. Агеев, В.К. Костенко, Г.П. Стариков, С.П. Греков и др.).

В работе [1] рассмотрено накопление метана в призабойных пространствах тупиковых выработок, бункерах, куполах и других застойных полостях угольных шахт, однако в приведенной модели отсутствует связь между метановыделением и размерами выработки.

В работе [2] оценено влияние горных работ на метановыделение из угольного пласта, а в статье [3] – выделение метана из горных выработок закрывающихся шахт на земную поверхность.

В работах [4, 5] рассмотрено метановыделение из угля, отбитого при проведении буровзрывных работ [5].

В работе [6] исследованы слоевые накопления метана в очистных забоях.

Изложение основного материала. С помощью математической модели опишем закономерность создания взрывоопасной среды в тупиковой проходческой выработке с прямоугольным сечением S , равным

$$S = b \cdot h,$$

где h – высота выработки, м;

b – ширина выработки, м.

Выработку проводят буровзрывным способом по породе и угольному пласту мощностью m , м. Вмещающие породы – газоносные.

При каждом «отпале» призабойное пространство тупиковой выработки (от выходного сечения вентиляционного трубопровода до очистного забоя) заполняют воздушно-механической пеной высокой кратности для предупреждения вероятных взрывов и пожаров.

Уравнение переноса метана в классическом выражении имеет вид [4, 5]

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация метана, %;

τ – промежуток времени от момента нарушения режима проветривания выработки до настоящего времени, с;

u, v, w – проекции скорости вентиляционного потока на осях координат, м/с;

x, y, z – продольная, вертикальная и поперечная координаты в горной выработке, м;

D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии газа в направлении соответствующих координат, м²/с.

Направим оси координат следующим образом: ось x – вдоль оси движения вентиляционного потока, ось y – от кровли к почве, ось z – от середины сечения выработки к одной из боковых стенок (рис. 1).

Поверхность выработки воздухонепроницаема, поэтому принимаем

$$v|_{y=0} = v|_{y=h} = w|_{z=-b/2} = 0. \quad (2)$$

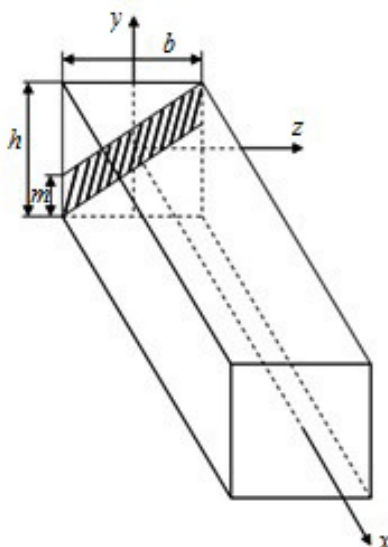


Рис. 1. Система координат в тупиковой выработке

Примем для боковых поверхностей выработки диффузный поток метана на кровле, почве и боковых стенках выработки

$$\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = -j_k; \quad \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \Big|_{y=h} = -j_n; \quad (3)$$

$$\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \Big|_{z=-b/2} = -j_6; \quad \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \Big|_{z=b/2} = -j_6, \quad (4)$$

где j_k, j_n, j_6 – соответственно интенсивность источников газовыделения из кровли, почвы и боковых стенок, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

При рассмотрении общей загазованности выработок среднюю по поперечному сечению концентрацию метана можно представить в виде двойного интеграла

$$\tilde{C}(x, \tau) = \frac{1}{bh} \int_0^h \int_{-b/2}^{b/2} C(x, y, z, \tau) Dy Dz,$$

где \tilde{C} – средняя по поперечному сечению концентрация метана, %.

Принимая вертикальную составляющую скорости воздуха равной нулю ($v = 0$) и интегрируя уравнение (1) дважды по y и z , получим

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \frac{\partial(u\tilde{C})}{\partial x} + \frac{1}{b} \left[\frac{1}{h} \int_0^h (wC) \Big|_{-b/2}^{b/2} Dy \right] \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_y \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \left[\frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \Big|_0^h Dz \right] + \frac{1}{b} \left[\frac{1}{h} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \Big|_{-b/2}^{b/2} Dy \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ полученного уравнения (5) показывает, что второе и третье слагаемые, стоящие в левой его части, представляют собой конвективные потоки, а в правой части уравнения – диффузионные потоки газа, заданные на стенках выработки граничными условиями (2) – (4). Поэтому сумма всех интегралов в уравнении (5), перенесенных в правую часть, представляет собой в общем виде функцию

$$i(x, \tau) = \frac{1}{b} j_{\text{пл}} + \frac{1}{h} (j_k + j_n),$$

где $j_{\text{пл}}$ – плотность потока метана, м/с.

Эта функция i , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$, – суммарная для всех источников газовыделения в единице объема выработки. В таком случае уравнение переноса газа (5) в одном направлении принимает вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dx \frac{\partial C}{\partial x} \right) + i(x, \tau).$$

Интенсивность источника выделения метана связана с процессами перехода газа из связанного состояния в свободное (десорбция). При этом, чем частицы угля меньше, тем быстрее должен быть вынос метана.

Согласно модели, разработанной в статьях [1, 4, 5], в угле метан находится в газообразном состоянии, в трещинах, открытых порах и каналах – в адсорбционном состоянии, а в блоках угля, не нарушенных открытой пористостью, – в виде твердого раствора. Массоперенос метана в угле имеет диффузно-фильтрационный механизм. Метан, содержащийся в блоках угля и в закрытых порах, поступает в фильтрационное пространство путем твердотельной диффузии, а его истечение в призабойное пространство выработки происходит путем фильтрации.

Благодаря этой модели удалось установить [1, 4, 6], что для угольного пласта и для крупных фракций угля (более 1 мм) плотность потока метана через единицу обнаженной поверхности составляет

$$j_{\text{пл}}(\tau) = j_{\text{уг}}(\tau) = \bar{P}_{\text{пл}} \sqrt{\gamma_e \frac{D_f}{60\pi\tau}}, \quad (6)$$

где $j_{\text{пл, уг}}(\tau)$ – плотность потока метана, м/с;

$\bar{P}_{\text{пл}}$ – отношение пластового давления метана к атмосферному давлению;

D_f – коэффициент диффузии метана в угле, $\text{м}^2/\text{с}$;

γ_e – пористость;

$$\gamma_e = \gamma + \nu(1 - \gamma) \left(1 - \gamma_0 + \frac{\gamma_0}{\gamma} \right),$$

γ_0 – открытая пористость;

γ – закрытая пористость;

υ – растворимость.

Концентрация метана в общем случае разнородна, различна в разных местах тупиковой выработки. Однако в результате взаимной диффузии и быстрого механического перемешивания содержание компонентов метановоздушной смеси выравнивается в доли минуты, исходя из этого, можно говорить о среднеобъемной (по призабойной зоне) концентрации метана $\bar{C}(\tau)$.

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации метана в призабойной зоне, примет вид

$$V(\tau) \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = j_{\text{пл}} S_{\text{пл}} + j_{\delta} (S - S_{\text{пл}}) + j_{\delta} S_{\delta} + j_k S_k + j_n S_n + j_{\text{уг}} S_{\text{уг}},$$

где $V(\tau) = S(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)$ – изменяющийся во времени объем призабойного пространства, м³;

$L_{\text{вент}}$ – расстояние от конца вентиляционного трубопровода до забоя, м;

$V_{\text{пен}}$ – скорость движения пенного потока по выработке, м/с;

$S_{\text{пл}} = m \cdot b$ – площадь угольного пласта, м²;

$S_k(\tau) = b(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)$ – площадь кровли, м²;

$S_n(\tau) = b(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)$ – площадь почвы, м²;

$S_{\delta}(\tau) = 2h(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)$ – площадь боковых стенок призабойного пространства, м²;

$S_{\text{уг}}(\tau)$ – площадь на почве, занимаемая отбитым углем, м².

Принимаем, что по мере продвижения пенного потока пена покрывает часть поверхности призабойного пространства и выделение метана с нее прекращается. Принимаем, что отбитый при предыдущих циклах буровзрывных работ уголь рассыпан от груди забоя до вентиляционного трубопровода на половине ширины выработки.

$$\begin{aligned} S(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau) \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} &= j_{\text{пл}} mb + j_{\delta} (S - mb) + j_k b(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau) + \\ &+ j_n b(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau) + 2hjS(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau), \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} &= \frac{(j_k + j_{\text{уг}})b}{S} + \frac{2j_{\delta}h}{S} + \frac{S_{\text{уг}}mb}{S(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)} + \frac{j_{\delta}(S - mb)}{S(L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau)}, \end{aligned} \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) по времени с начальным условием $\tau = 0$; $\tau(0) = C_0$, получим

$$\bar{C}(\tau) = C_0 + \frac{(j_k + j_{\text{уг}})b}{S} \tau + \frac{2j_{\delta}h}{S} \tau + \frac{j_{\text{уг}}mb + j_{\delta}(S - mb)}{SV_{\text{пен}}} l_n \left[\frac{L_{\text{вент}}}{L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau} \right]. \quad (8)$$

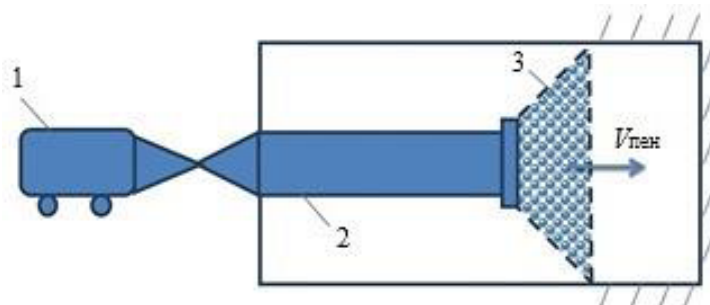


Рис. 2. Схема подачи пены в призабойное пространство тупиковой горной выработки:

1 – пеногенераторная установка; 2 – вентиляционный трубопровод; 3 – пенный поток

Если принять, что интенсивность газовыделения из кровли, почвы и боков выработки равная, то имеем: $j_k = j_n = j_b = j_{\text{вм.п}}$, тогда из выражения (8) получим

$$\bar{C}(\tau) = C_0 + \frac{(j_{\text{вм.п}} + j_{\text{уг}})b\tau}{S} + \frac{2j_{\text{вм.п}}h}{S}\tau + \frac{j_{\text{уг}}mb + j_{\text{вм.п}}(S - mb)}{SV_{\text{пен}}}\ln\left[\frac{L_{\text{вент}}}{L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau}\right], \quad (9)$$

где $j_{\text{вм.п}}$ – интенсивность газовыделения из вмещающих пород, $\text{м}^3/\text{с}$.

Если выработку проходят по негазоносным породам и источники метановыделения – только пласт угля и отбитый уголь, то уравнение (9) примет вид

$$\bar{C}(\tau) = C_0 + \frac{j_{\text{уг}}b\tau}{S} + \frac{j_{\text{пл}}mb}{SV_{\text{пен}}}\ln\left[\frac{L_{\text{вент}}}{L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau}\right]. \quad (10)$$

Задавая $\bar{C}(\tau) = 2\%$, уравнения (10) получим в неявной форме зависимость расчета времени образования взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси в призабойном пространстве

$$\bar{C}(2\%) = C_0 + \frac{j_{\text{уг}}b\tau_{\text{взв}}}{S} + \frac{j_{\text{пл}}mb}{SV_{\text{пен}}}\ln\left[\frac{L_{\text{вент}}}{L_{\text{вент}} - V_{\text{пен}}\tau}\right], \quad (11)$$

где $\tau_{\text{взр}}$ – время образования взрывоопасной концентрации метана.

Скорость пенного потока, заполняющего выработку, можно определить по известному критериальному уравнению

$$H_0 = ARe^n, \quad (12)$$

где $H_0 = \frac{L_{\text{п}}}{d_{\text{вент}}}$ – критерий гомохронности;

$L_{\text{п}}$ – дальность подачи пены по вентиляционному трубопроводу, м;

$d_{\text{вент}}$ – диаметр вентиляционных труб, м;

A – эмпирические коэффициенты;

Re – критерий Рейнольдса.

По результатам проведенных экспериментов для вентиляционных труб диаметром 500...600 мм получена зависимость

$$L_{\Pi} = 9V_{\text{пен}}^2 d_{\text{вент}}^3, \quad (13)$$

откуда скорость пенного потока

$$V_{\text{пен}} = \sqrt{\frac{\pi d_{\text{вент}}^2 L_{\Pi}}{4S \cdot 9d_{\text{вент}}^3}} = \sqrt{\frac{\pi L_{\Pi}}{36S d_{\text{вент}}}}. \quad (14)$$

Таким образом, зная метанообильность отбитого угля и угольного пласта, размеры тупиковой выработки, толщину угольного пласта и количество отбитого угля, по уравнениям (11) и (14) можно рассчитать время создания взрывоопасной концентрации метана в призабойном пространстве при подаче в него пенного потока во время проведения буровзрывных работ.

Для представленных значений параметров: $C_0 = 30$; $D_f = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\gamma_e = \gamma = 0,3$; $h = 3,0$ м; $b = 3,5$ м; $m = 1,5$ м; $S = 10,5$ м²; $Q_{\text{пен}} = 600$ м³/ч [6], рассчитываем по зависимостям (6), (11) – (14) изменение со временем концентрации метана в призабойном пространстве (рис. 3).

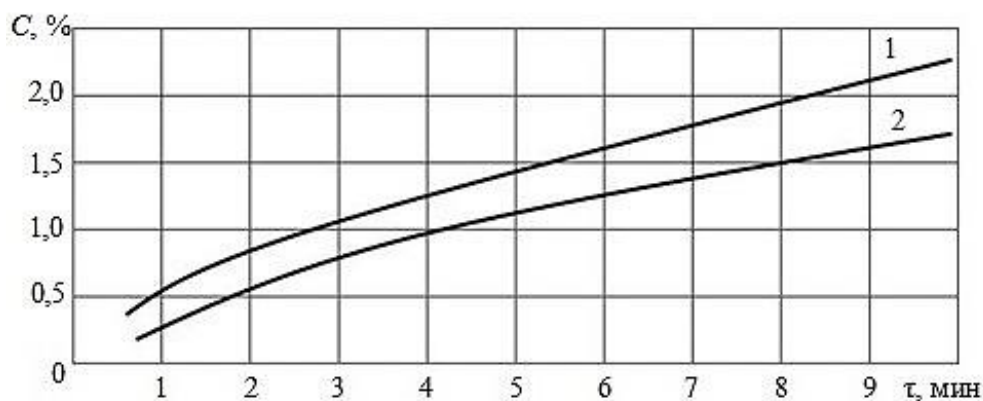


Рис. 3. Зависимость концентрации метана в призабойном пространстве проходческой выработки C , %, от времени заполнения его пеной τ :

$$1 - V_{\text{пен}} = 1,0 \text{ м/мин}, 2 - V_{\text{пен}} = 2,0 \text{ м/мин}$$

Условия взрывобезопасной подачи пены

$$\tau_{\text{под}} < \tau_{\text{взр}} \quad (15)$$

или

$$V_{\text{пен}} > \frac{L}{\tau_{\text{взр}}}, \quad (16)$$

где $\tau_{\text{под}}$ – время заполнения пеной призабойного пространства.

При небольших значениях скорости пенного потока ($V_{\text{пен}} \leq 1,0$ м/мин) в призабойном пространстве усиливается (до его заполнения пеной) взрывоопасная концентрация метана, создается угроза взрыва.

Выводы. Исследован процесс образования метановоздушной смеси в призабойном пространстве тупиковой горной выработки при подаче пены во время проведения взрывных работ. Регулирование газовой обстановки возможно путем варьирования расстояния подачи пены и скорости пенного потока.

Список литературы / References

1. Накопление метана в тупиковых выработках и бункерах угольных шахт / А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Г.В. Кирик [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 262 – 269.

Alekseev A.D., Fel'dman E.P., Kirik G.V. [et al]. *Nakoplenie metana v tupikovykh vyrabotkakh i bunkerakh ugol'nykh shakht* [Methane accumulation in blind workings and bunkers of coal mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' – Mining informational and analytical bulletin*, 2008, no. 3, pp. 262-269. (In Russian).

2. Костенко, В.К. Особенности выделения метана из газоносного массива под влиянием горных работ / В.К. Костенко, А.Б. Бокий // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Метан вугільних родовищ України». – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 88. – С. 264 – 270.

Kostenko V.K., Bokii A.B. *Osobennosti vydeleniya metana iz gazonosnogo massiva pod vliyaniem gornykh rabot* [Specifics of methane release from the gas-bearing massif under mining influence]. *Heotekhnichna mekhanika: mizhvid. zb. : nauk. prats': materialy VI mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Metan vuhil'nykh rodovyskh Ukrainy"* [Geotechnical mechanics: interdepartmental collection of scientific papers: materials of the 6th International scientific and practical conference "Methane of Ukraine's coal deposits"]. Dnepropetrovsk, 2010, issue 88, pp. 264-270. (In Russian).

3. Стариков, Г.П. Оценка времени накопления опасной концентрации метана в замкнутых объемах, расположенных на территории горных отводов закрытых шахт / Г.П. Стариков, А.А. Подрухин, Я.В. Шажко // Сборник материалов XII междунар. науч.-практ. конф. «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 22–23 ноября 2017 г.). – Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 2017. – С. 322-1 – 322-5.

Starikov G.P., Podrukhin A.A., Shazhko Ya.V. *Otsenka vremeni nakopleniya opasnoi kontsentratsii metana v zamknutykh ob'yomakh, raspolozhennykh na territorii gornykh otvodov zakrytykh shakht* [Estimation of accumulation period of hazardous methane concentration in confined volumes situated at the territory of mine takes of closed mines]. *Sbornik materialov XII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti predpriyatii v promyshlenno razvitykh regionakh"*

(Kemerovo, 22-23 noyabrya 2017 g.) [Collection of materials of the 12th International scientific-practical conference “Safety of enterprises in industrially developed regions” (Kemerovo, November 22-23, 2017)]. Kemerovo, FGBOU VO “Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbachyova” Press, 2017, pp. 322-1 – 322-5. (In Russian).

4. Агеев, В.Г. Газовыделение из отторгнутого от массива угля и формирование взрывоопасных зон при внезапных выбросах угля и газа в тупиковых горных выработках / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 16. – С. 137 – 144.

Ageyev V.G., Grekov S.P., Zinchenko I.N. *Gazovydelenie iz ottorgnutogo ot massiva uglya i formirovanie vzryvoopasnykh zon pri vnezapnykh vybrosakh uglya i gaza v tupikovykh gornykh vyrabotkakh* [Gas emission from coal separated from the massif and formation of potentially explosive areas during sudden outbursts of coal and gas in blind mine workings]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. tr.* [Engineering physics problems of mining: collection of scientific papers]. 2013, issue 16, pp. 137-144. (In Russian).

5. Греков, С.П. Моделирование переходных газодинамических процессов на добычных участках при изменениях режимов дегазации и вентиляции / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, А.Л. Иванников // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2011. – № 960. – Вип. 16. – С. 95 – 103.

Grekov S.P., Zinchenko I.N., Ivannikov A.L. *Modelirovanie perekhodnykh gazodinamicheskikh protsessov na dobychnykh uchastkakh pri izmeneniyakh rezhimov degazatsii i ventilyatsii* [Modeling of gas-dynamic processes in transition at production areas during variations of degassing and ventilation modes]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V.N. Karazina. Serii: Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia – Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: Mathematical modeling. Information technologies. Automated control systems*, 2011, no. 960, issue 16, pp. 95-103. (In Ukrainian).

6. Прогноз времени образования опасной концентрации метана в очистных забоях / А.П. Алексеев, Э.П. Фельдман, Г.П. Стариков [и др.] // Уголь Украины. – 2010. – № 7. – С. 29 – 32.

Alekseev A.P., Fel'dman E.P., Starikov G.P. [et al]. *Prognoz vremeni obrazovaniya opasnoi kontsentratsii metana v ochistnykh zaboyakh* [Prediction of time of hazardous methane concentration formation in breakage faces]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2010, pp. 29-32. (In Russian).

Yuri Fyodorovich Bulgakov, Dr. Sci. (Tech.), professor, head of chair; e-mail: byf@mine.donntu.org
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09

Igor Feliksovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: 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) 332-78-40

Viktoriya Vladimirovna Melnikova, assistant; e-mail: viksuta@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

METHANE ACCUMULATION IN BLIND WORKINGS BEING FOAM FILLED DURING BLASTING

Purpose. Substantiation of explosion-proof foam supply parameters during blasting in the blind mine workings.

Methods. Classical equations of gas exchange in a face space of the blind mine working.

Results. The model of generation of an explosive concentration of methane-air mixture in the blind working has been considered. The analytical dependence of a variation of the explosive environment concentration during the foam plug advance into the blind working face space has been established.

Scientific novelty. The mathematical model of methane accumulation in the blind mine workings has been proposed taking into account methane emission sources.

Practical value. The obtained results may be applied for selection of the foam delivery parameters into a breakage face that make it possible to prevent an explosive environment formation.

Keywords: *blind mine working; blasting; face space; foam stream; methane concentration.*

УДК 621.316.9:[614.841.245:621.315.2]

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

Андрей Васильевич Осадчий, ст. науч. сотр.; e-mail: osad4iy58@mail.ru;

Сергей Викторович Разиньков, инж. 2-й кат.; e-mail: sergey_razinkov-84@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-39, 332-78-40*

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ШАХТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Цель. Оценка пожарной опасности шахтных кабельных сетей и выбор путей её снижения.

Методы. Информационно-аналитические исследования пожарной опасности шахтных кабельных сетей.

Результаты. Предложен метод сравнения времятоковых характеристик фидерного автомата защиты и кабельной продукции.

Научная новизна. Впервые установлена зависимость для расчета времятоковой характеристики кабельной продукции. Разработана схема мониторинга температуры внутри фидерного автомата защиты.

Практическая значимость. Обеспечение пожаровзрывобезопасности автоматов защиты, входящих и отходящих кабельных линий.

Ключевые слова: пожаробезопасность; электропроводка; петля «фаза-нуль»; автомат защиты; времятоковая характеристика.

Постановка проблемы. Примерно половина пожаров в угольных шахтах происходит из-за неправильной эксплуатации электрических кабельных сетей. Причинами их становятся возгорание гибких кабелей вследствие некачественных соединений (18,6 %), механических повреждений (16,9 %) и перегрузок (10,2 %) [3].

В НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР были исследованы показатели пожароопасности гибких электрических кабелей, используемых в шахтах. С помощью метода кислородного индекса определяли горючесть материалов оболочек кабелей. Значение индекса колебалось в пределах 12,5...33,8 %. Это означает, что для изготовления оболочек наряду с защищенными от воздействия огня материалами использованы незащищенные, пожароопасные.

Установлено, что повышение температуры оболочки, вызванное увеличением тока нагрузки в жилах, способствует распространению пламени по поверхности кабеля на значительное расстояние. Так, при трехкратной перегрузке температура нагрева токоведущих жил достигает 300 °С, а поверхности оболочки кабеля – 100 °С.

Низкий уровень пожаробезопасности можно объяснить рядом факторов:

- неудовлетворительное техническое состояние находящихся в эксплуатации электрических сетей низкого напряжения;
- недостаточная степень защиты электроприборов и несоответствие их стандартам безопасности;

- отсутствие эффективного контроля безопасной эксплуатации электроустановок;
- несоблюдение правил пожарной безопасности при эксплуатации электроприборов и низкая эффективность электрической защиты от аварийных режимов.

Анализ последних публикаций. Анализ работ [1 – 3] показал, что в действующих технических нормативных правовых актах, регламентирующих выбор аппаратов защиты от перегрузок и токов короткого замыкания в кабельных изделиях и электропроводах, не учтена температура проводника, до которой он успеет нагреться к моменту отключения. По данным работы [3], до 17 % пожаров возникает по этой причине даже при наличии защиты.

Цель исследования. Оценка пожарной опасности шахтных кабельных сетей и выбор путей её снижения.

Изложение основного материала. Наиболее распространенные причины пожарной опасности электропроводки – перегрузки и короткие замыкания.

Повышенную перегрузку кабельной линии до срабатывания защитного отключения или термического повреждения жилы кабеля можно приравнять к короткому замыканию.

Как правило, в месте короткого замыкания возникает переходное сопротивление из-за неплотного контакта, окисной пленки, обугленного изоляционного материала и т.д. Этот вид короткого замыкания называют неполным. В некоторых случаях переходные сопротивления столь незначительны, что ими можно пренебречь. Эти короткие замыкания – металлические. При металлическом коротком замыкании и отсутствии защиты пожар возникает при воспламенении изоляции в кабельной линии из-за значительной величины тока короткого замыкания.

В отличие от металлического неполные короткие замыкания даже при правильно выбранной защите приводят к пожарам из-за несрабатывания автоматов защиты.

В основном неполные короткие замыкания возникают при появлении токов утечки. Замыкания на землю могут быть особо пожароопасными, так как образовавшийся контур заземления имеет большую протяженность и может проходить через зону расположения легковоспламеняющихся материалов. Вследствие большого сопротивления цепи замыкания прохождение тока ограничивается и защита не срабатывает, при этом увеличивается пожарная опасность.

Основная причина возникновения коротких замыканий – повреждение изоляции токоведущих частей при эксплуатации вследствие старения, повышенных напряжений шахтной электрической сети, механических разрушений, влияния агрессивной окружающей среды, отсутствия регулярной обтяжки контактов автоматов.

Тепловой износ изоляции возникает из-за перегрузки сети токами, превышающими длительно допустимые. Согласно эмпирическому («восьмиградусному») правилу повышение температуры проводника на 8 °С снижает срок службы изоляции в два раза.

Имеющиеся методики по выбору защиты не учитывают электрическую дугу, имеющую температуру 5000...8000 °С, при этом изоляция кабеля воспламеняется гораздо быстрее срабатывания защиты.

Термодеструкция изоляции под действием токов утечки может привести к воспламенению изоляции шахтных кабелей.

Нагрев изоляции приводит к возникновению легковоспламеняющихся продуктов, которые могут воспламениться при температуре 220 °С (для резиновой изоляции) и 560 °С (для ПВХ) [2].

В шахтах применяют пожаровзрывобезопасные автоматические фидерные выключатели (автоматы защиты) для автоматического отключения электрической сети при коротких замыканиях и оперативных переключениях при нормальных режимах работы. Автоматы используют для отключения сети при срабатывании в комплексе с любой защитной аппаратурой, применяемой в шахтах.

Основные показатели, которые учитывают при выборе автоматов:

- количество полюсов;
- номинальное напряжение;
- максимальный рабочий ток;
- отключающая способность (ток короткого замыкания).

Количество полюсов автомата определяют по числу фаз сети. Для установки в однофазной сети используют однополюсные или двухполюсные автоматы. Для трехфазной сети применяют трех- и четырехполюсные (сети с системой заземления нейтрали).

Номинальное напряжение автомата – это напряжение, на которое рассчитан сам автомат. Независимо от места установки напряжение автомата U_{AB} должно быть равным или большим номинального напряжения сети U_C

$$U_{AB} \geq U_C.$$

Выбор автоматов по максимальному рабочему току заключается в том, чтобы номинальный ток автомата был больше или равен максимальному рабочему (расчетному) току, который может длительно проходить по защищаемому участку цепи, с учетом возможных перегрузок (см. таблицу).

В настоящее время производят пожаровзрывобезопасные фидерные выключатели серий АФВ и АВ напряжением на 380/660 В и АВ-320ДО2 – напряжением 1140 В. В зависимости от напряжения в электрической сети катушку автомата (отключающую) регулируют на необходимое напряжение. Время срабатывания выключателей типа АВ – 0,05 с, а выключателей типа АФВ – 0,1 с.

Фидерные выключатели типа АВМ-4У рассчитаны на ток 350 А, а типа АВМ-6У – на ток 500 А.

Основной показатель срабатывания автоматов защиты – времятоковая характеристика. До настоящего времени отсутствует научно обоснованная методика выбора аппаратов защиты, учитывающая температуру токоведущей жилы и изоляции на момент отключения.

Технические характеристики взрывобезопасных автоматов защиты серий АФВ и АВ

Автомат	Номинальный ток, А	Действующее значение предельного отключаемого тока, кА, при напряжении, В		Пределы установок максимальной токовой защиты, А	Возможность дистанционного отключения	Число вводов (выводов)		Габаритные размеры, мм			Масса, кг
		380	660			силовых	контрольных	Высота	Ширина	Глубина	
АФВ-1А	200	19	10	300 – 600	Нет	3		870	930	565	200
АФВ-2А	350	19	10	600 – 1200	Нет	3		910	940	600	205
АФВ-3А	500	19	10	1200 – 2000	Нет	3		1020	920	750	220
АФВД-2БК	350	10	7	600 – 1200	Есть	3		910	940	600	215
АВ-200ДО	200	30	27	400 – 1200	Есть	4		910	1200	790	340
АВ-320ДО	320	35	30	800 – 2400	Есть	4		910	1200	790	340
АВ-320ДО2	320	18 (при напряжении 1140 В)	18 (при напряжении 1140 В)	800 – 2400	Есть	4		910	1050	790	355

Г.И. Смелков [5] предложил сравнивать времятоковые характеристики кабельного изделия и аппарата защиты. Тогда условие обеспечения пожарной безопасности кабельной продукции и электропроводок, сформулированное И.Ю. Аушевым [4], будет иметь вид

$$t_{AB} \leq t_{п.д}^k,$$

где t_{AB} – время полного отключения автомата, с;

$t_{п.д}^k$ – время достижения изоляцией кабельного изделия предельно допустимой температуры, с.

Сравнив времятоковые характеристики, можно выбрать подходящий автомат защиты для защиты кабельных изделий и электропроводки от пожароопасного перегрева при протекании тока, превышающего номинальный (сверхток, по выражению И.Ю. Аушева [4]).

Времятоковые характеристики приводят в паспортных данных на изделие. Зависимость времятоковой характеристики кабельной продукции при протекании сверхтока кратностью k может быть построена следующим образом [4]:

$$t_{\Delta T} = \frac{C_w A}{1 - Q_0 k \beta A'} \ln \left[1 - \Delta T \frac{1 - Q_0 k^2 \beta A'}{Q_0 k^2 (A' - B)} \right],$$

где C_w – полная теплоемкость единицы длины проводника, Дж/(м·К);

Q_0 – значение мощности тепловыделения при начальной температуре для допустимого длительного тока кабельного изделия, Вт/м;

k – величина кратности сверхтока;

ΔT – разность между предельно допустимой и начальной температурой кабельного изделия, К;

β – температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} ;

A' – коэффициент теплового сопротивления кабельного изделия, $m \cdot K/Wt$;

B – коэффициент, $m \cdot K/Wt$.

Коэффициент теплового сопротивления кабельного изделия A' и коэффициент B можно определить по следующим формулам соответственно:

$$A' = \left(\frac{h}{\lambda P_w} + \frac{1}{\alpha P_e} \right);$$

$$B = \frac{\delta}{\lambda P_w},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, $Wt/(m \cdot K)$;

h – толщина изоляции, м;

P_w – периметр сечения жилы, м;

P_e – внешний периметр сечения изоляции, м;

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции, $Wt/(m^2 \cdot K)$;

δ – расстояние от поверхности жилы до точки замера температуры, м.

Сравнение времятоковых характеристик автоматов защиты и шахтных кабельных сетей представлено на рис. 1.

Автоматы защиты перед установкой в шахте визуально осматривают на предмет отсутствия повреждений взрывонепроницаемого корпуса, вводных устройств, рычага выключателя, смотровых окошек, механической блокировки, заземляющих зажимов. При помощи мегаомметра измеряют сопротивление изоляции проводов и кабелей относительно корпуса (должно быть не менее 6 МОм). Первый запуск производят под напряжением, при этом автомат должен быть заземлен.

Косвенным методом проверяют действие механизма свободного расцепления и максимальной токовой защиты.

Возможны следующие неисправности фидерных выключателей, приводящие к пожарам:

- Обрыв или замыкание жил кабеля, подключающего кнопку дистанционного отключения.
- Перегорание предохранителя блока управления.
- Повреждение изоляции отходящего присоединения. При этом срабатывает блок БРУ и загорается сигнальная лампа с желтым светофильтром.
- Замыкание между жилами силовой цепи, при этом срабатывает устройство ПМЗ и загорается сигнальная лампа с красным светофильтром.
- Понижен уровень изоляции отходящего от автомата участка сети.
- Пробой первичной обмотки трансформатора тока на корпус.

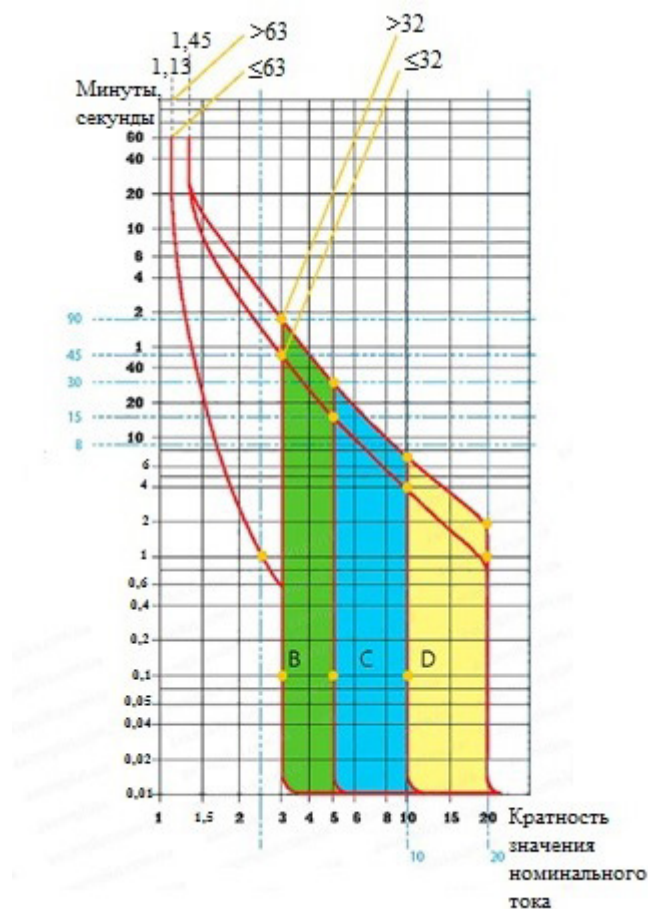


Рис. 1. Времятоковые характеристики автоматов защиты и шахтных кабельных сетей

Для предотвращения опасного нагрева автоматов защиты типа АВ может быть рекомендована схема мониторинга температуры внутри прибора (см. рис. 2).

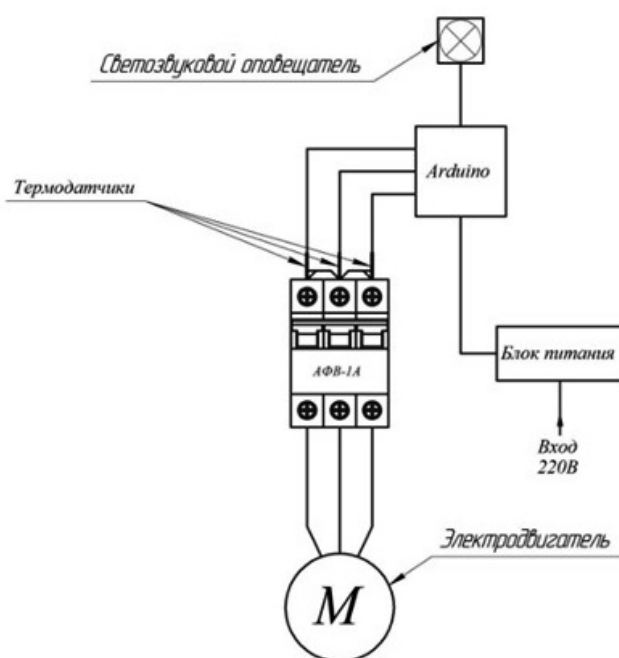


Рис. 2. Схема установки термодатчиков в автомате защиты типа АВФ-1А

Схема включает в себя:

- блок управления, выбранный на элементной базе «Arduino»;
- термодатчики, смонтированные на токоведущих частях автоматов защиты типа АВ.

Датчики контролируют температуру в автомате защиты типа АВ и в случае её увеличения до неприемлемых значений включают светозвуковые извещатели, расположенные в выработках, где постоянно находится дежурный персонал.

Выводы. Для повышения пожарной безопасности шахтных кабельных сетей необходим комплекс мероприятий по снижению риска электропожаров (пожаров, возникающих из-за аварийного режима работы электрооборудования):

- установка современных автоматических фидерных выключателей вместо технически устаревших автоматов;
- правильный выбор автоматов защиты на определенном участке электрической проводки путем проведения испытания петли «фаза-нуль» и сравнения времятоковых характеристик автоматов типа АВ и кабеля;
- назначение ответственных лиц на шахте для еженедельного осмотра токоведущих частей и всего оборудования (с записью в оперативный журнал времени проверки, выявленных неполадок или сведений о нормальной работе электрооборудования, с личной подписью).

Список литературы / References

1. Собурь, С.В. Пожарная безопасность электроустановок / С.В. Собурь. – 4-е изд., доп. – М.: ПожКнига, 2004.

Sobur' S.V. *Pozharnaya bezopasnost' elektroustanovok. 4-e izd. dop.* [Fire safety of electrical installations. The 4th expanded edition]. Moscow, PozhKniga Publ., 2004. (In Russian).

2. Сошников, А.А. Пожарная безопасность электроустановок зданий: Проблемы и перспективы / А.А. Сошников // Ползуновский альманах. – 1999. – № 3. – С. 31 – 33.

Soshnikov A.A. *Pozharnaya bezopasnost' elektroustanovok zdanii: Problemy i perspektivy* [Fire safety of electrical installations of buildings: problems and prospects]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov's anthology*, 1999, no. 3, pp. 31-33. (In Russian).

3. Аушев, И.Ю. Анализ существующей методики выбора аппаратов защиты с точки зрения обеспечения пожарной безопасности электропроводки / И.Ю. Аушев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2008. – № 2(24). – С. 71 – 81.

Aushev I.Yu. *Analiz sushhestvuyushhei metodiki vybora apparatov zashhity s tochki zreniya obespecheniya pozharnoi bezopasnosti elektroprovodki* [Analysis of current methodology of selecting the circuit-breakers from the point of view of ensuring the fire safety of electric wiring]. *Chrezvychainye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya – Emergency situations: prevention and elimination*, 2008, no. 2(24), pp. 71-81. (In Russian).

4. Аушев, И.Ю. Выбор аппаратов защиты электропроводок с учетом времятоковых характеристик / И.Ю. Аушев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 3. – С. 35 – 41.

Aushev I.Yu. *Vybor apparatov zashhity elektroprovodok s uchytom vremyatokovykh kharakteristik* [Selection of wire protection devices with due account for time-current curves]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetics. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2009, no. 3, pp. 35-41. (In Russian).

5. Смелков, Г.И. Пожарная опасность электропроводок / Г.И. Смелков. – М.: КАБЕЛЬ-news, 2009. – 329 с.

Smelkov G.I. *Pozharnaya opasnost' elektroprovodok* [Fire hazard of electric wirings]. Moscow, KABEL'-news Publ., 2009, 329 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 09.11.2021

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

Andrey Vasilyevich Osadchiy, senior scientific associate; e-mail: osad4iy58@mail.ru;

Sergey Viktorovich Razin'kov, engineer of the 2nd category; e-mail: sergey_razinkov-84@mail.ru

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-40

FIRE HAZARD OF MINE CABLE NETWORKS

Purpose. Evaluation of the mine cable networks fire hazard and selection of methods to reduce it.

Methods. Information and analytical investigations of the fire hazard of the mine cable networks.

Results. The method to compare time-current curves of a feeder circuit-breaker and cable products has been proposed.

Scientific novelty. The novel relation for calculating the time-current curve of the cable products has been established. The circuit for monitoring the temperature inside the feeder circuit-breaker has been designed.

Practical value. Ensuring the fire and explosion safety of the circuit-breakers as well as the line in and line out cables.

Keywords: fire safety; electric wiring; L-N loop; circuit-breaker; time-current curve.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.822:622.41

Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: ennio80@mail.ru;

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

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

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

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИДА СГОРАЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА ПРИ АВАРИИ В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

Цель. Анализ методов определения вида вещества, участвующего в подземном пожаре, для прогнозирования и ликвидации аварийной обстановки в угольных шахтах.

Методы. Аналитический метод оценивания газового состава шахтного воздуха, позволяющего определить вид сгорающего вещества, на примере аварии, произошедшей в филиале «Шахта им. А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК».

Результаты. На основании исследования газового состава шахтного воздуха рассмотрена возможность идентификации вида пожарной нагрузки. Проведена апробация известных методов и выявлена возможность дифференцировать горение метана и твердого вещества.

Научная новизна. Впервые проведен сравнительный анализ методов идентификации веществ, участвующих в подземном пожаре, для прогнозирования развития аварийной обстановки.

Практическая значимость. Оперативный выбор способов и применяемых технических средств при ликвидации подземных аварий на основании установления вида сгорающего вещества.

Ключевые слова: *горение; эндотермическая реакция; стехиометрические уравнения; пожарные газы; труднодоступные места.*

Постановка задачи. Подземный пожар – неконтролируемый процесс горения в горных выработках, создающий угрозу здоровью и жизни людей, а также материальным ценностям. Опасные факторы подземного пожара: открытый огонь, тепловое излучение, искры, разогретый воздух, токсичные продукты горения, дым, пониженная объемная доля кислорода [1]. Сложные горно-геологические условия добычи угля на шахтах Донбасса (глубина, сверхкатегорийность по метану, газодинамические явления) приводят к тому, что возникающие пожары часто бывают осложнены взрывами, которые могут привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям.

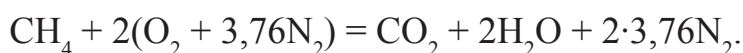
Объект горения на горных предприятиях – это прежде всего добываемое или перерабатываемое полезное ископаемое (каменный уголь). К наиболее распространенным горючим веществам и материалам, используемым в шахтах, относятся крепежный лес, деревянные перемишки, перегородки, двери, лестницы, шпалы, трапы, настилы, а также образующиеся отходы древесины (кора, стружки, опилки). Независимо от состояния (мокрая, сухая) крепь может гореть в действующих выработках и в заложенном или обрушенном пространстве, инициировать воспламенение угольной пыли и мелочи [1].

В газообильных шахтах горящий метан может вызвать возгорание других горючих веществ и материалов (древесины, конвейерной ленты, угля и др.). Кроме того, при повышенной концентрации метана в очаге пожара существует возможность взрыва горючих газов [2].

Возникновение аварийной обстановки в шахте обычно требует принятия однозначного решения о способах и средствах ее ликвидации, поэтому при наличии нескольких возможных вариантов действий определение вида сгорающего вещества поможет в выборе наиболее эффективного механизма и способа тушения подземного пожара. В данных условиях состав пожарных газов – единственный информационный источник при подземных пожарах, особенно в труднодоступных местах. Располагая данными о газовом составе шахтного воздуха, можно прогнозировать аварийную обстановку и контролировать процесс тушения подземного пожара.

Анализ последних исследований. Распознавание вида сгорающего вещества по составу исходящих от пожара газов основано на том, что горение веществ различного агрегатного состояния в большинстве случаев состоит из элементарных химических реакций окислительно-восстановительного типа.

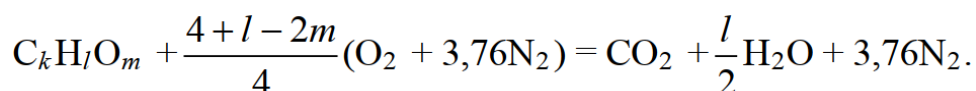
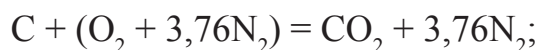
Поэтому, исходя из состава горючего вещества, можно предположить, о каких продуктах сгорания идет речь. Например, при полном сгорании метана в воздухе углерод превращается в диоксид углерода (CO_2), водород – в воду (H_2O). Так как в данном горючем веществе отсутствуют другие элементы, то в продуктах сгорания будут присутствовать CO_2 и H_2O . Азот воздуха ($3,76\text{N}_2$) в процессе горения участия не принимает и перейдет в продукты сгорания. Рассмотренную реакцию запишем в виде



При возгорании древесины – пористого вещества с заполненными воздухом ячейками – происходит быстрое нагревание тонкого поверхностного слоя, испарение влаги и затем разложение. Элементарный состав древесины в среднем соответствует химической формуле клетчатки ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_x, то есть включает углерод С (49...50 %), водород Н (6...7 %), азот N (0,1...1,0 %), кислород О (42...44 %) [3].

Основные элементы, входящие в состав любого вида угля, – углерод С (75,0...92,0 %), водород Н (2,5...5,7 %), кислород О (1,5...15,0 %), азот N (1,0...3,0 %) и сера S (0...4,0 %), которые составляют органическую массу угля [4].

Полное сгорание углерода и горючих масс древесины и угля можно представить следующими уравнениями:



Таким образом, процесс горения метана, угля и древесины сопровождается расходом кислорода и образованием газов, исходящих от очага пожара, поэтому наибольшее развитие получили методы оценивания пожара, основанные на анализе шахтного воздуха.

Так, в работе [5] рассмотрен коэффициент Грэма, основанный на соотношении концентраций оксида углерода и убыли кислорода ($CO/\Delta O_2$). Этот коэффициент не зависит от разбавления газовой пробы свежим воздухом и позволяет определять различные стадии пожара от возникновения самовозгорания до стадии возгорания по формуле

$$GR = \frac{CO}{\Delta O_2},$$

где CO и O_2 – объемная доля газов в пробе шахтного воздуха, %.

Значение коэффициента GR менее 1,0 указывает на пожар в состоянии тления, а более 2,0 – в состоянии горения. Изменение этого соотношения дает информацию о протекании подземного пожара и позволяет контролировать его тушение.

Коэффициент Джоунса – Трикетта используют не только для оценки состояния пожара, но и как индикатор типа топлива, участвующего в пожаре (Авторское свидетельство СССР № 1045675, кл. Е 21 F 5/00. «Способ обнаружения пожаров в угольных шахтах»). Значение коэффициента рассчитывают по формуле

$$JTR = \frac{CO_2 + 0,75CO - 0,25H_2}{\Delta O_2}.$$

Соотношение JTR также не зависит от притока воздуха, метана или закачанного азота и может быть использовано для оценки газообразных продуктов в случае пожаров и взрывов. Коэффициент позволяет установить пожар на ранних стадиях его развития и контролировать горение, однако он зависит от объемной доли кислорода и может возрасть при конверсии CO в CO_2 .

Исследования процесса горения шахтных веществ, проведенные в НИИГД «Респиратор», позволили разработать способ идентификации сгорающих метана и угля, который освещен в авторском свидетельстве СССР № 1276830 «Способ контроля за ходом тушения пожара в угольных шахтах». Авторы предлагают устанавливать объемные доли газов по ходу вентиляционной струи и рассчитывать количество сгорающих метана и угля по следующим математическим выражениям:

$$P_M = 0,002\omega F (0,051O_2'N_2'' - 4O_2'' - 4,51CO_2 - 2,51CO + 2H_2);$$

$$P_Y = 0,00176\omega F (-0,051O_2'N_2'' + 4O_2'' + 8CO_2 + 6CO + 2H_2),$$

где P_M и P_Y – количество сгоревшего метана и угля, кг/мин;

- ω – скорость воздушного потока на исходящей струе, м/мин;
 F – площадь поперечного сечения выработки в свету, м²;
 CO и CO_2 – объемные доли диоксида и оксида углерода в исходящей струе, %;
 O_2 – объемная доля кислорода в точке с наименьшей объемной долей оксида углерода, %;
 N_2^{II} и O_2^{II} – объемные доли азота и кислорода в исходящей струе, %.

При значениях $P_m > 0$ и $P_y > 0$ устанавливают факт совместного горения метана и угля и выбирают тактику работ по тушению пожара, однако данные параметры не учитывают присутствие деревянных элементов горной выработки. Поэтому на основании анализа стехиометрических уравнений материального баланса процесса горения угля, древесины и метана и сопоставления фактической убыли кислорода в шахтном воздухе при пожаре с его потреблением разработан критерий K_p^{Φ} [6]. Вся область возможных значений критерия K_p^{Φ} дифференцирована следующим образом:

$$0,5 \leq K_p^{\Phi} \leq 0,2 \text{ – горение угля (древесины);}$$

$$0,2 \leq K_p^{\Phi} \leq 0,9 \text{ – совместное горение угля и метана;}$$

$$K_p^{\Phi} > 0,9 \text{ – горение метана.}$$

Критерий рассчитывают по формуле

$$K_p^{\Phi} = K_p - K_p^0,$$

где K_p – расчетное значение по данным газовой пробы шахтного воздуха;

K_p^0 – расчетное значение по данным лабораторного анализа твердого вещества.

Расчетные значения определяют по формуле

$$K_p = K_p^0 = \frac{\frac{\text{O}_2^{\text{II}}}{\text{N}_2^{\text{II}}} \text{N}_2 - \text{O}_2 + 0,5\text{CO} - a_1 (\text{CO}_2 + \text{CO} - \text{CO}_2^{\text{II}})}{a_2 (\text{CO}_2 + \text{CO} - \text{CO}_2^{\text{II}})},$$

где O_2^{II} , N_2^{II} , CO_2^{II} – объемные доли газов в поступающем воздухе, %;

a_1 и a_2 – коэффициенты, зависящие от вида сгорающего вещества.

Критерий может быть использован для определения вида сгорающего вещества только при выполнении условия

$$0,5 < \text{CO}_2 \leq 2 \%. \quad (1)$$

Если в шахтном воздухе объемная доля $\text{CO}_2 \geq 2 \%$, то $K_p^0 = 0$ и $K_p^{\Phi} = K_p$.

Следует отметить, что на точность определения критерия K_r^Φ оказывают влияние погрешности анализа пожарных газов, причем они тем существеннее, чем ниже концентрация продуктов горения в пробе.

Таким образом, рассмотренные коэффициенты, критерии определения пожара и идентификации вида сгорающего вещества основаны на анализе химических процессов совместного горения твердых и газообразных веществ.

Цель работы – анализ методов определения вида вещества, участвующего в подземном пожаре, для прогнозирования и ликвидации аварийной обстановки в угольных шахтах.

Результаты исследований. Горение – сложный физико-химический процесс, для которого характерны три признака: химическое превращение, выделение теплоты, излучение света. Горение возможно только при наличии горючего вещества и окислителя, которым обычно является кислород воздуха.

Различное агрегатное состояние основных шахтных горючих веществ определяет характер этого процесса, который может быть гомогенным (компоненты горючей смеси и окислителя находятся в газообразном состоянии, например, при горении метана) и гетерогенным (из-за различных агрегатных состояний существует раздел фаз горючего вещества и окислителя – горение твердых веществ) [1].

Наличие или отсутствие раздела фаз горючего вещества и окислителя позволяет различать диффузионный и кинетический режимы горения [7]. Однако независимо от характера и режима горения основные шахтные горючие вещества (древесина, уголь и метан) в основном содержат углерод, взаимодействие которого с кислородом воздуха может протекать с образованием низшего и высшего оксидов, то есть CO и CO₂. Объемная доля образующихся газов зависит от температуры протекания процесса и вида сгорающего вещества.

В подтверждение сказанного рассмотрим аварию, которая произошла 17 ноября 2020 г. в филиале «Шахта им. А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК» и привела к травматизму и гибели людей.

В соответствии с показаниями датчика CO системы УТАС на магистральном конвейерном штреке Западной панели пласта h_6^1 зафиксированы всплески увеличения объемной доли оксида углерода. При этом датчик CH₄, установленный в камере смешивания на ходке № 5 пятой западной лавы Западной панели, также зафиксировал резкое увеличение объемной доли метана до 1,42 % по сравнению с установившимся значением, равным 0,5...0,6 %.

По состоянию на 8 ч 15 мин 17 ноября 2020 г. газоаналитическая лаборатория ОГВГСО МЧС ДНР установила следующие объемные доли газов: CH₄ = 1,2 %, CO = 0,0050 %, CO₂ = 0,1 %, O₂ = 20,3 %. Через 30 мин газовая обстановка за кроссингом конвейерного штрека 5-й западной лавы Западной панели ухудшилась: увеличилась объемная доля пожарных газов (CH₄ = 5,0 %, CO = 0,0250 %) и уменьшилась объемная доля кислорода (O₂ = 20,1 %). В 11 ч 25 мин в выработках 6-й западной лавы Западной панели произошел взрыв метановоздушной смеси.

В соответствии с Оперативным планом работ по ликвидации аварии персонал шахты и горноспасатели выведены на поверхность, установлен контроль за содержанием основных газов в шахтном воздухе.

В данных условиях очень важна достоверная оценка сложившейся аварийной обстановки в горных выработках шахты для принятия адекватных решений.

Рассмотрим газовый состав шахтного воздуха в вентиляционном штреке 5-й западной лавы Западной панели пласта h_6^1 при возникновении и ликвидации аварии в филиале «Шахта им. А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК» (см. табл. 1).

Таблица 1

Газовый состав шахтного воздуха в вентиляционном штреке
5-й западной лавы Западной панели пласта h_6^1
филиала «Шахта им. А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК»

№	Дата	Объемная доля, %					
		CO ₂	CH ₄	O ₂	CO	N ₂	ΔO ₂
1	17.11.2020	0,1	0	20,5	0,0175	79,3825	0,5364
2	27.11.2020	0,2	2,2	20,2	0,0036	77,3964	0,3100
3	01.12.2020	0,1	2,1	20,0	0,0031	77,7969	0,6162
4	03.12.2020	0,1	1,7	20,3	0,0030	77,8970	0,3427
5	14.12.2020	0,1	0,7	20,5	0,0184	78,6816	0,3506
6	20.12.2020	0,3	0,6	20,4	0,0166	78,6834	0,4511
7	27.12.2020	1,8	13,0	15,2	0,0800	69,9200	3,3288
8	28.01.2021	1,1	10,3	15,6	0,0107	72,9893	3,7422
9	04.06.2021	3,7	11,9	14,3	0,0049	70,0951	4,2752

Объемные доли N₂ и ΔO₂ рассчитаны по формулам

$$N_2 = 100 - (CO_2 + CH_4 + O_2 + CO);$$

$$\Delta O_2 = 0,265N_2.$$

На основании данных газового состава шахтного воздуха установлены значения рассмотренных выше коэффициентов и критериев для конкретного аварийного участка и определен вид сгорающего вещества (табл. 2).

Анализ газовой обстановки показывает, что 27 декабря 2020 г. установлено резкое увеличение объемных долей выделяющихся газов при уменьшении объемной доли кислорода. При этом $P_m > 0$ и $P_y > 0$, что свидетельствует о совместном горении метана и угля. Значение критерия K_p^Φ равное 0,817, входит в интервал $0,2 < K_p^\Phi \leq 0,9$ и также свидетельствует о совместном горении метана и твердого топлива. По значениям P_m и K_p^Φ можно предположить горение метана 28 января 2021 г., а 4 июня 2021 г. – горение твердого топлива.

Таблица 2

Значения коэффициентов и критериев вида сгорающего вещества

№	GR	JTR	P_m , кг/мин	P_y , кг/мин	K_p^Φ
1	0,033 –	0,211 –	0,599 метан	-0,091 –	7,230 –
2	0,012 –	0,654 –	-0,952 –	1,534 уголь	1,065 –
3	0,005 –	0,166 –	1,053 метан	-0,528 –	10,511 –
4	0,009 –	0,298 –	-0,261 –	0,588 уголь	5,482 –
5	0,052 уголь	0,325 –	-0,283 –	0,662 уголь	4,380 –
6	0,037 –	0,694 –	-0,877 –	1,873 уголь	0,710 метан + тв. вещество
7	0,024 –	0,559 –	4,779 метан	2,630 уголь	0,817 метан + тв. вещество
8	0,003 –	0,296 –	10,707 метан	-5,147 –	2,769 метан
9	0,001 –	0,866 уголь	-0,738 –	13,816 уголь	0,039 тв. вещество

В соответствии с требованиями Методики [6] критерий K_p^Φ можно использовать только для трех последних наборов данных, удовлетворяющих условию (1), что значительно ограничивает область его применения. Коэффициенты GR и JTR также не дают однозначного ответа на вопрос о развитии процесса горения на этом аварийном участке.

Количество сгоревшего метана P_m и угля P_y было установлено для всех данных газового анализа и позволило разграничить горение этих веществ, однако полученные показатели не идентифицируют древесину и требуют дополнительного экспериментального исследования.

Выводы. Используя данные газового анализа шахтного воздуха при ликвидации аварийной ситуации в филиале «Шахта им. А.А. Скочинского» ГУП ДНР «ДУЭК», проведена апробация известных критериев, позволяющих идентифицировать вид сгорающего вещества. Установлена область применения критериев P_m , P_y и K_p^Φ , показана сходимость результатов, полученных с их использованием.

Список литературы / References

1. Орловский, С.Н. Теория горения и взрыва / С.Н. Орловский. – Красноярск, 2019. – 318 с.

Orlovskii S.N. *Teoriya goreniiya i vzryva* [Theory of combustion and explosion]. Krasnoyarsk, 2019, 318 p. (In Russian).

2. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах. – 2-е изд. // ООН. Серия публикаций ЕЭК по энергетике. – 2016. – № 47. – 134 с. [Электронный ресурс]. URL: https://unece.org/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/Russian_Version__full_-_Final.pdf (дата обращения: 16.08.2021).

Rukovodstvo po nailuchshei praktike effektivnoi degazatsii istochnikov metanovydeleniya i utilizatsii metana na ugol'nykh shakhtakh. – 2-e izd. [Guidelines on the best practice of effective degassing of methane release sources and methane disposal in coal mines. The 2nd edition]. OON. Seriya publikatsii EEK po energetike – UNO. The Economic Commission for Europe. Series of publications on energetics, 2016, no. 47, 134 p. [Electronic resource]. Available at: https://unece.org/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/Russian_Version__full_-_Final.pdf (accessed: 16.08.2021). (In Russian).

3. Никитин, В.М. Химия древесины и целлюлозы / В.М. Никитин, А.В. Оболенская, В.П. Щеголев. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 367 с.

Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shhegolev V.P. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy* [Chemistry of timber and cellulose]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978, 367 p. (In Russian).

4. Портола, В.А. Пожарная безопасность горных предприятий / В.А. Портола. – Кемерово: Изд-во Кузбасского государственного технического университета, 2008. – 158 с.

Portola V.A. *Pozharnaya bezopasnost' gornyykh predpriyatii* [Fire safety of mining enterprises]. Kemerovo, Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Press, 2008, 158 p. (In Russian).

5. Sahay, N. [et al]. Dealing with open fire in an underground coal mine by ventilation control techniques. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, vol. 114, no. 6, p. 455, 2014. URL: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532014000600010&lng%20=en&tlng%20=%20en (дата обращения: 16.08.2021).

6. Методика распознавания вида сгорающих веществ при пожарах в выработанных пространствах угольных шахт: разработана ВНИИГД, утв. нач. Всесоюзного управления военизированных горноспасательных частей 27.06.1986. – Донецк, 1986. – 25 с.

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

7. Лобазнов, А.В. Разработка способа и средств обнаружения начальной стадии подземных пожаров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 23 с.

Lobaznov A.V. *Razrabotka sposoba i sredstv obnaruzheniya nachal'noi stadii podzemnykh pozharov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of method and means for detecting the initial stage of underground fires: Cand. tech. sci. diss. abstract]. Moscow, 2011, 23 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 14.08.2021

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: ennio80@mail.ru;
Viktoria Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: v.obep.2018@mail.ru;
Dmitry Ivanovich Momot, scientific associate; e-mail: obep.niigd@list.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-83

IDENTIFICATION OF TYPE OF BURNING MATERIALS DURING ACCIDENT IN COAL MINE

Purpose. Analysis of methods for identifying the type of a material participating in an underground fire for prediction and elimination an emergency situation in coal mines.

Methods. Analytical method of evaluation of mine air gas composition that facilitates identification of the burning material type exemplified by the accident happened at the Shakhta im. A.A. Skochinskogo branch of the GUP DPR DUEK enterprise.

Results. Based on the investigation of the mine air gas composition the possibility of identification of a fire load type has been considered. The testing of known methods has been conducted, and the possibility to differentiate between a methane combustion and a solid material burning has been discovered.

Scientific novelty. The novel comparative analysis of the methods for identification of the materials participating in the underground fire has been fulfilled for prediction of the emergency situation development.

Practical value. The prompt choice of methods and technical means deployed in elimination of the underground accidents based on the identification of burning material type.

Keywords: *combustion; endothermic reaction; stoichiometric equations; fire gases; concealed spaces.*

УДК 699.812.3

Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;

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

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

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

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

ОГНЕЗАЩИТА ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ СОСТАВА НА ОСНОВЕ СИЛИКАТА

Цель. Разработка рецептуры состава на основе силикатного связующего вещества – жидкого стекла – для повышения огнестойкости деревянных строительных конструкций.

Методы. Экспериментальное установление группы огнезащитной эффективности покрытия для древесины стандартным методом (ГОСТ 16363-98). Определение адгезии покрытия к древесине методом X-образного надреза (ГОСТ 32702.2); коэффициента вспучивания огнезащитного покрытия – методом измерения и соотношения толщин покрытия до и после теплового воздействия при изотермическом нагревании в муфельной печи. Экспериментальная оценка горючести огнезащитного покрытия методом огневого удара в открытом пламени газовой горелки.

Результаты. Используя результаты экспериментальных исследований, разработана рецептура состава на основе жидкого натриевого стекла для снижения горючести древесины. Определено оптимальное соотношение пленкообразующего вещества (жидкого стекла), термостойкой армирующей добавки (базальтового волокна) и минерального наполнителя (вспученного вермикулита) для эффективного вспучивания покрытия и огнезащиты деревянных конструкций. Для огнезащитного покрытия определены I группа огнезащитной эффективности, адгезия к древесине и коэффициент вспучивания 27 единиц, выполнена оценка горючести в открытом пламени газовой горелки.

Научная новизна. Теоретически обосновано и экспериментально установлено оптимальное массовое соотношение связующего вещества, минеральных целевых добавок, вспучивающихся при термическом воздействии и обладающих способностью образовывать вспененный кокс с высокой адгезией к древесине.

Практическая значимость. Огнезащитный состав вспучивающегося типа на основе жидкого стекла и неорганических добавок позволяет повысить эффективность огнезащиты деревянных строительных конструкций и снизить риск быстрого обрушения зданий и сооружений. Компоненты разработанного состава нетоксичны, что дает возможность использовать конструкции с огнезащитным покрытием в жилых помещениях.

Ключевые слова: адгезия; вспучивающееся покрытие; группа огнезащитной эффективности; древесина; жидкое стекло; огнезащита.

Постановка проблемы. В настоящее время древесина остается одним из наиболее востребованных строительных материалов. Наряду с большим количеством положительных свойств древесина имеет существенный недостаток – повышенную горючесть. Процесс воспламенения и горения древесины обусловлен повышенным содержанием целлюлозы в ее составе (табл. 1) [1].

Таблица 1

Химический состав древесины

Материал	Содержание целлюлозы	Лигнин	Пентозаны	Смолы и воск	Зола	Белковые вещества
	%					
Древесина хвойных пород	53...57	26...29	10...12	2...4	0,2...0,6	1...3
Древесина лиственных пород	45...47	18...25	22...27	0,5...3,0	0,2...0,6	1...3

В соответствии с требованиями нормативных документов древесина, предназначенная для использования в строительстве, должна быть подвергнута огнезащитной обработке. Для снижения горючести древесины применяют огнезащитные средства (краски) вспучивающегося типа на основе органических и неорганических связующих веществ. К существенным недостаткам красок на основе органических вяжущих, по сравнению с красками на неорганической основе, можно отнести горючесть на начальном этапе огневого воздействия, токсичность продуктов термодеструкции, высокую стоимость, ограниченное время огнезащитного действия. При огневом воздействии вспученный коксовый слой постепенно выгорает, механически разрушается и отслаивается от поверхности.

Огнезащитные средства на основе неорганических веществ – негорючие и нетоксичные – имеют меньшую стоимость. Однако минеральные огнезащитные составы отличаются небольшой механической прочностью, малым сроком эксплуатации, неустойчивостью к воздействию влаги, большим расходом для достижения одинакового уровня огнезащитной эффективности по сравнению с органическими красками.

В случае устранения отмеченных недостатков и использования потенциальных преимуществ существующих покрытий можно создать более дешевое и эффективное средство на основе негорючих веществ с высокими эксплуатационными и огнезащитными свойствами.

Анализ последних исследований и публикаций. В изучение и разработку рецептур огнезащитных составов большой вклад внесли Т.Ю. Еремина [2], О.А. Зыбина [3], Д.Е. Завьялов [4, 5] и другие исследователи. Однако задачи повышения огнезащитной эффективности, адгезии, механической прочности вспененного кокса остаются нерешенными.

Цель работы – разработка рецептуры состава на основе силикатного связующего вещества для повышения огнестойкости деревянных строительных конструкций.

Изложение основного материала. Огнезащитное действие красок для древесины обусловлено наличием ингибиторов и антипиренов в их составе. Обработанная специальной краской древесина не обугливается, не коробится и не растрескивается в процессе термического разложения. Введенные огнезащитные средства создают на ее поверхности объемный

теплоизолирующий слой. Все механизмы огнезащиты направлены на увеличение выхода коксового остатка и, соответственно, на снижение выхода горючих газов, предупреждение тления и других процессов, сдерживающих горение древесины. Таким образом, можно считать, что основной эффект огнезащиты – вспучивание определенных веществ, входящих в составы огнезащитных красок.

В качестве пленкообразующего вещества выбрано силикатное связующее – водный раствор полисиликата натрия (жидкое стекло). При выборе жидкого стекла учитывали его негорючесть, возможность самоотверждения и образования поверхностной пленки при нормальных условиях (без отвердителя и нагрева), способность вспучиваться при нагреве и малую токсичность, доступность, удобство в применении (растворимость в воде). Для улучшения эксплуатационных свойств необходимо было подобрать армирующую добавку для понижения теплопроводности, температуропроводности и повышения теплоемкости – наполнитель. Выбор добавки (базальтового волокна) и наполнителя (вспученного вермикулита) проводили, опираясь на результаты предыдущих исследований огнезащитных покрытий [6, 7]. После выбора состава по эксплуатационным свойствам связующего исследовали огнезащитные свойства: возможность вспучивания, действие антипирена в составе краски, присутствие комплексного механизма огнезащитного действия. Поэтапное изучение огнезащитных свойств позволило установить оптимальное соотношение жидкого стекла, базальта и вспученного вермикулита для получения огнезащитного покрытия высокой эффективности.

Методы исследований. Огнезащитное покрытие должно удерживаться на поверхности, что определено адгезией связующего к защищаемой поверхности. Участок обработанной поверхности, где адгезия покрытия не позволит удержаться огнезащитному слою до и во время пожара, будет уязвим для воздействия огня. Поэтому исследование адгезионных свойств важно при разработке огнезащитного покрытия.

Определение адгезии покрытия к древесине проводилось методом X-образного надреза согласно ГОСТ 32702.2-2014 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом X-образного надреза». Основой параметр, по которому подобран именно этот метод – использование покрытий любой толщины. Испытания проводились на обработанных покрытием и просохших образцах древесины. X-образные надрезы длиной не менее 40 мм выполнялись до окрашиваемой поверхности древесины, угол пересечения надрезов 45°. Оценку адгезии покрытия осуществляли путем определения степени разрушения в баллах.

Для объективной оценки эффекта огнезащиты определяли группу огнезащитной эффективности – основного показателя эффективности огнезащитного покрытия. Испытания по определению группы огнезащитной эффективности исследуемых составов проводили в лаборатории на универсальной установке для определения группы трудногорючих и горючих твердых веществ и материалов, а также огнезащитных свойств покрытий для обработки древесины «Керамическая труба».

Стандартный метод определения группы огнезащитной эффективности древесины установлен ГОСТ 16363-98 «Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств», который заключается в измерении процента потери массы исследуемыми образцами после двухминутного огневого воздействия на них в керамической трубе (рис. 1).

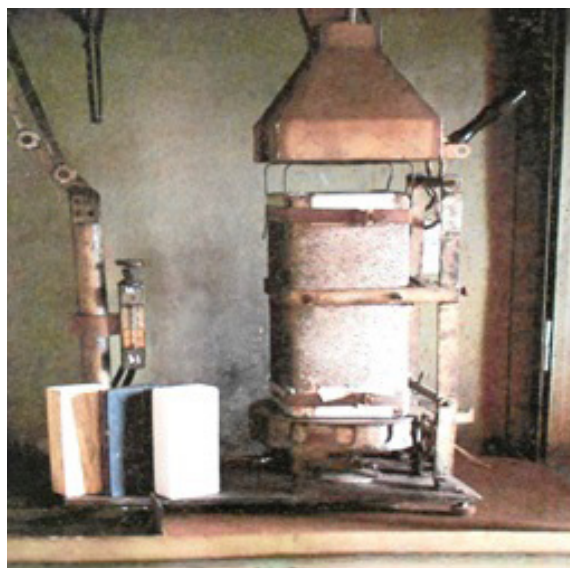


Рис. 1. Установка «Керамическая труба»

Испытания проводили на образцах прямоугольной формы размерами 30x60x150 мм. Потерю массы образцами, %, рассчитывали по формуле

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г;

m_2 – масса образца после испытания, г.

При потере массы Δm менее 9 % образец с покрытием относили к I (высшей) группе огнезащитной эффективности. Убыль массы образца более 25 % считали отрицательным результатом, так как покрытие не обеспечивает огнезащиту древесины и не является огнезащитным.

Эффективность огнезащиты во многом определяет способность покрытия вспучиваться. При вспучивании увеличивается толщина покрытия, отдалается плоскость воздействия источника тепла от защищаемого материала, часть энергии поглощается для активации физико-химических превращений, теплопроводность покрытия значительно снижается. Коэффициент вспучивания определяли с помощью метода измерения и соотношения толщин покрытия до и после теплового воздействия. Исследования покрытия проводили в открытом пламени газовой горелки и при изотермическом нагреве в муфельной печи при температуре 600 °С в течение 5 мин. Значение коэффициента вспучивания K рассчитывали по формуле

$$K = h_k / h_0, \quad (2)$$

где h_0 – высота защитного слоя полимерной композиции до термического расширения при определенной температуре соответственно, мм;

h_k – высота защитного слоя полимерной композиции после термического расширения при определенной температуре соответственно, мм.

Горючесть огнезащитных вспучивающихся покрытий на деревянных образцах оценивали в пламени газовой горелки экспрессным методом. Для этого образец древесины с покрытием выдерживали 2 мин в пламени газовой горелки, фиксируя при этом изменение цвета, усадку, вспучивание, коробление, тление, появление пламенного горения и т.д.

Результаты исследований. На основе жидкого стекла при определенном соотношении добавок были приготовлены и испытаны составы с различным процентным содержанием базальтового волокна и вспученного вермикулита, взятых в определенных массовых соотношениях.

После перемешивания компонентов композицию наносили ручным способом слоем толщиной не менее 1,5 мм на стальные пластины размерами 120x80x2 мм и деревянные бруски размерами 150x10x10 мм и определяли толщину слоя покрытия после сушки и испарения воды. Результаты испытаний по определению группы огнезащитной эффективности разработанного покрытия на древесине стандартным методом сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения огнезащитных свойств покрытия

Номер образца	Масса образца, г		Потеря массы образца Δm		Среднее арифметическое значение потери массы образца, %
	перед сжиганием, m_1	после сжигания, m_2	г	%	
1	142,0	137,0	0,0352	3,5	3,5
2	146,7	141,6	0,0348	3,5	
3	131,7	126,9	0,0364	3,6	
4	140,2	135,0	0,0371	3,7	
5	144,4	140,0	0,0305	3,1	
6	146,4	141,2	0,0355	3,6	
7	142,2	137,6	0,0323	3,2	
8	138,8	134,0	0,0346	3,5	
9	144,6	139,4	0,0360	3,6	
10	146,0	141,0	0,0342	3,4	

Потерю массы рассчитывали по формуле (1). Для испытанных образцов среднее арифметическое значение потери массы составило 3,5 %. Таким образом, разработанное покрытие обеспечивает I группу огнезащитной эффективности древесины в соответствии с ГОСТ 16363-98. Результаты определения адгезии разработанного огнезащитного покрытия к древесине методом X-образного надреза показаны на рис. 2.

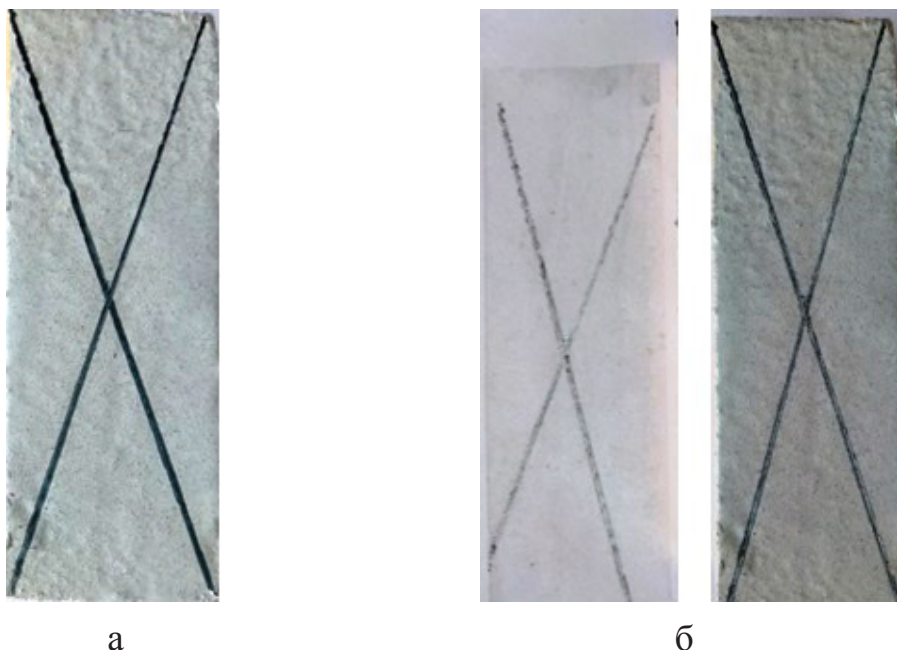


Рис. 2. Результаты определения адгезии покрытия к древесине:
а – до испытаний; б – после испытаний

Покрытие характеризуется максимальной адгезией, оцененной в 0 баллов (отсутствие отслаивания или удаления покрытия (рис. 2,б)) из 5 максимально возможных, в соответствии с ГОСТ 32702.2-2014.

В результате испытаний образцов покрытия в открытом пламени газовой горелки установлены компактность, однородность, отсутствие изменения цвета, рыхлости и летучести кокса.

В условиях термического воздействия при температуре 600 °С в течение 5 мин толщина слоя огнезащитного покрытия увеличилась с 1,4 до 38 мм, что обеспечило кратность вспучивания 27 единиц (рис. 3).

Благодаря огнеупорным свойствам исходных компонентов полученное покрытие также является огнестойким материалом, представляя собой армированный волокнами базальтового волокна материал с переплетенной слоями структурой, которая придает покрытию механическую прочность. При сушке покрытия в процессе дегидратации расстояния между волокнами сокращаются, волокна, соприкасаясь между собой гелеобразными поверхностями, образуют контакты. После испарения воды практически каждый контакт превращается в кремнеземный сросток между волокнами, в результате чего механическая прочность высушенного материала возрастает. Частицы порошкообразных ингредиентов оседают в гелеподобных слоях, формируемых на поверхности базальтового волокна, оказываясь внутри своеобразной матрицы, и хорошо удерживаются в ней, что обеспечивает однородность структуры получаемого огнезащитного материала, повышая его прочность и предотвращая усадку покрытия при естественной сушке.



Рис. 3. Огнезащитное покрытие на стальной пластине до и после термического воздействия в муфельной печи:

- а – огнезащитное покрытие до испытаний (вид сверху);
 б – огнезащитное покрытие после испытаний (вид сбоку)

Введение в состав покрытия на основе жидкого стекла огнестойкой армирующей добавки (базальтового волокна) обеспечило прочность и стойкость коксового слоя после огневого воздействия. Добавка вспученного вермикулита усилила огнезащитный эффект покрытия.

Выводы. В результате экспериментальных исследований разработана рецептура огнезащитного состава на основе водорастворимого нетоксичного связующего, огнестойкой армирующей добавки и мелкодисперсного наполнителя.

Для разработанного покрытия:

- определена I группа огнезащитной эффективности;
- установлена максимальная адгезия, оцененная в 0 баллов из 5 максимально возможных;
- рассчитан коэффициент вспучивания (до 27 единиц).

Применение огнезащитного вспучивающегося состава позволит решить задачи повышения пожарной безопасности объектов, профилактики пожаров и снижения риска их возникновения за счет повышения огнестойкости деревянных строительных конструкций.

Список литературы / References

1. Дослідження токсичності продуктів горіння вогнезахисної деревини / В.М. Жартівський, Ю.В. Цапко, О.Д. Гудович, К.І. Соколенко // Коммунальное хозяйство городов: сб. науч. тр. – К.: Техніка, 2005. – Вип. 63. – С. 320 – 326.

Zhartovs'kyi V.M., Tsapko Yu.V., Hudovich O.D., Sokolenko K.I. *Doslidzhennia toksychnosti produktiv horinnia vohnezakhyshhennoi derevyiny* [Investigation of toxicity of fire-proof timber combustion products]. *Kommunal'noe khozyaistvo gorodov: sb. nauch. tr.* [Municipal engineering of cities: collection of scientific papers]. Kiev, Tekhnika Publ., 2005, issue 63, pp. 320-326. (In Ukrainian).

2. Еремина, Т.Ю. Модель оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся водосодержащих составов / Т.Ю. Еремина, Н.М. Бессонов // Пожаровзрывобезопасность. – 2000. – № 3. – С. 17 – 20.

Eremina T.Yu., Bessonov N.M. *Model' otsenki ognezashhitnoi effektivnosti vspuchivayushhikhsya vodosoderzhashhikh sostavov* [Model of fire-proof effectiveness evaluation of intumescent aqueous compositions]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2000, no. 3, pp. 17-20. (In Russian).

3. Зыбина, О.А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов: дис. ... д-ра техн. наук / О.А. Зыбина. – Санкт-Петербург, 2015. – 260 с.

Zybina O.A. *Teoreticheskie printsipy i tekhnologiya ognezashhitnykh vspuchivayushhikhsya materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Theoretical principles and technology of fire-retardant intumescent materials: Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2015, 260 p. (In Russian).

4. Сравнительное изучение поведения фосфатов аммония в огнезащитных вспучивающихся композициях / Д.Е. Завьялов, О.А. Зыбина, В.В. Митрофанов, С.С. Мнацаканов // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, № 1. – С. 157 – 159.

Zav'yalov D.E., Zybina O.A., Mitrofanov V.V., Mnatsakanov S.S. *Sravnitel'noe izuchenie povedeniya fosfatov ammoniya v ognezashhitnykh vspuchivayushhikhsya kompozitsiyakh* [Comparative study of ammonium phosphates behavior in fire-retardant intumescent compositions]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Applied chemistry journal*, 2012, vol. 85, no. 1, pp. 157-159. (In Russian).

5. Завьялов, Д.Е. Возможность применения интеркалированного графита в огнезащитных интумесцентных композициях / Д.Е. Завьялов, О.А. Зыбина, С.С. Мнацаканов // XIV Междунар. науч.-техн. конф. «Наукоемкие химические технологии – 2012»: тез. докл. – М.: Изд-во МИТХТ, 2012. – 418 с.

Zav'yalov D.E., Zybina O.A., Mnatsakanov S.S. *Vozmozhnost' primeneniya interkalirovannogo grafita v ognezashhitnykh intumestsentnykh kompozitsiyakh* [Possibility to utilize intercalated graphite in fire-retardant intumescent compositions]. *XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Naukoyemkie khimicheskie tekhnologii – 2012": tez. dokl.* [The 14th International scientific and practical conference “Science-driven chemical technologies – 2012”: theses]. Moscow, MITKhT Press, 2012, 418 p. (In Russian).

6. 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 konstruksii* [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).

7. Козлитин, А.А. Покрытия на основе минерального связующего для огнезащиты деревянных конструкций / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 4(57). – С. 26 – 32.

Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N. *Pokrytiya na osnove mineral'nogo svyazuyushhego dlya ognezashhity derevyannykh konstruksii* [Mineral binder-based coatings for fire protection of wooden constructions]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 4(57), pp. 26-32. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 02.09.2021

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;
Igor Nikolayevich Nepochatykh, scientific associate; e-mail: tamdoka@mail.ru;
Oleg Vladimirovich Khraponenko, scientific associate; e-mail: olghrap@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

FIRE PROTECTION OF TIMBER BY SILICATE-BASED COMPOSITION

Purpose. Development of a composition formulation based on a silicate binding agent, i.e. sodium silicate, for improvement of the fire resistance of wooden building constructions.

Methods. Experimental determination of a fire-proof effectiveness group for the coating for timber by the standardized method (GOST 16363-98). Assessment of coating adhesion to the wood by the X-cut method (GOST 32702.2); determination of the fire-retardant coating intumescence coefficient by the method of measuring and correlating the coating thicknesses before and after exposure to heat by isothermal heating in a muffle furnace. Experimental evaluation of the fire-retardant coating flammability by the fire strike method in a gas-burner open flame.

Results. Using the results of experimental investigations the composition formulation based on sodium silicate solute for reducing the timber flammability has been developed. The optimal ratio of a film-forming agent (sodium silicate), thermoresistant reinforcement additive (basalt fiber) and mineral additive (intumescent vermiculite) for effective coating intumescence and timber fire protection has been determined. The group 1 of the fire-proof effectiveness, the adhesion to wood and the intumescence coefficient equal to 27 units have been established; the flammability assessment by the gas-burner open flame has been fulfilled.

Scientific novelty. The optimal mass ratio of the binding agent, the target mineral additives intumescing under thermal influence and possessing an ability to form the foamed coke with high adhesion to timber has been theoretically substantiated and experimentally determined.

Practical value. The fire-retardant intumescent composition based on sodium silicate solute and non-organic additives makes it possible to improve the effectiveness of fire protection of the wooden constructions and to reduce the risk of rapid collapse of buildings and structures. The components of the designed composition are non-toxic which allows utilizing the constructions with the fire-retardant coating in living quarters.

Keywords: *adhesion; intumescent coating; fire-proof effectiveness group; timber; sodium silicate; fire protection.*

УДК 502.175:[622.012.2:622.411.32/.33](21)

Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;
Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. комп.; e-mail: avrstla@mail.ru;
Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru
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

**МОНИТОРИНГ ГАЗОВОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ГОРНЫХ ОТВОДАХ ШАХТ, В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ**

Цель. Исследование и разработка технологий, принципиальных схем и мер безопасности мониторинга газовой обстановки на горных отводах шахт, в зданиях и сооружениях подразделениями горноспасательной службы путем непосредственного и дистанционного отбора и анализа проб воздуха на поверхностных объектах.

Методы. Аналитический метод исследования и метод построения принципиальных схем с использованием графических редакторов.

Результаты. Повышение безопасности людей, защита зданий и сооружений за счет регламентирования основ эффективного ведения контроля выделения вредных газов на поверхность горных отводов при ликвидации (консервации) шахт.

Научная новизна. Впервые разработаны принципиальные схемы мониторинга газовой обстановки на горных отводах шахт, в зданиях и сооружениях, в том числе схемы систем дистанционного отбора проб воздуха; отбора проб газозудушной смеси из газоотводящих труб или экспресс-анализа проб с помощью переносных приборов газового контроля; отбора проб воздуха у потолка и у почвы зданий (сооружений), подвальных и других помещений.

Практическая значимость. Результаты проведенных исследований использованы при разработке Методических рекомендаций по контролю за выделением вредных газов на земную поверхность, в здания и сооружения подразделениями ГВГСС МЧС ДНР при ликвидации (консервации) шахт.

Ключевые слова: *вредные газы; горный отвод; здания и сооружения; методы и приборы контроля; отбор и анализ проб воздуха; обеспечение безопасности людей; ликвидация и консервация угольных шахт; горноспасательная служба.*

Постановка проблемы. После отработки выемочных полей, ликвидации и консервации шахт, прекращения проветривания и затопления горных выработок увеличивается выделение вредных газов на поверхность горных отводов, что требует их постоянного мониторинга с целью обеспечения безопасности людей.

В условиях Донбасса за последние десятилетия произошли массовая ликвидация и консервация угольных шахт [1], что привело к увеличению площадей обследования угрожаемых и опасных зон по выделению вредных газов, и, соответственно, к повышению объема контроля их выделения.

На основании оценки состояния поверхностных объектов и контроля выделения вредных газов разрабатывают и реализуют проекты ликвидации (консервации) шахт, рекомендации по обеспечению безопасности людей,

защиты зданий и сооружений, а также по поддержанию территорий ликвидируемых шахт в экологически безопасном состоянии [2].

Вредные газы, выделяемые при прекращении проветривания и затоплении угольных шахт, содержат, как правило, метан и диоксид углерода. При чрезвычайных ситуациях также дополнительно определяют содержание оксида углерода, диоксида серы и сероводорода. Наиболее вероятные места скопления вредных газов на поверхностных объектах, которые представляют высокую опасность из-за возможности их горения, взрыва и (или) отравления людей, – подвалы зданий и сооружений, погреба и различные углубления [3 – 5].

Соответственно, получение достоверных данных о содержании вредных газов в местах их возможного выделения и скопления на поверхностных объектах – актуальное направление обеспечения безопасности людей, защиты зданий и сооружений за счет регламентирования основ мониторинга газовой обстановки на горных отводах при ликвидации (консервации) шахт.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1, 3, 4] обоснованы факторы, от которых зависит выделение вредных газов на участках горных отводов ликвидированных шахт: способы ликвидации (консервации) шахт; источники и пути выделения вредных газов; наличие технических, тектонических и геологических трещин; наличие проветривания, водоотлива и др. Данные факторы необходимо учитывать при выборе мест ведения газового контроля.

В ряде работ [2, 3, 4] приведены источники выделения вредных газов на поверхность (уголь, оставшийся в целиках, выработанных пространствах угольных пластов и нарушенных пластах-спутниках, подрабатываемые и надрабатываемые ниже верхней границы метановой зоны угольные пласты в зоне отработки, газоносные и обводненные породы, а также скопления вредных газов в геологических нарушениях, зонах динамического влияния разломов и др.). Установлены [6, 7] основные пути миграции вредных газов:

- стволы, шурфы, технические и дегазационные скважины, другие горные выработки, имеющие выход на поверхность и связанные с выработанными пространствами и горизонтами через выработки и трещины;
- незатампонированные геологоразведочные и дегазационные скважины, пройденные с поверхности и имеющие связь с выработанными пространствами;
- тектонические и геологические нарушения, рассекающие свиту пород до поверхности, с выходом в отработанные пространства или связанные с ними по выработкам или трещинам;
- места выходов пластов на поверхность;
- трещиноватые породы и пласты и др.

Средняя продолжительность периода, в течение которого вредные газы выделяются по трещинам на поверхность земли, составляет 5...10 и более лет. Наиболее опасны по выделению вредных газов весенне-летние месяцы в связи с резкими колебаниями барометрического давления [3, 4].

Согласно работам [6, 7] поверхностные объекты горных отводов шахт по опасности выделения вредных газов делятся на зоны: неопасные (площади, в пределах которых нет и не ожидается выделения метана); угрожаемые (площади, где не наблюдается выделения метана на земную поверхность, но оно может возникнуть в результате ведения горных работ); опасные зоны (площади, в пределах которых обнаружено выделение метана). Однако в проанализированных материалах отсутствуют технологические аспекты непосредственного и дистанционного отбора проб воздуха на поверхностных объектах с целью дальнейшего газового анализа и оценки.

Не приведены принципиальные схемы контроля газовой обстановки в зданиях и сооружениях, в том числе схемы систем дистанционного отбора проб воздуха; отбора проб газозвдушной смеси из газоотводящих труб или экспресс-анализа проб с помощью переносных приборов газового контроля; отбора проб воздуха у потолка и у почвы зданий (сооружений), подвальных или других помещений.

Не учтены приборы газового анализа и определения содержания в атмосфере вредных газов, кроме шахтных интерферометров типа ШИ. Отсутствуют регламентированные меры безопасности при осуществлении газового контроля на поверхностных объектах, расположенных в опасных зонах.

Цель настоящей статьи – исследование и разработка технологий, принципиальных схем и мер безопасности мониторинга газовой обстановки на горных отводах шахт, в зданиях и сооружениях подразделениями горноспасательной службы путем непосредственного и дистанционного отбора и анализа проб воздуха на поверхностных объектах.

Материалы и результаты исследований. Согласно проведенным исследованиям объекты контроля в опасных зонах следующие:

- помещения первых этажей зданий, подполья и подвальные помещения жилых домов, хозяйственные постройки;
- смотровые колодцы подземных коммуникаций и других углублений;
- устья дегазационных, геологических, водоотливных и других скважин;
- газоотводящие трубы ликвидированных горных выработок и шахт;
- горные выработки, имеющие выход на поверхность;
- почва вокруг зданий и у границ опасных зон.

Мониторинг газовой обстановки на поверхностных объектах проводят двумя способами отбора проб воздуха: непосредственным и дистанционным [7, 8]. Для отбора, перевозки и хранения проб воздуха с целью определения содержания метана, диоксида углерода, других газов применяют бюретки и резиновые камеры. При этом время хранения проб воздуха в резиновых камерах (от их набора до начала газового анализа) не должно превышать 12 ч. Газовый анализ проб воздуха осуществляют в специализированной газоаналитической лаборатории горноспасательного подразделения и (или) экспресс-методом в местах их отбора.

Непосредственно отбор проб воздуха в резиновые камеры проводят с использованием вакуумных ручных насосов (рис. 1).

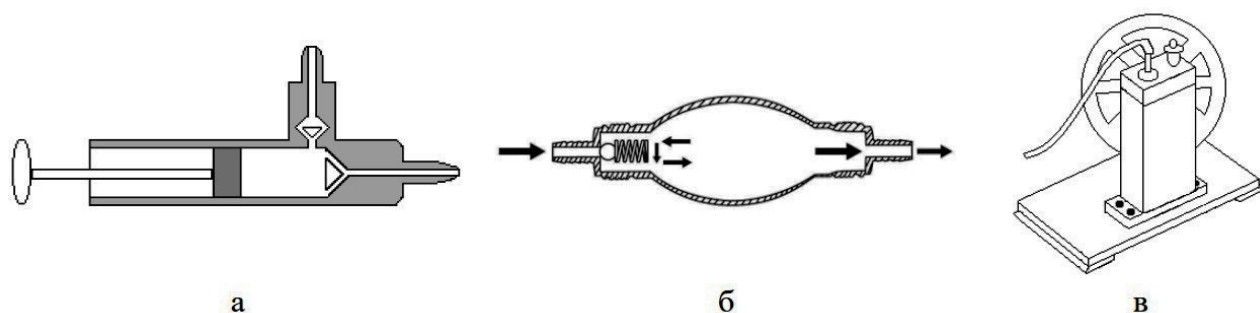


Рис. 1. Вакуумные ручные насосы:

а – ручной насос Шинца; б – вакуумная груша; в – вакуумный насос Комовского

Отбор проб воздуха в бюретки мокрым способом не допускается. Однако в случае необходимости (например, для отбора проб из труднодоступных мест или из вертикальных горных выработок) следует использовать метод продувания (дистанционный отбор проб воздуха), который основан на непрерывном прокачивании воздуха через пробоотборный трубопровод благодаря разрежению, создаваемому побудителем расхода. За время прокачивания воздуха происходит продувка магистральной линии трубопровода, достаточная для получения пробы [8, 9].

Для дистанционного отбора проб воздуха рекомендуется использовать побудители расхода: воздушный эжектор ВЭЖ, эжекторный автоматический аспиратор «АЭРА», вакуумный насос ВН-461М, эжекторную установку УЭ-1М и др. Комплект системы дистанционного отбора проб воздуха, порядок ее монтажа, проверки, эксплуатации и демонтажа приведены в работе [9].

На рис. 2 и 3 представлены принципиальные схемы систем дистанционного отбора проб воздуха в бюретки и резиновые камеры с использованием эжекторной установки УЭ-1М и вакуумного насоса в качестве побудителей расхода.

Время продувки пробоотборного трубопровода τ , мин, следует определять по формуле

$$\tau = 0,00314 \frac{d^2 l}{v},$$

где d – внутренний диаметр пробоотборного трубопровода, мм;

l – длина пробоотборного трубопровода, м;

v – производительность побудителя расхода, л/мин.

С целью газового анализа отобранных проб воздуха в специализированной газоаналитической лаборатории необходимо использовать объемно-оптический газоанализатор «ООГ-2», газоанализаторы типа «СИГМА», газовый хроматограф «Кристалл-2000М». Для экспресс-анализа газовой обстановки и отобранных проб воздуха помимо шахтных интерферометров типа ШИ (ШИ-11, ШИ-12) [8] рекомендовано применять мультигазоанализаторы «МХ-2100», газоанализаторы на токсичные и горючие газы типа М-02, хроматографы «Поиск-2» и др.

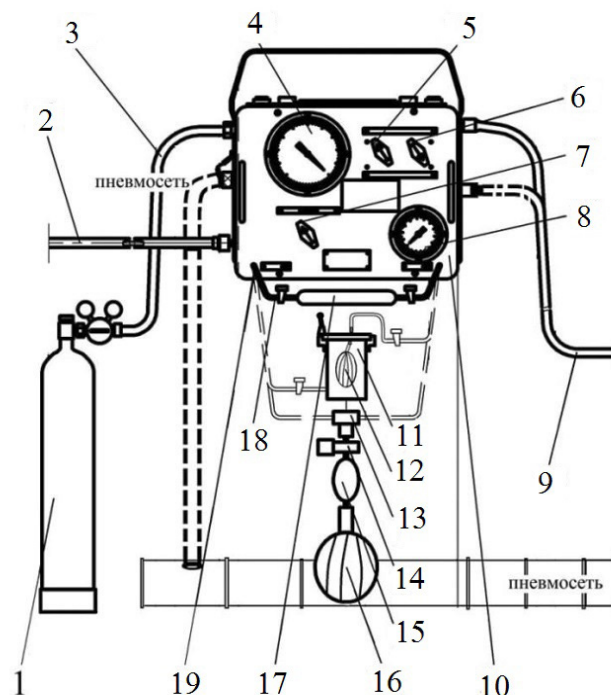


Рис. 2. Принципиальная схема системы дистанционного отбора проб воздуха в бюретки и камеры с использованием эжекторной установки УЭ-1М в качестве побудителя расхода:

1 – баллон (с редуктором) со сжатым воздухом; 2 – пробоотборный трубопровод; 3 – соединительный рукав; 4 – вакуумметр; 5, 6, 7 – краны выбора режимов работы и питания; 8 – манометр; 9 – отводной шланг для сброса воздуха в окружающую среду; 10 – эжекторная установка УЭ-1М; 11 – буферный резервуар для набора пробы воздуха в камеру; 12, 16 – резиновые камеры; 13 – Т-образный соединительный тройник; 14 – шаровой кран; 15 – резиновая вакуумная груша; 17 – бюретка; 18 – соединительные трубки с зажимами Мора; 19 – штуцеры «Проба»

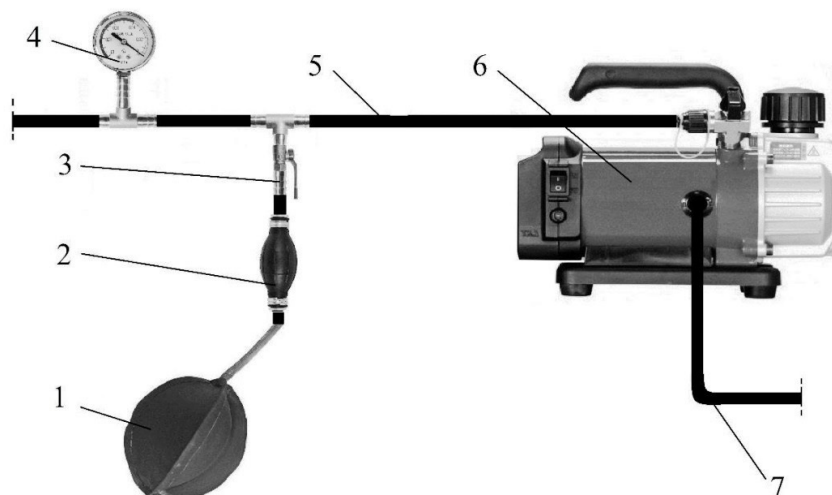


Рис. 3. Принципиальная схема системы дистанционного отбора проб воздуха в бюретки и резиновые камеры с использованием вакуумного насоса в качестве побудителя расхода:

1 – резиновая камера; 2 – резиновая вакуумная груша; 3 – Т-образный соединительный тройник с шаровым краном; 4 – мановакуумметр (вакуумметр); 5 – пробоотборный трубопровод; 6 – вакуумный насос; 7 – отводной шланг для сброса воздуха в окружающую среду

Сенсорные приборы газового контроля позволяют осуществлять экспресс-анализ проб воздуха с помощью специальных пробозаборных насадок со штуцерами, адаптеров и шлангов. Для определения содержания в атмосфере оксида и диоксида углерода, кислорода, оксидов азота, сернистого газа, сероводорода, аммиака и других газов допускается использование химического газоопределителя ГХ-М, состоящего из мехового аспиратора АМ-5 и индикаторных трубок.

Отбор проб газовой смеси в резиновые камеры из газоотводящей трубы или экспресс-анализ пробы с помощью переносного прибора газового контроля проводят согласно схеме, представленной на рис. 4. При этом на газоотводящих трубах (как правило, на высоте 1,0...1,5 м от поверхности земли) для отбора проб следует выполнять врезку штуцеров диаметром 3...6 мм, закрываемых пробками или заглушками.

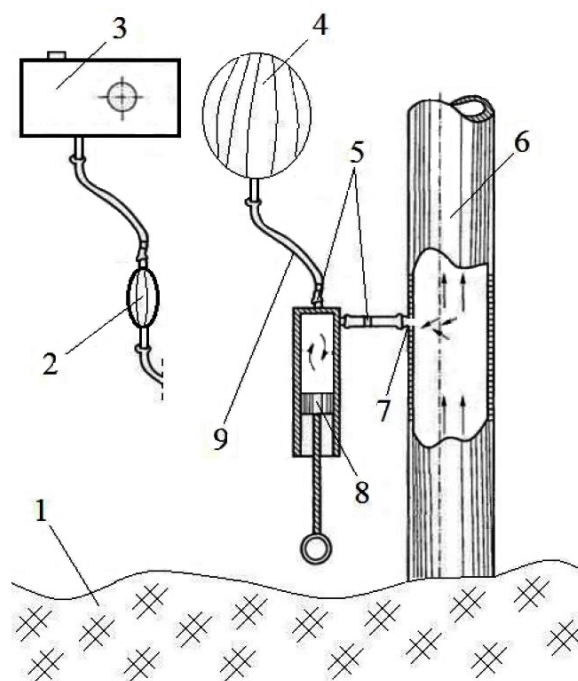


Рис. 4. Схема отбора проб газовой смеси в резиновые камеры из газоотводящей трубы или экспресс-анализа пробы с помощью переносного прибора газового контроля:

- 1 – земная поверхность; 2 – резиновая груша от шахтного интерферометра типа ШИ;
 3 – переносный прибор газового контроля (например, шахтный интерферометр типа ШИ); 4 – камера для отбора проб; 5 – обратные клапаны; 6 – газоотводящая труба;
 7 – штуцер; 8 – ручной насос Шинца; 9 – шланг

Измерение содержания метана с помощью переносных приборов газового контроля и отбор проб воздуха в зданиях (сооружениях), подвальных и других помещениях выполняют в верхней части в 0,05 м от потолка у выхода (исходящей струи) из здания, а диоксида углерода – в 0,05 м от почвы у наиболее глубокого места или у имеющих трещин.

При выполнении измерений в зданиях, расположенных в опасных зонах, перед началом работ необходимо: проанализировать состояние исследуемых

объектов; выбрать способ измерения состава газов, необходимое оборудование и приборы; разработать порядок действий при выполнении измерений, а также соблюдать меры безопасности, которые предполагают следующее:

- обследование объектов контроля следует осуществлять двумя лицами;
- запрещены курение и применение открытого источника огня на обследуемых объектах;
- здания и сооружения, хозяйственные и подвальные помещения, в которые могут поступать вредные газы с повышенным содержанием метана или диоксида углерода, должны быть обеспечены естественной или принудительной вытяжной системой вентиляции;
- при обследовании объектов необходимо заранее осмотреть подходы к ним, обращая особое внимание на наличие провалов, проветривание, состояние газоотводящих труб, ограждений и др.;
- запрещается подходить к ликвидированным горным выработкам, имеющим выход на земную поверхность, при неисправности или отсутствии ограждений и перекрытий их устьев;
- запрещается выполнять измерения состава почвенного воздуха вокруг горных выработок, имеющих выход на земную поверхность, на которых не завершены работы по ликвидации надшахтных строений и уборке строительных отходов;
- отбор проб воздуха с целью недопущения ошибок замеров и риска несчастного случая при контроле следует проводить при благоприятных атмосферных условиях (отсутствии дождя, снега, сильного ветра);
- рекомендуется постоянно следить за собственным самочувствием и самочувствием других исполнителей, участвующих в работах. При появлении симптомов ухудшения самочувствия или отравления газами всем исполнителям работ необходимо немедленно удалиться с объекта контроля;
- в зданиях и сооружениях, расположенных в опасных зонах, на видных местах и внутри них должны быть вывешены предупредительные таблички.

Измерение концентраций содержащихся в почвенном воздухе газов (в ограниченном объеме) следует выполнять при помощи воздухозаборного и накопительного устройств, особенности действия которых представлены в работах [6, 7]. Пример оформления результатов анализа проб почвенного воздуха, отобранных для определения фонового содержания диоксида углерода CO_2 , приведен в таблице.

Объемную долю диоксида углерода CO_2 , %, в почвенном воздухе рекомендуется определять следующим образом.

- Получив результаты анализа 10 проб, рассчитать сумму индивидуальных значений объемной доли диоксида углерода CO_2 , % (графа 2).
- Определить среднее значение объемной доли диоксида углерода CO_2 , %

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^{10} C_i}{n} = \frac{12,0}{10,0} = 1,2.$$

Оформление результатов анализа проб почвенного воздуха, отобранных для определения объемной доли диоксида углерода CO₂

Порядковый номер места отбора проб почвенного воздуха n_1	Индивидуальная объемная доля диоксида углерода в пробе по результатам анализа C_p , %	Разность между средним и индивидуальным значениями объемной доли диоксида углерода $CO_2 (\bar{N} - \tilde{N}_i)$, %	Квадрат разности между индивидуальным и средним значениями объемной доли диоксида углерода $CO_2 (\bar{N} - \tilde{N}_i)^2$, %
1	1,2	0,0	0,00
2	1,2	0,0	0,00
3	1,3	0,1	0,01
4	1,3	0,1	0,01
5	1,1	0,1	0,01
6	1,2	0,0	0,00
7	1,1	0,1	0,01
8	1,2	0,0	0,00
9	1,2	0,0	0,00
10	1,2	0,0	0,00
$n = 10$	$\sum_1^{10} C_i = 12,0$		$\sum_1^{10} (\bar{C} - C_i)^2 = 0,04$

- Найти разность между средним и каждым индивидуальным значением объемной доли диоксида углерода CO₂, % (графа 3).
- Найти сумму квадратов разности между индивидуальным и средним значениями объемной доли диоксида углерода CO₂, % (графа 4).
- Определить среднеквадратическое отклонение значений объемной доли диоксида углерода CO₂, %, по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} (\bar{C} - C_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,04}{9}} = 0,067.$$

- Определить фоновое значение объемной доли диоксида углерода CO₂, %, в почвенном воздухе по формуле

$$C_{\text{фон.}} = \bar{C} + t_v \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,067}{\sqrt{10}} = 1,2 + 3,89 \frac{0,067}{\sqrt{10}} = 1,2 + 1,23 \cdot 0,067 = 1,2 + 0,08 \cong 1,3,$$

где t_v – квантиль распределения Стьюдента, который при 10 измерениях и надежности 0,997 равен 3,89.

Выводы. На основе выполненных исследований разработаны технологии и предложены меры безопасности при мониторинге газовой обстановки на

поверхностных объектах горных отводов шахт, в зданиях и сооружениях подразделениями горноспасательной службы путем непосредственного и дистанционного отбора и анализа проб воздуха.

Разработаны принципиальные схемы контроля газовой обстановки на поверхностных объектах горных отводов шахт, в зданиях и сооружениях, в том числе схемы систем дистанционного отбора проб воздуха, схемы отбора проб газозадушной смеси из газоотводящих труб или экспресс-анализа проб с помощью переносных приборов газового контроля и схемы отбора проб воздуха у потолка и у почвы здания (сооружения), в подвальном или другом помещении.

Учтены современные приборы газового анализа и рекомендованы меры безопасности при ведении контроля на поверхностных объектах, расположенных в опасных зонах.

Предложенные рекомендации позволят повысить безопасность людей, защиту зданий и сооружений за счет регламентирования основ эффективного ведения контроля выделения вредных газов на земную поверхность при ликвидации (консервации) шахт.

Список литературы / References

1. Техногенные исследования закрытия угольных шахт Украины / Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков, Ю.Ф. Кренида [и др.]. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 632 с.

Gavrilenko Yu.N., Ermakov V.N., Krenida Yu.F. [et al]. *Tekhnogennyye issledovaniya zakrytiya ugol'nykh shakht Ukrainy* [Technogenic investigations of closure of Ukraine's coal mines]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2004, 632 p. (In Russian).

2. Косов, О.И. Оценка экологической безопасности территорий горных отводов ликвидируемых шахт Восточного Донбасса: дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2010. – 140 с.

Kosov O.I. *Otsenka ekologicheskoi bezopasnosti territorii gornyykh otvodov likvidiruemykh shakht Vostochnogo Donbassa: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Environmental safety evaluation of territories of mining claims of Eastern Donbass mines under liquidation: Cand. tech. sci. diss.]. Tula, 2010, 140 p. (In Russian).

3. Исследование эмиссии угольного метана на поверхность из ликвидируемых шахт / Т.В. Корчагина, Н.В. Ефимова, А.Б. Жабин, С.А. Ишутина // Известия Тульского государственного университета: науки о Земле. – Тула, 2017. – № 4. – С. 48 – 60.

Korchagina T.V., Efimova N.V., Zhabin A.B., Ishutina S.A. *Issledovanie emissii ugol'nogo metana na poverkhnost' iz likvidiruemykh shakht* [Investigation of coal bed methane emission to the surface from the coal mines under liquidation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta: nauki o Zemle – Izvestiya of the Tula State University: Earth sciences*, Tula, 2017, no. 4, pp. 48-60. (In Russian).

4. Ворхлик, И.Г. Технология закрытия (ликвидации) угольных шахт / И.Г. Ворхлик, В.И. Стрельников, И.Ф. Ярембаш; под ред. д-ра техн. наук проф. И.Ф. Ярембаша. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 238 с.

Vorkhlik I.G., Strel'nikov V.I., Yarembash I.F. Prof., Dr. Sci. (Tech.) Yarembash I.F. (ed.). *Tekhnologiya zakrytiya (likvidatsii) ugol'nykh shakht* [Technology of closure (liquidation) of coal mines]. Donetsk, DonNTU Press, 2004, 238 p. (In Russian).

5. Исследование содержания метана в почвенном воздухе в области выхода под наносы геологических нарушений / Т.А. Василенко, Н.И. Волошина, И.Е. Кольчик [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 159 – 166.

Vasilenko T.A., Voloshina N.I., Kol'chik I.E. [et al]. *Issledovanie sodержaniya metana v pochvennom vozdukhe v oblasti vykhoda pod nanosy geologicheskikh narushenii* [Investigation of methane content in soil air in the area under the outcrops of geological disturbances]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* – Mining informational and analytical bulletin, 2016, no. 7, pp. 159-166. (In Russian).

6. Контроль за выделением вредных газов на земную поверхность / А.М. Симонов, Н.В. Карнаух, А.В. Агарков, В.В. Захлебин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 1(58). – С. 94 – 101.

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Agarkov A.V., Zakhlebin V.V. *Kontrol' za vydeleniem vrednykh gazov na zemnyu poverkhnost'* [Monitoring of harmful gas emissions onto the ground surface]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekh. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 1(58), pp. 94-101. (In Russian).

7. О мониторинге и контроле за выделением вредных газов на земную поверхность, в здания и сооружения подразделениями горноспасательной службы при ликвидации и консервации угольных шахт / А.М. Симонов, Н.В. Карнаух, В.В. Захлебин, А.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – № 2(9). – С. 323 – 332.

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Zakhlebin V.V., Agarkov A.V. *O monitoringe i kontrole za vydeleniem vrednykh gazov na zemnyu poverkhnost', v zdaniya i sooruzheniya podrazdeleniyami gornospasatel'noi sluzhby pri likvidatsii i konservatsii ugol'nykh shakht* [On monitoring and control of harmful gas emissions onto the ground surface, into buildings and constructions by subdivisions of the mine-rescue service during liquidation and conservation of coal mines]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO "Akademiya grazhdanskoi zashhity" MChS DPR Press, 2021, no. 2(9), pp. 323-332. (In Russian).

8. Агарков, А.В. Приборы газового анализа проб шахтного воздуха, отобранных непосредственным или дистанционным способами при ликвидации пожаров и ведении горноспасательных работ / А.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – № 2(9). – С. 20 – 29.

Agarkov A.V. *Pribory gazovogo analiza prob shakhtnogo vozdukha, otoprannykh neposredstvennym ili distantsionnym sposobami pri likvidatsii pozharov i vedenii gornospasatel'nykh rabot* [Devices for gas analysis of mine air samples collected directly or remotely during elimination of fires and carrying-out of mine-rescue operations]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO "Akademiya grazhdanskoi zashhity" MChS DPR Press, 2021, no. 2(9), pp. 20-29. (In Russian).

9. Система дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ / В.В. Мамаев, А.М. Симонов, А.В. Агарков, В.Г. Турчанин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 3(57). – С. 54 – 63.

Mamayev V.V., Simonov A.M., Agarkov A.V., Turchanin V.G. *Sistema distantsionnogo otbora prob shakhtnogo vozdukha pri vedenii avariino-spasatel'nykh rabot* [System of remote collection of mine air samples during carrying-out of mine-rescue operations]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 3(57), pp. 54-63. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 05.08.2021

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

MONITORING OF GAS CONDITIONS AT CLAIMS OF COAL MINES, IN BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

Purpose. Investigation and development of technologies, schematic diagrams and safety measures for monitoring the gas conditions at the claims of coal mines, in buildings and constructions by subdivisions of the mine-rescue service applying the direct and remote sampling and analysis of air samples at surface objects.

Methods. Analytical method of investigation and method of plotting the schematic diagrams using the graphic editors.

Results. Improvement of people safety, protection of buildings and constructions due to regulation of the basics of the effective monitoring of harmful gas emission onto the surface of the mining claims during liquidation (conservation) of mines.

Scientific novelty. The novel principle diagrams of gas conditions monitoring at the claims of mines, in buildings and constructions have been developed as well as the schematics of systems for remote sampling of air; the ones for collecting the gas-air mixture samples from gas-outlet pipes or express-analysis of samples applying the portable gas monitoring devices; systems for the air sampling near the ceiling and floor of buildings (constructions), basements and other premises.

Practical value. The results of the conducted investigations have been applied in development of the Guidelines for monitoring of harmful gas emissions onto the ground surface, into buildings and constructions by the sub-divisions of the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry of civil defence, emergency situations and elimination of consequences of natural disasters of the Donetsk People's Republic during the liquidation (conservation) of mines.

Keywords: *harmful gases; mining claim; buildings and constructions; monitoring methods and devices; collection and analysis of air samples; ensuring people's safety; liquidation and conservation of coal mines; mine-rescue service.*

УДК 614.841.245:621.313.012.5

Владлен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр., e-mail: opbush@mail.ru;

Александр Андреевич Березин, инж.; e-mail: fire408@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-80*

СОВОКУПНЫЕ ПРИЗНАКИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Цель. Установление совокупных признаков аварийных режимов работы электроустановок на поверхности фрагментов, изъятых с места пожара.

Методы. Морфологический анализ и аналитические исследования поверхностей фрагментов электроустановок с визуальными признаками аварийных режимов работы.

Результаты. Установлена взаимосвязь аварийных режимов работы с возникновением пожара по оплавлениям на поверхностях фрагментов электроустановок, изъятых с места пожара.

Научная новизна. На основе морфологического анализа фрагментов, изъятых с места пожара, определены характерные совокупные признаки аварийных режимов работы электроустановок.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют определить причинно-следственную связь аварийных режимов работы электроустановок.

Ключевые слова: *аварийные режимы работы; короткое замыкание; большое переходное сопротивление; контактное соединение; электроустановка; оплавления; морфологический анализ.*

Постановка проблемы. Аварийный режим работы электроустановки – это режим работы, который сопровождается отклонением рабочих параметров от предельно допустимых значений и характеризуется повреждением, выходом из строя электроустановок, возможным перерывом электроснабжения, а также представляет угрозу для жизни людей.

При составлении технических заключений о причинах пожаров специалисты проводят инструментальные исследования фрагментов электроустановок, изъятых с места пожара, для установления признаков, характерных для аварийных режимов работы.

Для решения вопроса о непосредственной (технической) причине пожара важно установление признаков аварийных режимов работы электроустановок при проведении инструментальных исследований причастности к возникновению пожара.

В техническом заключении специалист указывает, какой из аварийных режимов работы электроустановки предшествовал другому: это позволяет повысить достоверность версии о причине возникновения пожара.

Результаты исследований. При морфологическом анализе признаков аварийных режимов работы электроустановок, изъятых с места пожара, необходимо учитывать все совокупные признаки аварийных режимов, так как только при системном подходе можно достоверно определить или исключить взаимосвязь аварийных режимов с возникновением пожара.

При проведении инструментальных исследований изменения свойств материалов вследствие внутреннего или внешнего теплового воздействия установлены совокупные признаки аварийных режимов работы в различных сочетаниях (первичное короткое замыкание и большое переходное сопротивление; большое переходное сопротивление и токовая перегрузка; первичное короткое замыкание и токовая перегрузка; большое переходное сопротивление и вторичное короткое замыкание и т.д.) [1].

Для проведения инструментальных исследований были предоставлены фрагменты медных и алюминиевых проводов, токопроводящие жилы которых соединены между собой контактными соединениями «в скрутку», изъятые при осмотре места пожара из распределительной коробки.

Согласно [2, 3] комплексное исследование образцов, изъятых с места пожара, включает:

- визуальный осмотр;
- морфологический анализ.

При визуальном осмотре фрагментов образца установлены: трещины, карбонизация, локальные оплавления на поверхности изоляционного материала контактного соединения «в скрутку» и термодеструкция изоляции проводов.

При визуальном осмотре изоляционных материалов контактных соединений «в скрутку» и токопроводящих жил учитывают, что при термическом воздействии материал высыхает, трескается, изменяет геометрическую форму [3].

После снятия изоляционного материала с фрагментов образца при инструментальных исследованиях мест контактного соединения «в скрутку» выявлены признаки, характерные для аварийного режима работы в электросети – большого переходного сопротивления, о чем свидетельствуют:

- оплавления на поверхности изоляции проводов (рис. 1);
- карбонизация изоляционного материала с внутренней стороны соединения (рис. 2);



Рис. 1. Оплавления на поверхности изоляции проводов при увеличении в 200 раз



Рис. 2. Карбонизация изоляционного материала с внутренней стороны при увеличении в 300 раз

- сплавление токопроводящих жил медного и алюминиевого проводов (рис. 3);
- волнообразные наплывы с вкраплениями меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода (рис. 4).

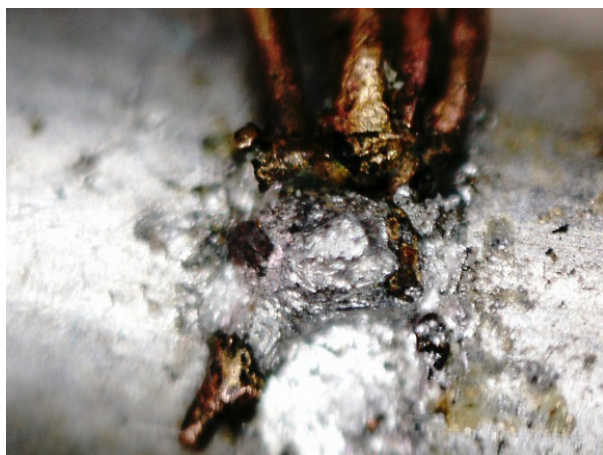


Рис. 3. Сплавление токопроводящих жил медного и алюминиевого проводов при увеличении в 350 раз

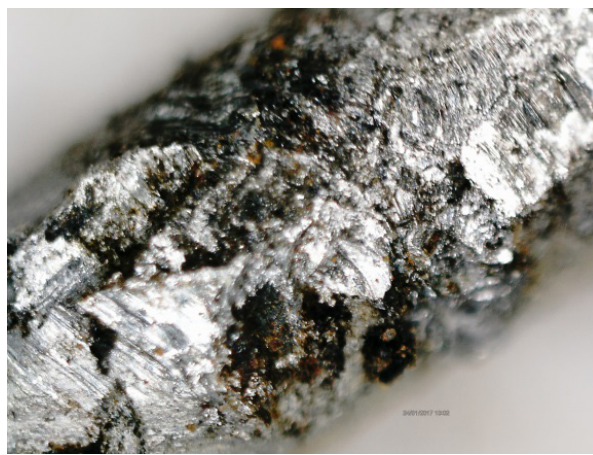


Рис. 4. Волнообразные наплывы с вкраплениями меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода при увеличении в 350 раз

При инструментальных исследованиях предоставленных фрагментов образца выявлены признаки, характерные для аварийного режима работы в электросети – короткого замыкания, о чем свидетельствуют:

- шарообразные оплавления на поверхности токопроводящей жилы медного провода в месте контактного соединения «в скрутку» (рис. 5);
- разлет частиц меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода в месте контактного соединения «в скрутку» (рис. 6).

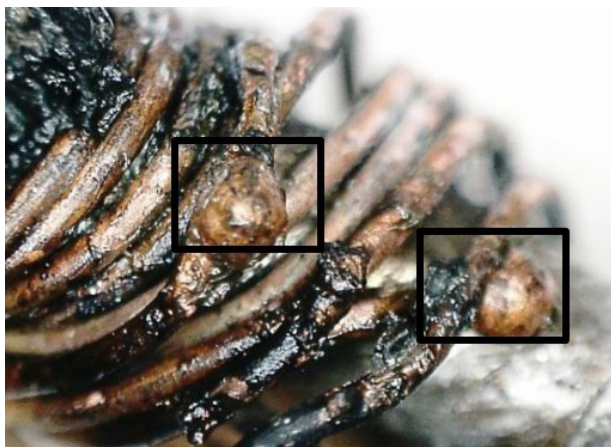


Рис. 5. Шарообразные оплавления на поверхности токопроводящей жилы медного провода при увеличении в 350 раз

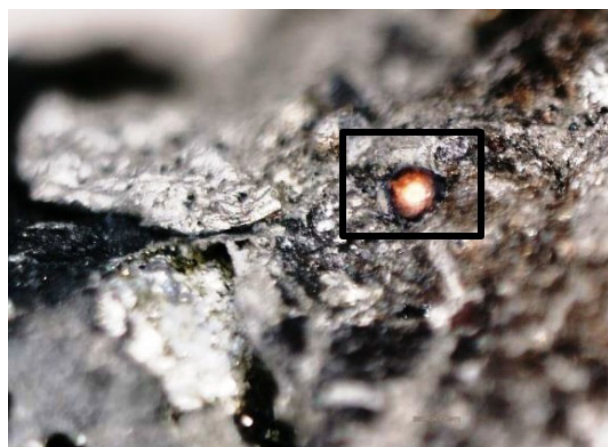


Рис. 6. Разлет частиц меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода при увеличении в 350 раз

Из этого следует, что развитие аварийных режимов в контактном соединении «в скрутку» происходило следующим образом.

Вода (влага), которая содержится в окружающей среде, адсорбировалась на поверхности изоляционного материала контактных соединений «в скрутку».

Старение изоляционного материала характеризуется уменьшением его эластичности, механической прочности и диэлектрических свойств, вследствие чего образовалась поверхностная пленка со свойствами электролита.

В месте контакта токопроводящих жил медного и алюминиевого проводов с различными окислительно-восстановительными потенциалами образовалась гальваническая пара – поверхность жилы алюминиевого провода выступила в качестве анода, что привело к электрохимической коррозии [4].

В результате этого величина переходного сопротивления в месте контактных соединений токопроводящих жил проводов увеличивалась, в связи с чем температура в контактных соединениях повысилась. Это привело к сплавлению токопроводящих жил медного и алюминиевого проводов (рис. 3) и образованию волнообразных наплывов с вкраплениями меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода (рис. 4) в месте контактного соединения «в скрутку».

Длительное повышение температуры токопроводящих жил медных и алюминиевых проводов в местах контактных соединений «в скрутку» привело к карбонизации изоляции и ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов.

Из-за ухудшения диэлектрических свойств изоляционного материала контактных соединений «в скрутку», которые были выполнены в распределительной коробке, с течением времени между поверхностями расположенных рядом контактных соединений «в скрутку» произошло короткое замыкание, при этом в месте его возникновения образовалась электрическая дуга, о чем свидетельствуют шарообразные оплавления на поверхности токопроводящей жилы медного провода (рис. 5) и разлет частиц меди на поверхности токопроводящей жилы алюминиевого провода (рис. 6).

Выводы. В результате проведенных инструментальных исследований фрагментов медных и алюминиевых проводов, изъятых с места пожара, выявлены морфологические признаки, характерные для совокупных аварийных режимов работы электроустановок – большого переходного сопротивления и короткого замыкания.

Аналитически установлены последовательность и характер возникновения аварийных режимов работы.

Результаты инструментальных исследований позволяют дополнить существующие методики по определению признаков аварийных режимов работы и повысить уровень объективности при составлении технических заключений о причинах пожаров.

Список литературы / References

1. Атлас по определению признаков аварийных режимов работы электрооборудования: утв. МЧС ДНР 18.10.2018. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2018. – 154 с.

Atlas po opredeleniyu priznakov avariynykh rezhimov raboty elektrooborudovaniya: utv. MChS DNR 18.10.2018 [The Atlas for determination of indicators of emergency states of the electric equipment operation: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on October 18, 2018]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2018, 154 p.

2. Методические рекомендации по определению вида короткого замыкания: утв. МЧС ДНР 05.11.2015. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 29 с.

Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu vida korotkogo zamykaniya: utv. MChS DNR 05.11.2015 [Methodological guidelines for determination of the short circuit type: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on November 15, 2015]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016, 29 p. (In Russian).

3. Методические рекомендации по определению признаков большого переходного сопротивления и температуры нагрева электроустановок: утв. МЧС ДНР 14.03.2016. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 32 с.

Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu priznakov bol'shogo perekhodnogo soprotivleniya i temperatury nagreva elektroustanovok: utv. MChS DNR 14.03.2016 [Methodological guidelines for determining the indicators of the high transition resistance and of the heating temperature of electrical installations: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on March 14, 2016]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016. – 32 p. (In Russian).

4. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм; пер. с англ.; под ред. Д.Е. Брускина. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.

Khol'm R., Bruskin D.E. [ed.]. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1961, 464 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 28.10.2021

Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Aleksandr Andreyevich Berezin, engineer; e-mail: fire408@mail.ru

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-80

COMPREHENSIVE CHARACTERISTICS OF EMERGENCY OPERATION MODES IN CONTACT JOINTS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

Purpose. Determination of comprehensive characteristics of the emergency operation modes of the electrical installations on the surface of fragments taken from a place of fire.

Methods. Morphological analysis and analytical investigations of the surfaces of the electrical installations fragments with the visible marks of the emergency operation modes.

Results. The interrelation of the emergency operation modes and a fire outbreak has been established by melts on the surfaces of the electrical installations fragments taken from the place of fire.

Scientific novelty. On the basis of the morphological analysis of the fire fragments taken from a place of fire the comprehensive characteristic marks of the emergency operation modes of the electrical installations have been defined.

Practical value. The results of the investigations facilitate to determine a cause-effect relation of the emergency operation modes of the electrical installations.

Keywords: *emergency operation modes; short-circuit; high transient electrical resistivity; contact joint; electrical installation; melts; morphological analysis.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 614.894.732:62-181.4

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

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-45*

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ШЛАНГОВЫЙ АППАРАТ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ РАБОТ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ СРЕДАХ

Цель. Разработка малогабаритного шлангового дыхательного аппарата упрощенной конструкции для защиты органов дыхания работников при ведении работ в загрязнённых средах.

Методы. Экспериментальные методы исследований.

Результаты. Разработан опытный образец малогабаритного шлангового дыхательного аппарата, соответствующий требованиям действующих нормативных документов.

Научная новизна. Установлено влияние отношения мёртвого пространства к лёгочной вентиляции искусственных лёгких на содержание диоксида углерода при испытаниях воздушного дыхательного аппарата на динамической установке.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований стали основой разработанного малогабаритного шлангового дыхательного аппарата упрощенной конструкции, повышающего безопасность ведения работ в загрязнённых средах.

Ключевые слова: *шланговый дыхательный аппарат; воздушный дыхательный аппарат; лёгочный автомат; катушка; клапан выдоха; сопротивление дыханию; давление в подмасочном пространстве; воздухопроводный рукав.*

Постановка проблемы. Для защиты органов дыхания работников, выполняющих работы в загрязнённых средах, применяется специальная дыхательная аппаратура [1]. Широкое распространение получили фильтрующие средства защиты органов дыхания [2], обладающие такими положительными качествами, как простота эксплуатации, малая масса и доступность. С другой стороны, у фильтрующих средств защиты органов дыхания высокое сопротивление входу и не всегда эффективная фильтрация вдыхаемого воздуха (например, в случае наличия дополнительных загрязняющих примесей).

Поэтому при проведении продолжительных работ необходимо применять средства индивидуальной защиты органов дыхания, имеющие минимальную массу, обеспечивающие максимально эффективную защиту и не доставляющие дискомфорт (сопротивление дыханию, температура вдыхаемого воздуха). В связи с этим при проведении длительных технологических, аварийно-спасательных и ремонтных работ в разных областях хозяйственной деятельности целесообразно применять шланговые дыхательные аппараты [3].

Главное преимущество таких аппаратов – практически неограниченное время защитного действия, определяемое только физиологическими

возможностями пользователя и необходимостью периодического обслуживания воздухоподающей линии (регламентированная замена фильтрующих элементов).

Шланговые дыхательные аппараты можно применять в местах с полным отсутствием кислорода, при недостаточном количестве его или при неизвестном составе отравляющих примесей.

Лицевые части с избыточным давлением в подмасочном пространстве позволяют обеспечить высокий уровень безопасности пользователя шланговых дыхательных аппаратов благодаря исключению подсоса воздуха по линии обтюрации. Свободное перемещение пользователя ограничивает только длина шланга, из-за чего данный тип аппаратов не имеет широкого распространения.

Разработанные шланговые дыхательные аппараты с автономной носимой частью дают пользователю возможность в аварийной ситуации безопасно эвакуироваться из загрязненной среды. Однако часто существуют ситуации, когда кратковременное пребывание в данной среде во время эвакуации без средств защиты не наносит вреда здоровью пользователя. С другой стороны, постоянно носить на себе автономную часть шлангового дыхательного аппарата достаточно утомительно, особенно при длительных работах. Поэтому для таких случаев разработка шлангового дыхательного аппарата упрощенной конструкции – актуальная задача.

Анализ последних исследований. Существуют шланговые дыхательные аппараты, которые могут быть оснащены носимой автономной частью или эксплуатироваться без неё. Дыхательный шланговый аппарат (ДША) «Вектор» предназначен для защиты органов дыхания и зрения производственного персонала, аварийно-спасательных бригад и профессионального использования частями МЧС в непригодной для дыхания газовой, задымленной или запыленной среде, где невозможно применение фильтрующих и изолирующих аппаратов из-за их больших габаритов.

Дыхательный шланговый аппарат (вариант исполнения 1) включает в себя:

- панорамную маску с легочным автоматом;
- шланг аппарата с разъёмом для подсоединения к внешнему источнику подачи воздуха;
- подвесную систему, состоящую из плечевого и поясного ремней с подушкой.

ДША «Вектор» (вариант исполнения 1) без баллона с аварийным запасом воздуха предназначен для применения только персоналом, обслуживающим станцию воздухообеспечения «Каскад», поскольку в этом случае отсутствует необходимость в дополнительном аварийном запасе воздуха.

В отличие от ДША «Вектор» в автономном источнике воздухообеспечения (шланговом противогазе) АИВ-ГИК изначально не используют малолитражный баллон для подачи воздуха при эвакуации. Воздухообеспечение осуществляется при помощи принудительной подачи воздуха из чистой зоны к органам дыхания через лицевую часть по шлангу длиной 25...50 м. Создаваемое нагнетателем воздуха избыточное давление исключает необходимость плотного прилегания

лицевой части по линии обтюрации, запотевание смотровых экранов лицевых частей и попадание в подмасочное пространство вредных веществ. Автономный источник воздухообеспечения смонтирован на тележке, где установлены два нагнетателя воздуха, две аккумуляторные батареи, противоаэрозольный фильтр и барабан с облегченным химико-абразивостойким шлангом. Второй нагнетатель воздуха и аккумуляторная батарея – резервные и предназначены для повышения безопасности в случае прекращения работы (поломки) основных компонентов комплекта.

Данные аппараты при всех положительных качествах имеют сложную конструкцию, обуславливающую их высокую стоимость. Громоздкие, тяжёлые тележки затрудняют мобильность этих аппаратов.

Результаты исследований. В НИИГД «Респиратор» разработан малогабаритный шланговый дыхательный аппарат (АДШМ) для индивидуальной защиты органов дыхания при малярных работах в закрытых помещениях, работах с моющими и имеющими сильный запах жидкостями, при других ремонтных и технологических работах в непригодной для дыхания среде, удаленный на расстояние не более 20 м от пригодной для дыхания среды (технические параметры АДШМ см. в табл. 1).

Таблица 1

Технические параметры АДШМ

Наименование	Значение
1. Параметры пневмосети или другого источника сжатого воздуха для работы аппарата: • давление, МПа • объёмный расход, дм ³ /мин, не менее	0,4 – 0,8 100
2. Номинальное время защитного действия при лёгочной вентиляции 30 дм ³ /мин и температуре окружающей среды (25 ± 2) °С, мин, не менее	60
3. Сопротивление выдоху при лёгочной вентиляции 30 дм ³ /мин, Па, не более	800
4. Срок защитного действия фильтра при подаче воздуха из пневмосети в воздухопроводную систему с объёмным расходом 100 дм ³ /мин, ч, не менее	5
5. Масса лицевой части аппарата, кг, не более	2,0
6. Габаритные размеры лицевой части аппарата, мм, не более	120 × 170 × 260
7. Масса катушки в комплекте с фильтрами и воздухопроводом (рукавом) длиной 20 м, кг, не более	15
8. Габаритные размеры катушки в комплекте с фильтрами, мм, не более	320 × 700 × 760
9. Габаритные размеры фильтра, мм, не более	70 × 70 × 170
10. Масса фильтров, кг, не более	2,5
11. Средний полный срок службы, лет, не менее	5

При разработке АДШМ (рис. 1) учитывали, что он должен обеспечивать безопасность работающего, в том числе благодаря избыточному давлению

в подмасочном пространстве во всём диапазоне дыхательных нагрузок. Для достижения этой цели разработали клапан выдоха, имеющий подпружиненный шток.

Величина избыточного давления в подмасочном пространстве зависит от двух факторов: диапазона давления воздуха, при котором клапан легочного автомата находится в открытом состоянии, и давления открытия клапана выдоха. Давление открытия клапана выдоха не должно быть слишком высоким для предотвращения высокого сопротивления выдоху. В то же время давление открытия клапана выдоха должно превышать давление закрытия клапана легочного автомата.

Согласно требованиям ГОСТ Р 53255-2009 «Техника пожарная. Аппараты дыхательные со сжатым воздухом с открытым циклом дыхания. Общие технические требования. Методы испытаний» избыточное давление в подмасочном пространстве лицевой части аппарата при нулевом расходе воздуха должно быть не более 400 Па, фактическое сопротивление дыханию на выдохе в аппарате при легочной вентиляции 30 дм³/мин – не более 350 Па (при легочной вентиляции 60 дм³/мин – не более 450 Па). Требования к давлению открытия клапана легочного автомата данным нормативным документом не установлено.

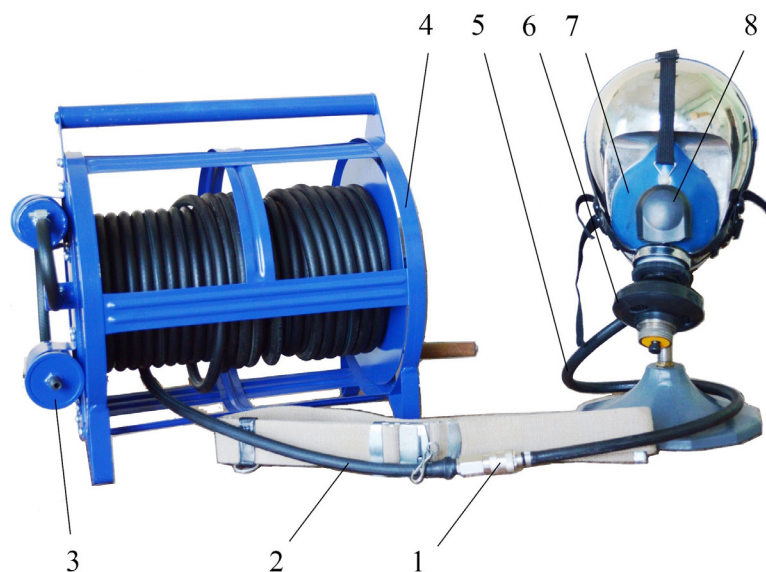


Рис. 1. Малогабаритный шланговый дыхательный аппарат (АДШМ):

1 – быстроразъемное соединение; 2 – воздуховод (рукав); 3 – фильтр;

4 – катушка; 5 – рукав легочного автомата; 6 – легочный автомат;

7 – лицевая часть (полумаска ПР-7); 8 – клапан выдоха

Согласно ГОСТ 12.4.236-2012 (EN 138-1994) «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Дыхательные аппараты со шлангом подачи чистого воздуха, используемые с масками и полумасками. Общие технические требования. Методы испытаний. Маркировка» сопротивление вдоху шланговых дыхательных аппаратов

с ручным или механическим приводом не должно превышать 450 Па, сопротивление выдоху (в сборе с лицевой частью) – 1000 Па.

Поэтому при разработке АДШМ важно было соблюдать точные значения параметров открытия клапанов (выдоха и легочного автомата). При испытаниях АДШМ на динамической установке было задано периодическое изменение значений избыточного давления в подмасочном пространстве, зависящее от величины давления в пневмосети и от редуцированного давления (в случае использования баллона с редуктором в качестве источника сжатого воздуха). Изменение давления в пневмосети, подсоединенной к ресиверу компрессора, зависит от того, работает компрессор или нет. Сразу после окончания работы компрессора давление в пневмосети достигает максимальных величин, а избыточное давление в подмасочном пространстве – наоборот, минимальных. Непосредственно перед автоматическим включением компрессора давление в пневмосети минимально, а избыточное давление в подмасочном пространстве – максимально (его периодическое изменение представлено на рис. 2). Для исследования данной закономерности проведены испытания подключённого к пневмосети АДШМ. Питание пневмосети обеспечивает воздушный баллон с редуктором, настроенным на редуцированное давление, равное 0,4; 0,6 и 0,9 МПа (см. рис. 3).

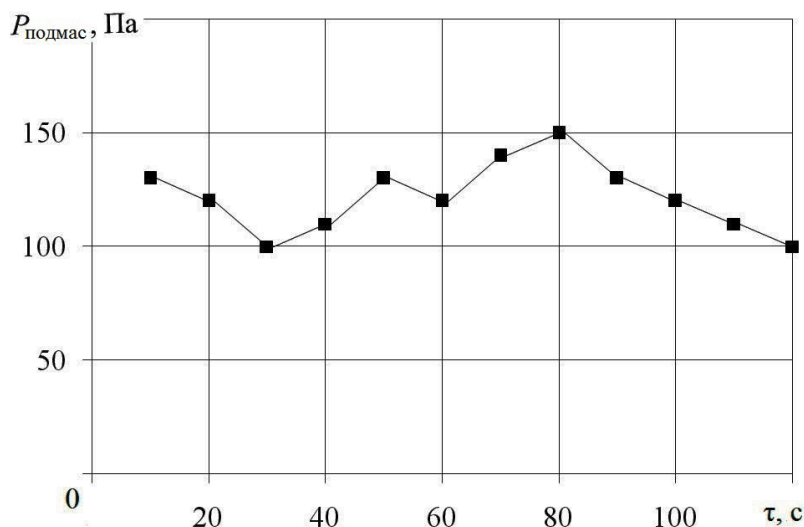


Рис. 2. Динамика давления в подмасочном пространстве $P_{\text{подмас}}$, Па

Установленное влияние давления в пневмосети на величину давления в подмасочном пространстве может быть обусловлено особенностями работы клапана лёгочного автомата: время открытия клапана лёгочного автомата зависит от его инерционности и давления, воздействующего на мембрану лёгочного автомата. При высоком давлении в пневмосети (около 0,9 МПа) клапан лёгочного автомата, пропустив порцию воздуха в подмасочное пространство, закрывается при более низких значениях этого давления, чем в случае низкого давления в пневмосети.

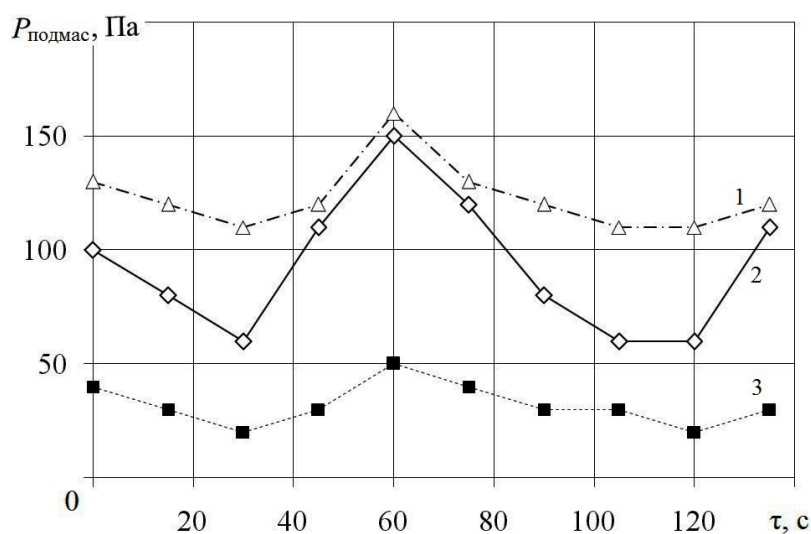


Рис. 3. Динамика величины давления в подмасочном пространстве $P_{\text{подмас}}$ при разных значениях давления в пневмосети:
1 – при давлении 0,9 МПа; 2 – при давлении 0,6 МПа; 3 – при давлении 0,4 МПа

Также отмечена зависимость содержания диоксида углерода в подмасочном пространстве от лёгочной вентиляции (см. рис. 4). Как видно из приведенного графика, при большей лёгочной вентиляции (60 дм³/мин) наблюдается меньшее значение содержания диоксида углерода в подмасочном пространстве (не более 0,36 %), что обусловлено соотношением объёмов лёгочной вентиляции и мёртвого пространства искусственных лёгких динамической установки, то есть части воздухопроводной системы искусственных лёгких, движение воздуха в которой происходит попеременно в противоположных направлениях в зависимости от фазы дыхания. Это обуславливает накопление диоксида углерода в воздухопроводной системе.

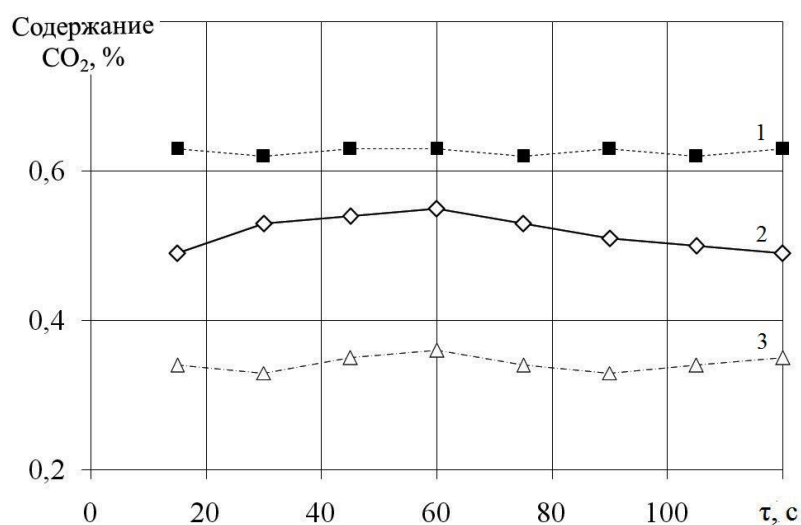


Рис. 4. Зависимость содержания диоксида углерода СО₂ в подмасочном пространстве от лёгочной вентиляции в течение времени τ :
1 – при 15 дм³/мин; 2 – при 30 дм³/мин; 3 – при 60 дм³/мин

Мёртвое пространство искусственных лёгких имеет в своем составе постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая мёртвого пространства не зависит от изменения лёгочной вентиляции и содержит внутренние объёмы воздуховодных магистралей, ограниченные с одной стороны клапанами, с другой – точкой подсоединения к искусственным лёгким. Объём постоянной составляющей мёртвого пространства около 0,105 дм³. Переменная составляющая зависит от изменения лёгочной вентиляции и включает внутренний объём искусственных лёгких. Соотношение объемов мёртвого пространства искусственных лёгких и лёгочной вентиляции дыхательных режимов, на которых испытывали АДШМ, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Соотношение объемов мёртвого пространства искусственных лёгких и лёгочной вентиляции

Параметры дыхательных режимов	Дыхательный режим № 2 согласно ДСТУ 3856-99	Дыхательный режим работы средней тяжести согласно ГОСТ Р 53255-2009	Дыхательный режим тяжёлой работы согласно ГОСТ Р 53255-2009
Постоянная составляющая мёртвого пространства, дм ³	0,105	0,105	0,105
Переменная составляющая мёртвого пространства, дм ³	0,8	1,5	2,4
Суммарное мёртвое пространство, дм ³	0,905	1,605	2,505
Лёгочная вентиляция за 1 мин, дм ³	12	30	60
Отношение суммарного мёртвого пространства к лёгочной вентиляции	0,075	0,053	0,041

Из анализа полученных результатов следует, что отношение суммарного мёртвого пространства к лёгочной вентиляции изменяется в пределах 0,075...0,041 на разных режимах испытаний. Такое различие в 1,80 раза представляет собой основной фактор, обуславливающий разное содержание диоксида углерода при разных дыхательных режимах (0,36 % при лёгочной вентиляции 60 дм³/мин; 0,63 % при лёгочной вентиляции 15 дм³/мин; различие в 1,85 раза).

В ходе приёмочных испытаний АДШМ помимо проверок на испытательном оборудовании прошел тестирование с участием испытателей-добровольцев (рис. 5). Было установлено соответствие его параметров требованиям действующих нормативных документов. Сжатый воздух в дыхательный аппарат подавали из компрессора Abac Pole Position OL-231 и из дыхательных аппаратов BD-96 фирмы MSA AUER. В качестве лицевой части использовали

полумаски ПР-7, входящие в состав АДШМ, и маски 3S фирмы MSA AUER, которыми укомплектованы дыхательные аппараты ВД-96. Испытания показали полную взаимозаменяемость указанных выше компонентов дыхательных аппаратов, наличие избыточного давления в подмасочном пространстве у дыхательных аппаратов в любой комплектации, соответствие сопротивления дыханию нормируемым значениям.



Рис. 5. Приёмочные испытания малогабаритного шлангового дыхательного аппарата с участием испытателей-добровольцев

Выводы. Результаты испытаний малогабаритного шлангового дыхательного аппарата показали, что его применение повышает безопасность ведения работ в загрязненной среде, и позволили установить взаимосвязь содержания диоксида углерода в воздухопроводной системе с таким показателем, как отношение мёртвого пространства к лёгочной вентиляции искусственных лёгких.

Список литературы / References

1. Батырев, В.В. Основы индивидуальной защиты человека от опасных химических и радиоактивных веществ / В.В. Батырев, Г.А. Живулин. – М.: Изд-во ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 204 с.

Batyrev V.V., Zhivulin G.A. *Osnovy individual'noi zashhity cheloveka ot opasnykh khimicheskikh i radioaktivnykh veshhestv* [Principles of the personal protection of a human against hazardous chemical and radioactive substances]. Moscow, FGBU VNI GOChS (FTs) Publ., 2016, 204 p. (In Russian).

2. Оценка эффективности и качества фильтрующих средств индивидуальной защиты органов дыхания населения в чрезвычайных ситуациях / В.В. Батырев, Г.А. Живулин, И.В. Сосунов, И.Л. Садовский / под общ. ред. В.В. Батырева. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 424 с.

Batyrev V.V., Zhivulin G.A., Sosunov I.V., Sadovskii I.L. Batyrev V.V. [ed.]. *Otsenka effektivnosti i kachestva fil'truyushhikh sredstv individual'noi zashhity organov dykhaniya naseleniya v chrezvychainykh situatsiyakh* [Effectiveness and

quality evaluation of personal filtering respiratory protective equipment of population in emergencies]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2017, 424 p. (In Russian).

3. Вишневская, Н.Л. Проблемы обеспечения безопасности при применении средств индивидуальной защиты органов дыхания / Н.Л. Вишневская, Л.В. Плахова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 1(23). – С. 20 – 22.

Vishnevskaya N.L., Plakhova L.V. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri primenenii sredstv individual'noi zashhity organov dykhaniya* [Problems of safety ensuring during application of personal respiratory protective equipment]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta – Science vector of the Togliatti State University*, 2013, no. 1(23), pp. 20-22. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 11.08.2021

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, senior scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;
Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: lzborschik@yandex.ru;
Viktor Ivanovich Frantsev, advanced engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-45

SMALL-SIZE HOSE TYPE BREATHING APPARATUS FOR CONDUCTING WORKS IN CONTAMINATED ENVIRONMENTS

Purpose. Development of the small-size hose type breathing apparatus with a simplified design for protection of workers' respiratory organs during conduction of works in contaminated environments.

Methods. Experimental methods of investigations.

Results. An experimental model of the small-size hose type breathing apparatus has been developed that is complied with the requirements of the current regulatory documents.

Scientific novelty. The influence of the relation between the apparatus dead space and the long ventilation of the iron lung on the carbon dioxide content has been established during the tests of the air breathing apparatus on the dynamic installation.

Practical value. The obtained investigation results have become a foundation for the developed small-size hose type breathing apparatus with the simplified design improving the safe conduct of works in the contaminated environments.

Keywords: *hose type breathing apparatus; air breathing apparatus; lung-governed oxygen admission valve; reel; exhalation valve; breathing resistance; pressure in mask inward space; air-duct.*

УДК 338.14:614.841.245

Игорь Феликсович Дикенштейн, науч. сотр.; e-mail: fire408@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-40*

Олег Петрович Кравец, зам. нач.; e-mail: oleg.kravets@list.ru

*53 пожарно-спасательная часть Государственного пожарно-спасательного отряда г. Макеевка
286185, пгт. Нижняя Крынка, ул. Николаевская, 7. Тел. (+38 071) 318-02-05*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Цель. Оценка эффективности надзорной деятельности в сфере пожарной безопасности.

Методы. Используются методы статистического анализа и определения предотвращенного экономического ущерба.

Результаты. Разработана методика оценки осуществления надзорной деятельности в сфере пожарной безопасности на основании экономической эффективности мероприятий.

Научная новизна. На основе статистических данных и метода регрессионного анализа возможен прогноз относительной эффективности мероприятий и предотвращенного ущерба от их внедрения.

Практическая значимость. Методика может быть использована при расчете экономической эффективности надзорной деятельности для разных категорий пожаров, а также для других противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: *пожарная безопасность; предотвращенный ущерб; экономическая эффективность; надзорная деятельность; противопожарные мероприятия.*

Постановка проблемы. В Донецкой Народной Республике (далее – ДНР) действуют те же объективные законы (существования общества, развития промышленности, возникновения опасностей, их перерождения и трансформации), что и в большинстве государств. Соответственно, возникает необходимость в сравнительной оценке показателей пожарной безопасности в разных государствах для обоснования противопожарных мероприятий в нашей стране. Поэтому в статье проводится оценка влияния работы органов государственного пожарного надзора на количество возникающих пожаров.

Анализ последних исследований и публикаций. Мировая пожарная статистика за последние годы существенно продвинулась вперед [1, 2] благодаря деятельности Международной ассоциации пожарно-спасательных служб (СТИФ).

В последнее время актуально использование метода статистического анализа для исследования показателей пожарной опасности объектов надзора. Существующая нормативная база в сфере осуществления надзора за пожарной безопасностью не отвечает современным условиям, так как были внесены изменения в законодательство. Организация работы органов государственного пожарного надзора осуществляется в рамках соответствующего порядка.

Изложение основного материала. Наличие и осуществление современной надзорной деятельности обусловлены объективными обстоятельствами, прежде

всего многообразием и постоянным увеличением угроз безопасности человеку, обществу во всех сферах его жизнедеятельности [1].

Необходимо провести анализ эффективности осуществления надзорной деятельности и на основе полученных результатов предложить пути решения этой проблемы.

В качестве основного критерия оценки эффективности надзорной деятельности принимают отношение величины ущербов от пожаров к затратам на осуществление надзорной деятельности.

В Российской Федерации в соответствии с работой [2] определена формула расчета эффективности деятельности контрольно-надзорных органов.

Показатели результативности контрольно-надзорной деятельности отражают уровень безопасности охраняемых законом ценностей, то есть степень защиты от причинения вреда (ущерба). При этом данные показатели учитывают задействованные трудовые, материальные и финансовые ресурсы, а также административные издержки подконтрольных субъектов, в отношении которых осуществляется контрольно-надзорная деятельность. Для более полной и объективной оценки эффективности контрольно-надзорной деятельности необходимо также учитывать общий объем ущерба, как причиненного, так и предотвращенного, который устанавливают для тех видов контрольно-надзорной деятельности, где возможно предупреждение событий, причиняющих ущерб, или снижение ущерба от таких событий. Своевременное устранение выявленных нарушений, влекущих за собой угрозу причинения вреда охраняемым законом ценностям, может быть оценено с использованием показателей предотвращенного вреда (ущерба).

Распоряжением [3] была определена формула расчета эффективности контрольно-надзорной деятельности

$$\Xi = [(\Delta Y_T + \Delta P_T + \Delta B_T) / (Y_{T-1} + P_{T-1} + B_{T-1})] 100,$$

где ΔY_T – разница между причиненным ущербом в предшествующем периоде ($T - 1$) и причиненным ущербом в текущем периоде (T), млн руб.;

ΔP_T – разница между расходами на исполнение полномочий в предшествующем периоде ($T - 1$) и расходами на исполнение полномочий в текущем периоде (T), млн руб.;

ΔB_T – разница между издержками бизнеса в предшествующем периоде ($T - 1$) и издержками бизнеса в текущем периоде (T), млн руб.;

Y_{T-1} – причиненный ущерб в предшествующем периоде ($T - 1$), млн руб.;

P_{T-1} – расходы на исполнение полномочий в предшествующем периоде ($T - 1$), млн руб.;

B_{T-1} – издержки бизнеса в предшествующем периоде ($T - 1$), млн руб.

В данной формуле предотвращенный ущерб как показатель, влияющий на эффективность контрольно-надзорной деятельности, не используется.

Оценим эффективность противопожарных мероприятий по контрольно-надзорной деятельности с использованием показателя «предотвращение ущерба». Статистические показатели пожаров в ДНР приведены в таблице.

Статистика пожаров в ДНР

№ п/п	Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Средний показатель
1	Количество пожаров	4898	5513	8553	6920	6357	13334	7596
2	Ущерб, млн руб.	184,7	115,4	162,6	188,1	122,8	199,4	164,5

На основании статистических данных, методом регрессионного анализа с использованием программы CurveExpert строим модели для определения тенденций формирования количества пожаров (рис. 1) и ущербов от них (рис. 2).

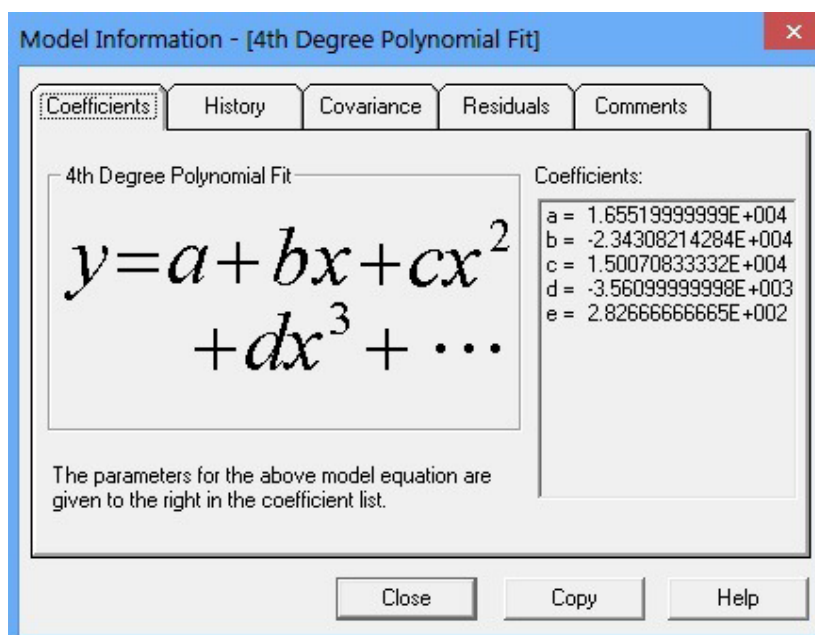
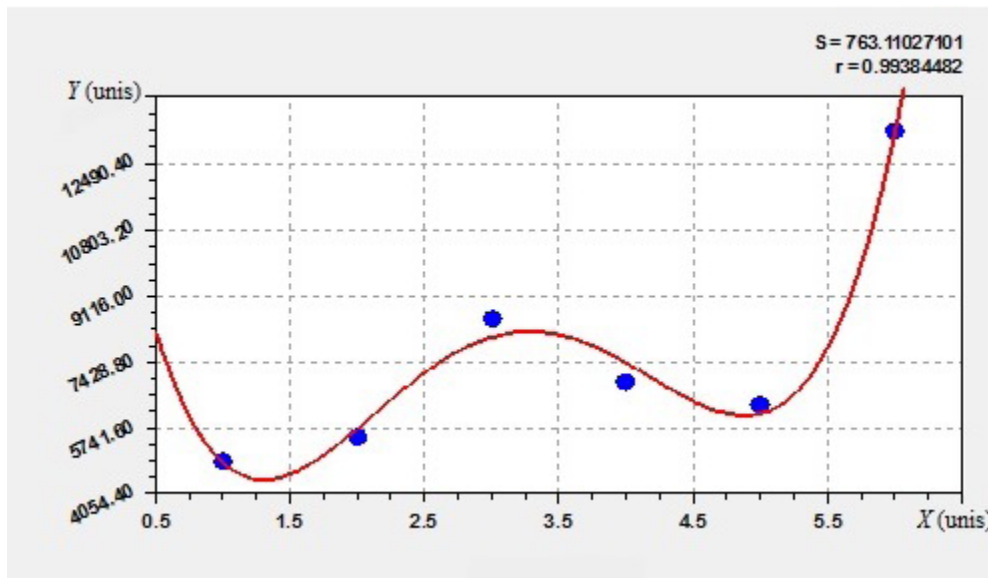


Рис. 1. Регрессионная модель динамики количества пожаров

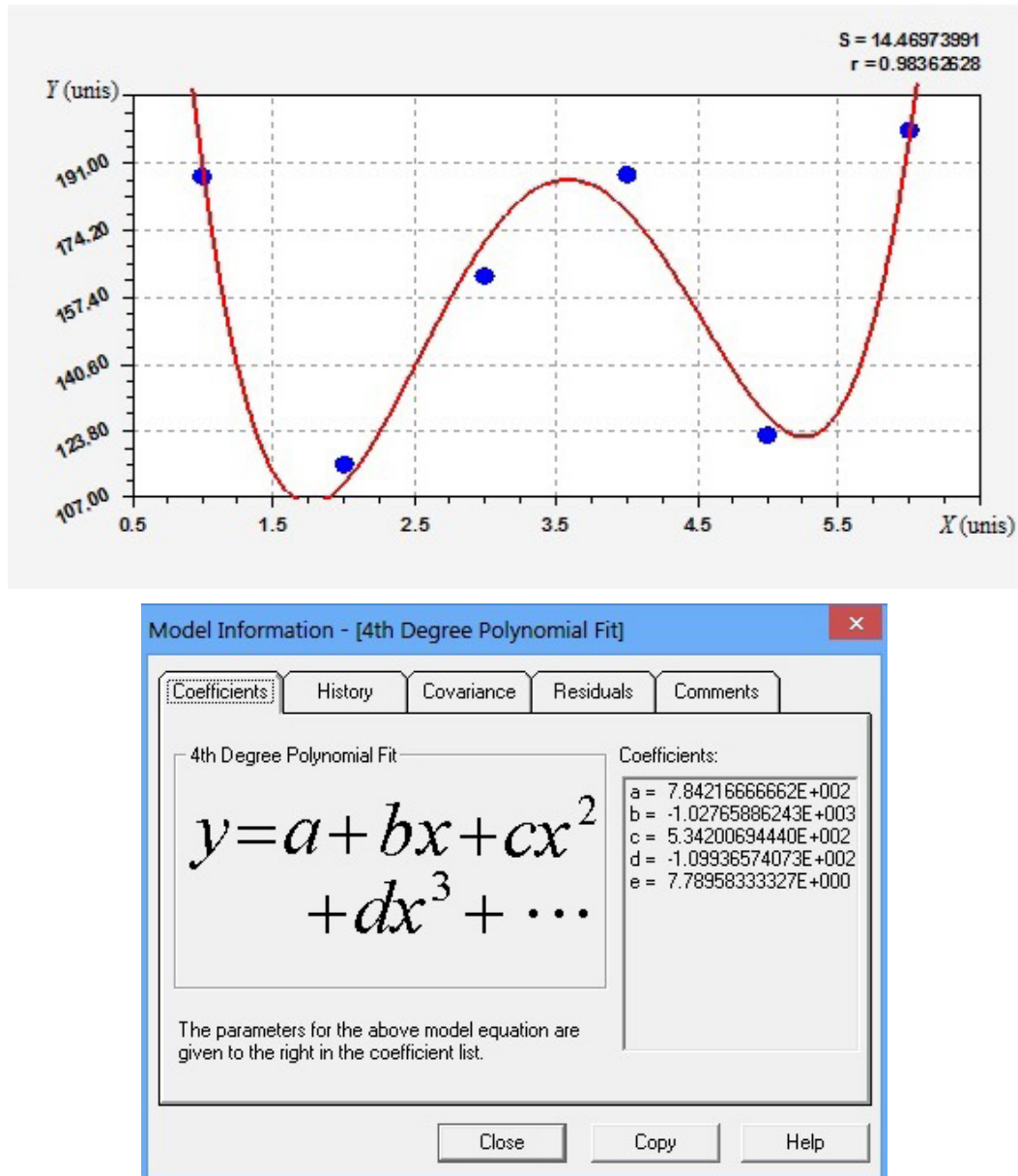


Рис. 2. Регрессионная модель динамики ущерба

Объём выборки мал, поэтому сходимость результатов сравнительно невелика.

Спрогнозируем вероятностные показатели на 2021 г.:

- количество пожаров $N_{\text{вер}} = 15148$;
- ущерб от пожаров $Y_{\text{вер}} = 207,5$ млн руб.

Предусмотрено проведение плановых, внеплановых и контрольных проверок. В 2020 г. в целях предупреждения возникновения и сокращения количества пожаров специалистами государственного пожарного надзора проведено более семи тысяч плановых и трехсот внеплановых проверок.

В подразделениях государственного пожарного надзора на учёте состоит 49980 объектов. Анализ проведенных мероприятий показал, например, что наружное противопожарное водоснабжение недостаточно обеспечивает населенные пункты необходимым количеством воды для цели пожаротушения.

Администрации населенных пунктов принимают недостаточные меры по обеспечению необходимым количеством воды для целей пожаротушения, приведению в работоспособное состояние источников наружного противопожарного водоснабжения (в том числе пожарных гидрантов и водонапорных башен), устройству подъездных путей и пирсов к природным (искусственным) водоемам, обеспечению указателями мест их расположения.

Контроль переоборудования водонапорных башен для отбора воды пожарными автомобилями не осуществляется, учёт башен, оборудованных этими устройствами, не ведётся.

Большое количество пожаров (70 % от общего числа пожаров, обусловленных электротехническими причинами) происходит из-за неисправных внутренних сетей и электропроводок, нагревательных и других электроприборов. Основные причины пожаров в электроустановках (57 %) – короткие замыкания, развивающиеся токи утечек через изоляцию. Наиболее пожароопасный вид электрооборудования – электропроводки, на долю которых приходится 54 % всех пожаров, обусловленных электротехническими причинами.

Низкий уровень пожаробезопасности можно объяснить следующими факторами:

- неудовлетворительным техническим состоянием находящихся в эксплуатации электрических сетей низкого напряжения;
- недостаточной степенью защиты электроприборов и несоответствием их стандартам безопасности;
- отсутствием эффективного контроля безопасной эксплуатации электроустановок;
- несоблюдением правил пожарной безопасности при эксплуатации электроприборов и весьма низкой эффективностью электрической защиты от аварийных режимов.

И хотя время, когда на электрических щитках потребителей можно было увидеть традиционные керамические пробки, зачастую заменяемые так называемыми жучками, давно миновало, сейчас применяют автоматические выключатели новой конструкции (так называемые автоматы защиты), электрические сети от пожаров и аварийных пожароопасных режимов по-прежнему фактически не защищены.

Так, проверка пожаробезопасности кабельной продукции и электропроводок на предприятиях ДНР показала, что в 90 % случаев автоматы защиты выбраны неверно и не отвечают требованиям ПУЭ и других нормативных документов.

Таким образом, расчет экономического эффекта предлагается выполнить следующим образом.

Предотвращенный ущерб – показатель стоимостный и составит [4]

$$Y_{\text{пред}} = Y_{\text{вер}} - Y_{\text{ф}}$$

Рассчитывают затраты на рекомендуемые мероприятия. Затраты на содержание группы надзорной деятельности – С.

Величина экономического эффекта от внедрения мероприятий (проведение надзорной деятельности) и их относительная эффективность составят

$$E_{\text{эф}} = \frac{Y_{\text{пр}}}{C};$$

$$\text{Э} = Y_{\text{пр}} - C.$$

В мировой практике показатель эффективности осуществления контрольно-надзорной деятельности составляет $E_{\text{эф}} = 0,875$.

Выводы. В ходе выполнения работы было освоено использование программного обеспечения «Curve Expert» для метода регрессионного анализа, спрогнозированы количество и вероятный ущерб от пожаров на 2021 г.

Разработана научно обоснованная методика расчета экономической эффективности, однако выполнить расчеты не представляется возможным в связи с отсутствием на момент составления и публикации статьи необходимой статистической информации за 2021 г.

Список литературы / References

1. Горшкова, Е.Е. Особенности профессиональной подготовки сотрудников государственной противопожарной службы МЧС России в связи с введением единого надзора // Общество. Коммуникация. Образование. – 2011. – № 131. – С. 116 – 120.

Gorshkova E.E. *Osobennosti professional'noi podgotovki sotrudnikov gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii v svyazi s vvedeniem edinogo nadzora* [Specifics of professional training of the state fire prevention service of the EMERCOM of Russia due to the implementation of single supervision]. *Obshhestvo. Kommunikatsiya. Obrazovanie – Society. Communication. Education*, 2011, no. 131, pp. 116-120. (In Russian).

2. Научно-методические подходы к определению предотвращенного ущерба / М. В. Загуменнова, А. Г. Фирсов, В. И. Сибирко [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: мат-лы XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 июня 2019 г. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2019. – С. 436 – 439.

Zagumennova M.V., Firsov A.G., Sibirko V.I. [et al]. *Nauchno-metodicheskie podkhody k opredeleniyu predotvrashhyonnogo ushherba* [Scientific and methodological approaches to the definition of avoided loss]. *Aktual'nye problemy pozharnoi bezopasnosti: mat-ly XXXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 05-07 iyunya 2019 g.* [Topical problems of fire safety: materials of the 31st International scientific and practical conference, Moscow, June 05-07, 2019]. Moscow, VNIIPo MChS Rossii Publ., 2019, pp. 436-439. (In Russian).

3. О внесении изменений в основные направления разработки и внедрения системы оценки результативности контрольно-надзорной деятельности, утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 мая 2016 г. № 934-р: распоряжение Правительства Российской Федерации от 23 мая

2017 г. № 999-р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

O vnesenii izmenenii v osnovnyye napravleniya razrabotki i vnedreniya sistemy otsenki rezul'tativnosti kontrol'no-nadzornoj deyatel'nosti, utverzhdyonnye rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 17 maya 2016 g. no. 934-r: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 23 maya 2017 g. no. 999-r. [On making amends in principal direction of development and implementation of system of supervising effectiveness evaluation as approved by the directive of the Russian Government of May 17, 2016 no. 934-p: the Russian Government directive of May 23, 2017, no. 999-p]. Accessed via Konsul'tantPlyus computer-based legal research system. (In Russian).

4. Моисеева, Е.Е. Экономическая эффективность противопожарных мероприятий / Е.Е. Моисеева, Д.В. Южаков // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам международной научно-технической конференции / под ред. Е.А. Памфилова. – Брянск: БГИТА, 2009. – Вып. 23. – С. 211 – 214.

Moiseeva E.E., Yuzhakov D.V. *Ekonomicheskaya effektivnost' protivopozharnykh meropriyatii* [Economic effectiveness of fire prevention measures]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr. po itogam mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii / pod red. E.A. Pamfilova* [Topical problems of forest management: collection of scientific papers following the results of the international scientific and technical conference, E.A. Pamfilov (ed.)]. Bryansk, BGITA Press, 2009, issue 23, pp. 211-214. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 23.11.2021

Igor Feliksovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: fire408@mail.ru

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-40

Oleg Petrovich Kravets, deputy head; e-mail: oleg.kravets@list.ru

The 53rd Firefighting and Rescue Department of the Makeyevka State Firefighting and Rescue Unit

286185, Nizhnyaya Krynka town settlement, 7, ulitsa Nikolaevskaya. Phone: (+38 071) 318-02-05

EFFECTIVENESS ANALYSIS OF EXECUTING THE SUPERVISING ACTIVITY IN THE FIELD OF FIRE SAFETY

Purpose. Estimation of the supervising activity effectiveness in the field of fire safety.

Methods. The methods of statistical analysis and avoided economic loss determination have been employed.

Results. The methodology has been developed for estimation of the supervising activity execution within the field of fire safety on the basis of the economic efficiency of measures.

Scientific novelty. Based on the statistical data and the regression analysis method the prediction of relative efficiency of the measures and the avoided loss of their implementation is possible.

Practical value. The methodology may be applied for calculation of the supervising activity economic effectiveness for different fire classes as well as for the other fire prevention measures.

Keywords: fire safety; avoided loss; economic effectiveness; supervising activity; fire prevention measures.

УДК [622.867-051:616-072.7]-519

Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;
Александр Анатольевич Булатников, инж. II кат.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-44, 332-78-49

**ТРЕБОВАНИЯ К ИНДИВИДУАЛЬНЫМ УСТРОЙСТВАМ КОНТРОЛЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОСПАСАТЕЛЯ**

Цель. Обоснование требований к индивидуальным устройствам контроля, обработки и передачи информации о функциональном состоянии организма горноспасателя при подземных работах.

Методы. Аналитико-информационные исследования нормативных документов, регламентирующих требования к физическим, химическим, техническим, санитарно-гигиеническим, эргономическим и иным характеристикам устройств индивидуального применения в условиях угольных шахт, опасных по газу и пыли.

Результаты. Обоснованы количественные и качественные значения характеристик индивидуальных электронных устройств контроля функционального состояния организма горноспасателя. Разработан перечень требований, обеспечивающих безопасную, эффективную и удобную эксплуатацию этих устройств.

Научная новизна. Впервые разработаны требования к индивидуальным электронным устройствам контроля функционального состояния организма горноспасателя в подземных выработках угольных шахт.

Практическая значимость. Использование разработанных требований к устройствам контроля, обработки и передачи информации о функциональном состоянии организма обеспечит безопасность горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях угольных шахт.

Ключевые слова: *требования безопасности; устройство контроля; физиологические показатели; экстремальные микроклиматические условия; подземные горные выработки; пылевлагозащита; контроль показателей.*

Постановка проблемы. Ведение аварийно-спасательных работ с использованием изолирующих дыхательных аппаратов в подземных выработках угольных шахт – очень сложный и опасный процесс, связанный с чрезвычайно высоким уровнем риска причинения ущерба здоровью горноспасателя и требующий значительных физических усилий, психоэмоционального напряжения и соответствующего физического и физиологического состояния организма.

Обеспечение безопасности и сохранение жизни и здоровья горноспасателя предполагают постоянный и объективный контроль функционального состояния его организма. Несвоевременное реагирование на критическое или субкритическое состояние основных показателей, таких как артериальное давление, частота пульса и его вариабельность, температура тела, насыщение крови кислородом или на их негативную динамику даже у одного горноспасателя, вызванное отсутствием объективного контроля, может привести к тяжелым последствиям для всего отделения [1, 2].

Для повышения безопасности горноспасателей, особенно при ведении аварийно-спасательных работ в изолирующих аппаратах в условиях

экстремального микроклимата, необходимо осуществлять непрерывный объективный контроль их функционального состояния с помощью современных цифровых устройств – индивидуального устройства контроля физиологических показателей и устройства приема-передачи информации.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время в мировой научной литературе появилось значительное количество публикаций, посвященных осуществлению дистанционного мониторинга показателей функционирования организма человека [3 – 11]. В большинстве статей описаны устройства контроля физиологических показателей, предназначенные для дистанционного мониторинга функционального состояния спортсменов в период интенсивных тренировок либо лиц, работающих в экстремальных условиях открытого пространства [3, 4, 6, 7, 8, 10, 11].

Применяемые в ходе мониторинга спортсменов устройства контроля физиологических показателей и устройства приема-передачи информации предназначены для использования в нормальных микроклиматических условиях, при прямой видимости между спортсменом и тренером или в условиях с возможностью использования GPS для позиционирования абонентов без ограничения массы и габаритных размеров устройств приема-передачи информации. Аппаратура контроля частоты пульса, разработанная в НИИГД «Респиратор» [5, 9], основана на устаревшей элементной базе, имеет ненадежное крепление электродов на теле горноспасателя и массу более 0,5 кг.

Цель работы – обосновать требования к современным цифровым малогабаритным устройствам измерения, приема-передачи основных показателей функционирования организма горноспасателей, работающих в экстремальных микроклиматических условиях угольных шахт.

Метод решения поставленной задачи и достигнутые результаты. Для решения основной задачи необходимо обосновать требования, в которых должны быть учтены: измерения основных показателей с достаточной степенью точности; надежность выполняемых измерений; бесперебойная работа в экстремальных микроклиматических условиях, которые характеризуются пониженным содержанием кислорода, наличием агрессивных и взрывоопасных газов в окружающей атмосфере, повышенной запыленностью и влажностью, повышенной внешней температурой; продолжительность автономной работы; положительные эргономические показатели и минимально возможные массогабаритные характеристики.

При разработке требований было принято во внимание, что каждый горноспасатель при приеме на службу и ежегодно проходит полноценный медицинский осмотр, позволяющий определить физическую работоспособность и тепловую устойчивость, а при заступлении на дежурство – предсменный медицинский осмотр с измерением артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) [2]. Этих показателей достаточно для определения общего физиологического состояния, на их основе определены требования к устройствам контроля физиологических показателей горноспасателя:

- измерение ЧСС и АД (обязательно);
- определение процента оксигенации крови (обязательно);
- измерение температуры тела (желательно);
- снятие электрокардиограммы (ЭКГ) для определения вариабельности ЧСС (желательно);
- визуальное отображение информации;
- установка пороговых значений по каждому из измеряемых показателей;
- световое и звуковое оповещение при достижении пороговых значений по каждому из измеряемых показателей;
- память результатов измерений с временными метками по каждому из измеряемых показателей;
- передача информации (результатов измерений) по каждому из измеряемых показателей на устройство приема-передачи информации по беспроводным каналам связи (Wi-Fi, Bluetooth).

Технические характеристики устройств контроля физиологических показателей должны соответствовать следующим требованиям безопасности:

- пылевлагозащита не ниже стандартов IP68 или IP67 (Ingress Protection – стандарт уровня защиты гаджета от попадания влаги и пыли);
- взрывозащищенное искробезопасное исполнение POi;
- ударопрочное исполнение.

Массогабаритные и эргономические характеристики устройства контроля физиологических показателей горноспасателя должны удовлетворять таким требованиям:

- не превышать среднестатистической ширины запястья мужчины, то есть не более 45 x 45 мм;
- масса не более 100 г;
- надежно крепиться на теле горноспасателя;
- быть удобным в использовании, без дискомфорта.

Требования к устройствам приема-передачи информации разработаны по аналогии с требованиями к устройствам контроля физиологических показателей. Кроме того, должна существовать возможность коммутации с несколькими (до десяти) устройствами контроля физиологических показателей по беспроводным каналам связи (Wi-Fi, Bluetooth).

Аналитико-информационное исследование не выявило устройств с характеристиками, полностью соответствующими вышеуказанным требованиям. Для проведения экспериментальных исследований возможности контроля физиологических показателей были использованы смарт-часы GSMIN WP60. Характеристики этих смарт-часов соответствовали большинству разработанных требований и обладали следующими функциями: измерение ЧСС и ее вариабельности при помощи снятия ЭКГ; измерение АД; пылевлагозащита IP67; ударопрочное исполнение; визуальное отображение информации; функция памяти результатов измерений с временными метками по каждому из измеряемых показателей; возможность передачи информации (результатов

измерений) по каждому из измеряемых показателей на устройство приема-передачи информации по беспроводным каналам связи (Wi-Fi, Bluetooth). Габариты смарт-часов – 40 x 40 мм; масса – 35 г. Закрепляются на руке с помощью силиконового гипоаллергенного ремешка с надежной застежкой. Устройство может работать автономно (без подзарядки) и непрерывно более 30 часов.

В ходе исследования выполнено 362 цикла измерений ЧСС и АД (далее – основные показатели) у испытуемого 1 и 126 циклов аналогичных измерений у испытуемого 2, как в состоянии покоя, так и после дозированной физической нагрузки (далее – ДФН). Измерения выполняли с помощью смарт-браслета и одновременно проводили контрольные измерения с помощью медицинских приборов, прошедших государственную проверку. Исследования проводили как на поверхности, так и в подземных условиях. Всего было проведено 588 циклов различных измерений, в том числе 488 измерений основных показателей, в результате которых получено около 3000 значений. Полученные данные были сгруппированы в 39 цифровых массивов, представляющих собой выборочные дисперсии по показателям и видам нагрузки. Результаты экспериментальных исследований были проанализированы с применением методов математической статистики.

Достоверность q_{cp} результатов измерения ЧСС с помощью смарт-браслета по сравнению с измерением по медицинским приборам для фактических отклонений рассчитывали по формуле

$$q_{cp} = (\Delta_{cp}/C_{m.cp}) \cdot 100, \quad (1)$$

где q_{cp} – достоверность результатов измерения ЧСС с помощью смарт-браслета в сравнении с измерением с помощью медицинских приборов, %;

Δ_{cp} – среднее арифметическое отклонение измерения ЧСС с помощью смарт-браслета в сравнении с измерением по медицинским приборам, уд/мин;

$C_{m.cp}$ – среднее значение ЧСС, измеренное с помощью медицинских приборов, уд/мин.

Среднее арифметическое отклонение результатов измерения ЧСС с помощью смарт-браслета по сравнению с медицинскими приборами определяли по формуле

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{si} - x_{mi}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad (2)$$

где x_{si} – значение ЧСС i -го измерения по смарт-браслету, уд/мин;

x_{mi} – значение ЧСС i -го измерения по медицинским приборам, уд/мин;

n – число результатов измерения;

Δ_i – значение i -го отклонения ЧСС, уд/мин.

Среднее значение ЧСС, измеренных с помощью медицинских приборов, $C_{m.cр}$ определяли по формуле

$$C_{m.cр} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{mi}. \quad (3)$$

Определение достоверности измерения систолического (далее – САД) и диастолического артериального давления (далее – ДАД) выполняли по формулам (1) – (3), в которые вместо значений ЧСС подставляли значения АД, измеренные с помощью смарт-браслета и медицинских приборов (см. таблицу).

Результаты математического анализа свидетельствуют о различной достоверности результатов измерения основных показателей, а именно:

- результаты измерения ЧСС без нагрузки и систолического АД в установленных пределах совпадают с результатами измерения медицинскими приборами (см. рис. 1 и 3 соответственно);

- результаты измерения ЧСС после дозированной физической нагрузки, выполненные с помощью смарт-браслета, превышают результаты измерений ЧСС, выполненных с помощью медицинских приборов, примерно на 25 % (см. рис. 2). Результаты измерения ДАД по смарт-браслету превышают аналогичные результаты измерения по медицинским приборам примерно на 29 % (см. рис. 4) и значительно превышают допустимые пределы точности измерения АД (см. рис. 5).

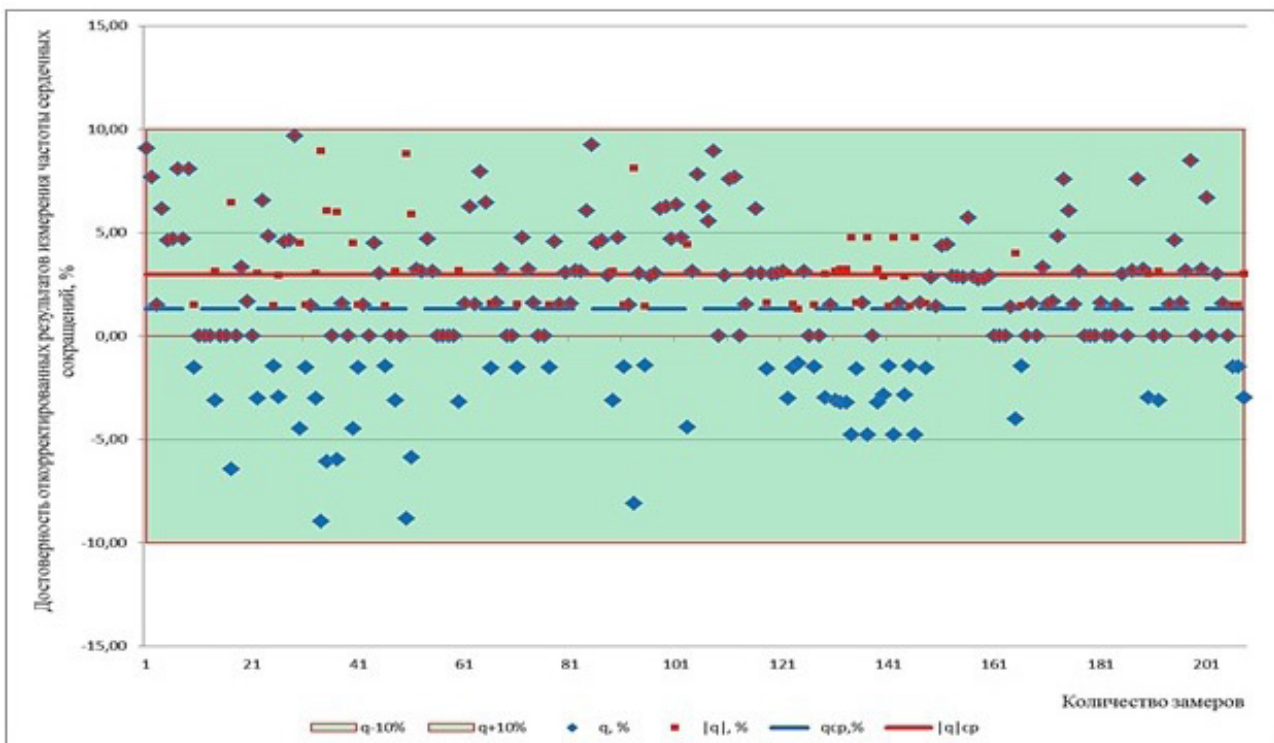


Рис. 1. Достоверность результатов измерения частоты сердечных сокращений без нагрузки после исключения случайных ошибок

Результаты анализа измерения основных функциональных показателей организма испытуемого 1 с помощью смарт-браслета

Показатель	Кол-во измерений	Показатели						Требования*		Результат
		$\Delta_{\text{ср}}$	$ \Delta _{\text{ср}}$	$q_{\text{ср}}$, %	$ q _{\text{ср}}$, %	S	S _a	Δ	q, %	
ЧСС, уд/мин, в том числе:	362	9,90	10,54	14,14	15,10	13,24	12,74		5,0	Недопустим
1.1. ЧСС, скорректированная, уд/мин	–	–	–	–	–	–	–		5,0	
1.2. ЧСС в состоянии покоя, уд/мин	221	1,60	2,64	2,5	4,07	4,69	4,19		5,0	Достоверен
1.2.1. ЧСС в состоянии покоя, скорректированная, уд/мин	208	0,85	1,95	1,33	2,99	2,36	1,58		5,0	Достоверен
1.3. ЧСС ДФН, уд/мин	141	22,91	22,91	32,39	32,39	11,77	11,77	± 3	5,0	Недопустим
1.3.1. ЧСС ДФН, скорректированная, уд/мин	–	–	–	–	–	–	–	± 3	5,0	
2. САД, мм рт. ст., в том числе:	362	1,37	6,84	1,24	4,97	9,24	6,36	± 3	5,0	Достоверен
2.1. САД, скорректированное, мм рт. ст.	305	0,76	4,73	0,69	3,40	6,09	3,91	± 3	5,0	Достоверен
2.2. САД в состоянии покоя, мм рт. ст.	221	1,03	6,17	1,02	4,60	8,62	6,11	± 3	5,0	Достоверен
2.2.1. САД БН, скорректированное, мм рт. ст.	190	0,95	4,22	0,83	3,18	5,58	3,76	± 3	5,0	Достоверен
2.3. САД ДФН, мм рт. ст.	141	1,90	7,89	1,58	5,41	10,11	6,60	± 3	5,0	Удовлетворителен
2.3.1. САД ДФН, скорректированное, мм рт. ст.	115	0,44	5,57	0,45	3,75	6,87	4,01	± 3	5,0	Достоверен
3. ДАД, мм рт. ст., в том числе:	326	8,25	10,98	11,37	14,37	11,77	9,28	± 3	5,0	Недопустим
3.1. ДАД, скорректированное, мм рт. ст.	–	–	–	–	–	–	–	± 3	5,0	
3.1.1. ДАД в состоянии покоя, мм рт. ст.	221	2,68	6,81	3,83	8,38	8,33	5,50	± 3	5,0	Удовлетворителен
3.2. ДАД в состоянии покоя, скорректированное, мм рт. ст.	155	0,46	3,72	0,68	4,43	4,35	2,27	± 3	5,0	Достоверен
3.3. ДАД ДФН, мм рт. ст.	141	16,98	17,50	23,21	23,77	11,04	10,19	± 3	5,0	Недопустим
3.4. ДАД ДФН, скорректированное, мм рт. ст.	–	–	–	–	–	–	–	± 3	5,0	

* Согласно ГОСТ 31515.1-2012 (EN 1060-1:1996)

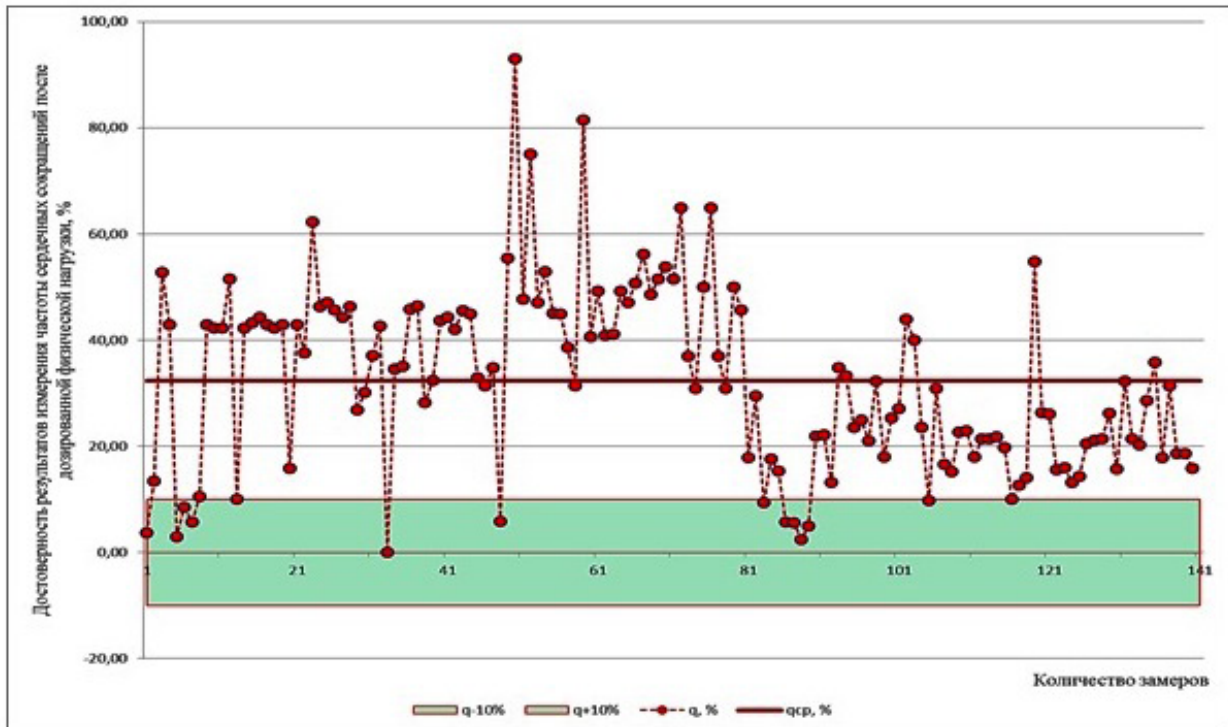


Рис. 2. Достоверность результатов измерения частоты сердечных сокращений после дозированной физической нагрузки

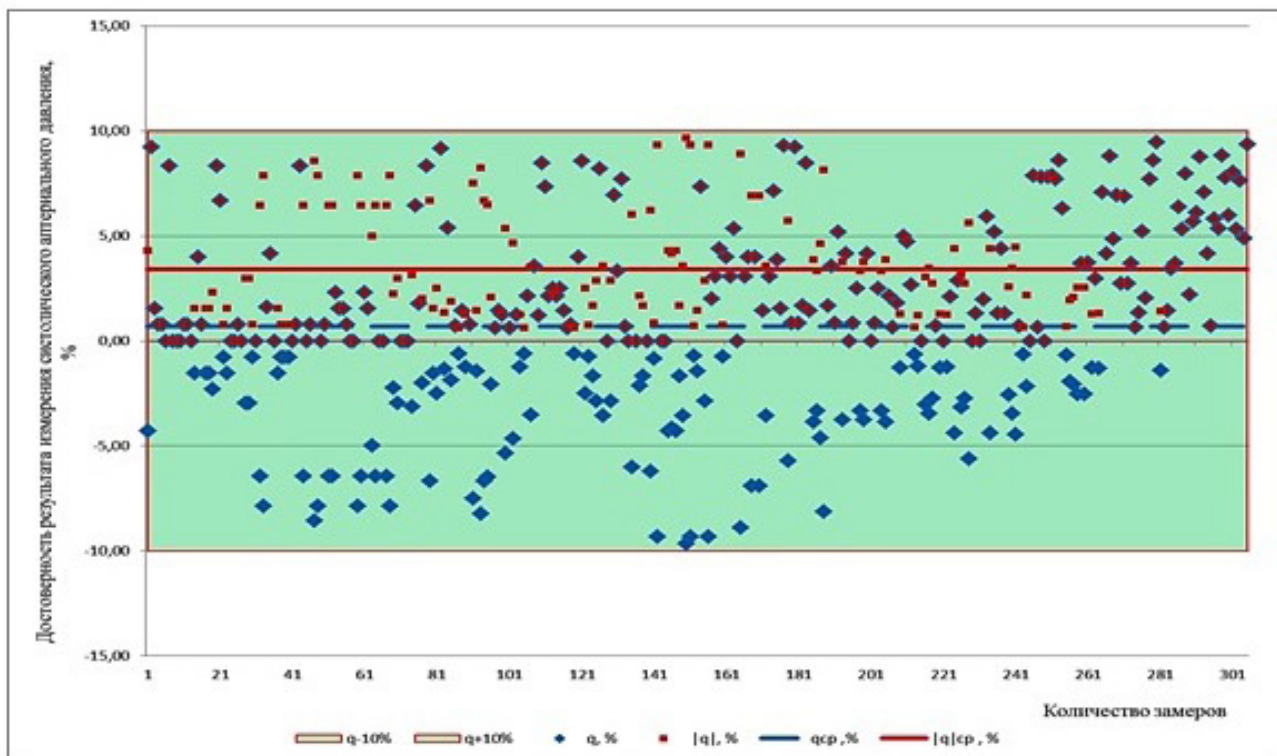


Рис. 3. Достоверность результатов измерения систолического артериального давления по смарт-браслету после исключения случайных ошибок

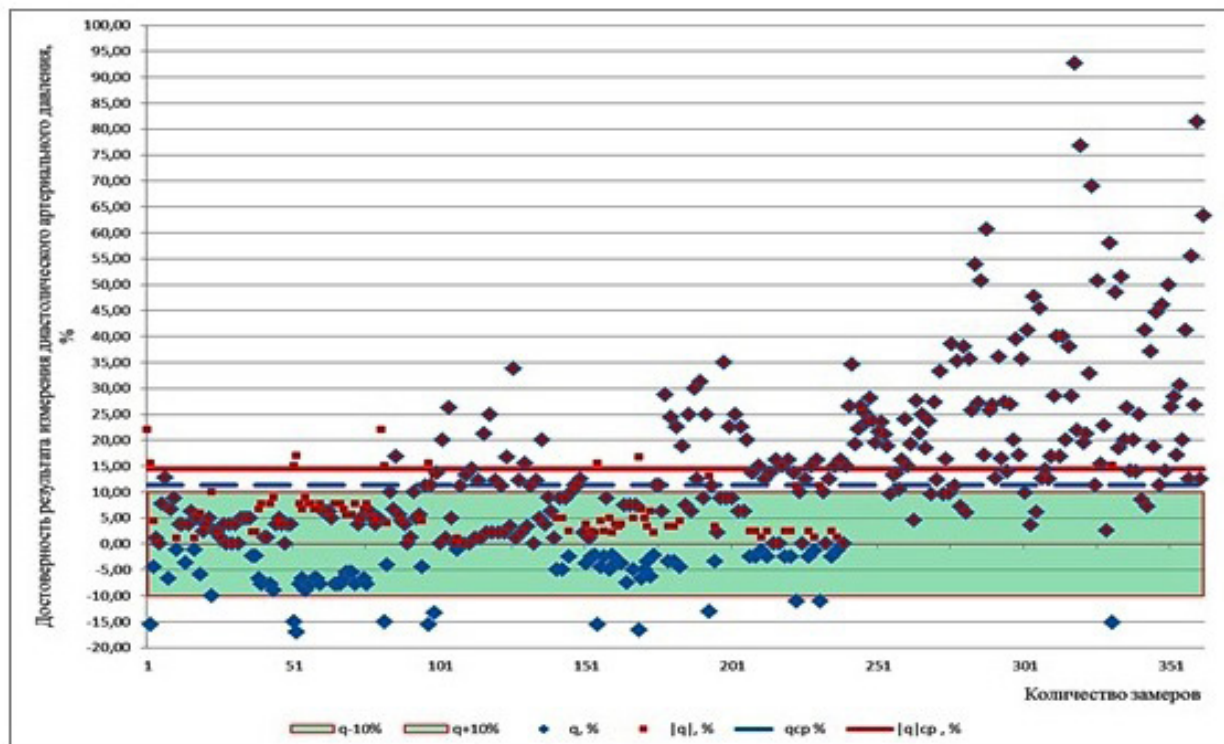


Рис. 4. Достоверность результатов измерения диастолического артериального давления

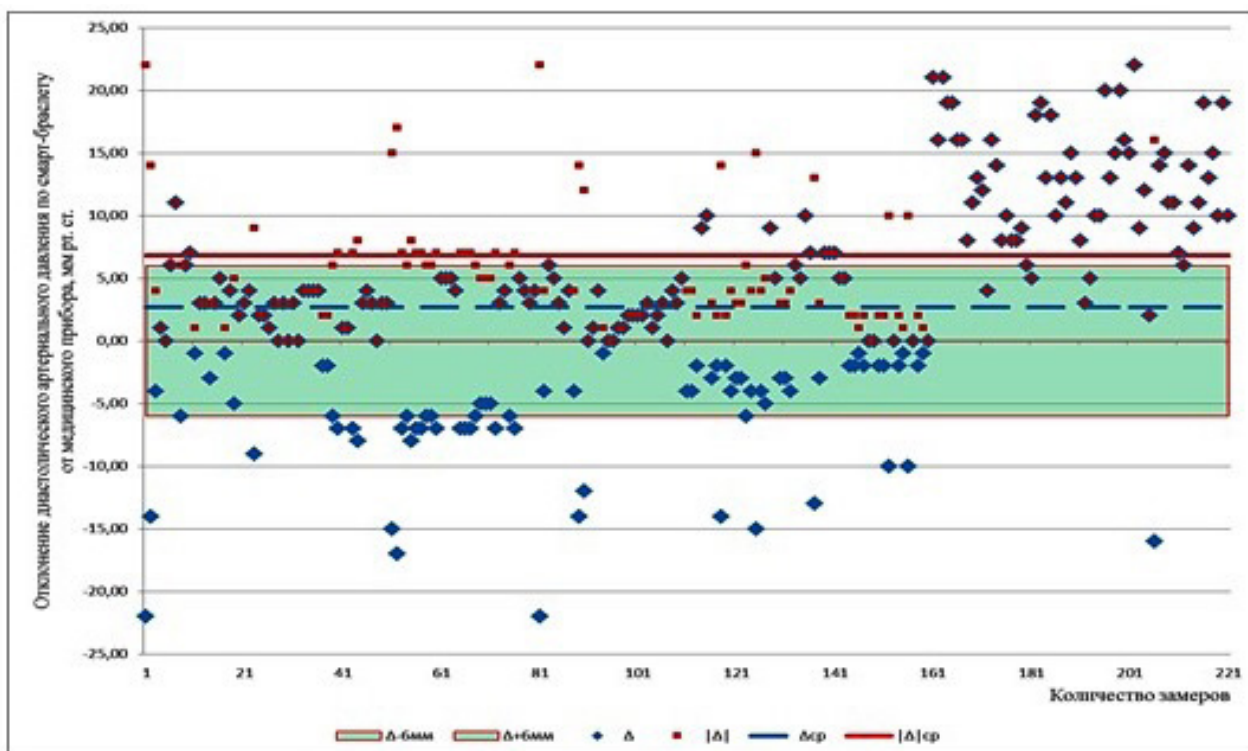


Рис. 5. Отклонение диастолического артериального давления без нагрузки по смарт-браслету от медицинского прибора

Значительные отклонения результатов и низкая надежность измерений по отдельным показателям недопустимы и свидетельствуют о невозможности использования устройства, имеющегося в распоряжении авторов статьи, для объективного контроля функционального состояния горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях.

В то же время для обеспечения безопасности личного состава ГВГСС при ведении аварийно-спасательных работ существует исключительная необходимость оснащения горноспасателей надежными современными устройствами постоянного объективного контроля функционального состояния, которые соответствуют требованиям, разработанным и апробированным в ходе исследований.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили обоснованность разработанных требований, предъявляемых к устройствам контроля физиологических показателей, несмотря на недостаточную достоверность измерений по отдельным показателям.

Выводы.

На основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработаны требования к индивидуальному устройству контроля физиологических показателей горноспасателя в условиях экстремального микроклимата.

Указанным характеристикам и требуемым функциям в той или иной мере наиболее полно соответствуют некоторые модели смарт-часов и смарт-браслетов, но достоверность измерения ЧСС и АД – большая проблема для большинства из них.

Список литературы / References

1. Устав по организации и ведению горноспасательных работ Государственной военизированной горноспасательной службой Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 331 с.

Ustav po organizatsii i vedeniyu gornospasatel'nykh rabot Gosudarstvennoi voenizirovannoi gornospasatel'noi sluzhboi Ministerstva po delam grazhdanskoi oborony, chrezvychainym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhinykh bedstviy Donetskoi Narodnoi Respubliki [Regulation on organization and conduction of mine-rescue operations by the State para-military mine-rescue service of the Ministry for civil defence, emergency situations and elimination of consequences of natural disasters of the Donetsk People's Republic]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016, 331 p.

2. Положение о профессиональном отборе и специальных тренировках респираторщиков и командиров государственной военизированной горноспасательной службы / сост. В.Н. Заболотный [и др.]; Государственная

военизированной горноспасательная служба Минуглепрома Украины. – К.: [б. и.], 1996. – 116 с.

Zabolotnyi V.N. [et al]. *Polozhenie o professional'nom otbore i spetsial'nykh trenirovkakh respiratorshhikov i komandirov Gosudarstvennoi voenizirivannoi gornospasatel'noi sluzhby* [Regulations on professional selection and special trainings of rescue men and commanders of the State para-military mine-rescue service]. *Gosudarstvennaya voenizirovannaya gornospasatel'naya sluzhba Minugleproma Ukrainy* [The State Para-military Mine-rescue Service of Ukraine's Coal Ministry]. Kiev, 1996, 116 p. (In Russian).

3. Галица, В.И. Инструментальные средства и методы для диагностики уровня функциональной реакции спортсмена на нормированную физическую нагрузку / В.И. Галица, П.А. Качанов, А.И. Любиев // Scientific Journal "ScienceRise". – 2015. – Т. 6, № 2(11). – С. 117 – 121.

Galitsa V.I., Kachanov P.A., Lyubiev A.I. *Instrumental'nye sredstva i metody dlya diagnostiki urovnya funktsional'noi reaktsii sportsmena na normirovannuyu fizicheskuyu nagruzku* [Instrumental means and methods for diagnostics of the sportsman's functional response level to the normalized physical load]. Scientific Journal "ScienceRise", 2015, vol. 6, no. 2(11), pp. 117-121. (In Russian).

4. Автоматизированная система контроля функционального состояния спасателя / В.А. Андронов, В.И. Галица, А.А. Деревянко, А.Н. Литвяк // Проблемы надзвичайних ситуацій: збірка наукових праць. – Харьков: НУГЗУ, 2017. – Вып. 26. – С. 11 – 16.

Andronov V.A., Galitsa V.I., Derevyanko A.A., Litvyak A.N. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya funktsional'nogo sostoyaniya spasatelya* [The rescuer's functional state automated control system]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii: zb. nauk. pr.* [Problems of emergency situations: collection of scientific papers]. Kharkov, NUGZU Press, 2017, issue 26, pp. 11-16. (In Russian).

5. Аппаратура дистанционного контроля функционального состояния организма горноспасателей / С.Н. Смоланов, М.М. Величко, Н.В. Каледин и др. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр.; НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2002. – С. 25 – 32.

Smolanov S.N., Velichko M.M., Kaledin N.V. [et al]. *Apparatura distantsionnogo kontrolya funktsional'nogo sostoyaniya organizma gornospasatelei* [Remote control equipment of the mine-rescuers' organism functional state]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr.; NIIGD "Respirator"* [Mine-rescue work: collection of scientific papers; NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2002, pp. 25-32. (In Russian).

6. Синютин, С.А. Двухкомпонентный датчик для оценки психофизиологического состояния спасателя при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / С.А. Синютин, А.В. Леонова, Е.С. Семенистая // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 9(146). – С. 180 – 185.

Sinyutin S.A., Leonova A.V., Semenistaya E.S. *Dvukhkomponentnyi datchik dlya otsenki psikhofiziologicheskogo sostoyaniya spasatelya pri likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii* [Two-component sensor for evaluation of a rescuer's psychophysiological state during elimination of consequences of emergency

situations]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2013, no. 9(146), pp. 180 – 185. (In Russian).

7. Real time physiological status monitoring (RT-PSM): accomplishments, requirements and research roadmap // Technical Note no. TN16-2. USARIEM. March 2016. – 58 p.

8. Потапов, А.И. Приборы и системы контроля и мониторинга физиологического состояния спасателя при чрезвычайных ситуациях / А.И. Потапов, И.А. Потапов, Б.В. Самойлов // Природные и техногенные риски (Физико-математические и прикладные аспекты): науч.-аналит. журн. – 2012. – № 2. – С. 8 – 13.

Potapov A.I., Potapov I.A., Samoilov B.V. *Pribory i sistemy kontrolya i monitoringa fiziologicheskogo sostoyaniya spasatelya pri chrezvychainykh situatsiyakh* [Devices and systems for controlling the rescuer's physiological state in emergency situations]. *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty): nauch.-analit. zhurn.* [Natural and man-caused risks (physic-mathematical and applied aspects): scientific-analytical journal]. 2012, no. 2, pp. 8-13. (In Russian).

9. Разработать аппаратуру контроля функционального состояния организма горноспасателей во время ликвидации аварии: Отчет о НИР / рук. В.П. Выскубенко. – 1920030044. – № ГР 0101И000735. – Донецк, 2001. – 68 с.

Vyskubenko V.P. *Razrabotat' apparaturu kontrolya funktsional'nogo sostoyaniya organizma gornospasateleï vo vremya likvidatsii аварии: Otchyot o NIR* [To develop an apparatus for controlling a mine-rescuers' functional state during elimination of an accident. The scientific research and experimental design work report]. 1920030044. No. ГР 0101И000735. Donetsk, 2001, 68 p. (In Russian).

10. Бойко, А.П. Разработка портативного комплекса для непрерывного дистанционного контроля физиологического состояния и местоположения человека / А.П. Бойко, Д.В. Гончаров, С.Б. Калинин // Системы мониторинга и диагностики здоровья. – 2009. – № 5. – С. 33 – 37.

Boiko A.P., Goncharov D.V., Kalinin S.B. *Razrabotka portativnogo kompleksa dlya nepreryvnogo distantsionnogo kontrolya fiziologicheskogo sostoyaniya i mestopozheniya cheloveka* [Development of a portable complex for continuous monitoring of physiological state and location of a person]. *Sistemy monitoringa i diagnostiki zdorov'ya – Health monitoring and diagnostics systems*, 2009, no. 5, pp. 33-37. (In Russian).

11. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга температуры тела человека / В.В. Бакуткин, И.В. Бакуткин, Л.А. Мельников и др. // Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. тр. по мат-лам 7-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Саратов, 8–10 апреля 2015 г.). – Саратов: Изд-во Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., 2015. – С. 314 – 316.

Bakutkin V.V., Bakutkin I.V., Mel'nikov L.A. [et al]. *Apparatno-programmnyi kompleks dlya monitoringa temperatury tela cheloveka* [Hardware and software complex for monitoring a human body temperature]. *Ekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov: sb. nauch. tr. po mat-lam 7-y Vserossiiskoi nauchno-*

prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Saratov, 8-10 aprelya 2015 g.) [Environmental problems of industrial cities: collection of scientific papers following the materials of the 7th All-Russian scientific and practical conference with international participation (Saratov, April 8-10, 2015)]. Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni Gagarina Yu.A. Press, 2015, pp. 314-316. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 30.03.2021

Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;
Aleksandr Anatolyevich Bulatnikov, engineer of the 2nd category; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-44, 332-78-49

REQUIREMENTS TO PERSONAL MONITORING DEVICES OF MINE-RESCUER'S FUNCTIONAL STATE

Purpose. Substantiation of the requirements to the personal devices for monitoring, processing and transmitting the data on a functional state of mine-rescuer's organism during underground operations.

Methods. Analytical and information investigations of the regulatory documents administering the requirements to physical, chemical, technical, sanitary and hygienic, ergonomic and other characteristics of the personal devices in conditions of gas-and-dust hazardous coal mines.

Results. The quantitative and qualitative values of parameters of the personal electronic devices for monitoring the functional state of the mine-rescuer's organism have been substantiated. The list of requirements ensuring the safe, effective and comfortable usability of these devices has been elaborated.

Scientific novelty. The requirements to the personal electronic devices for monitoring the mine-rescuer's organism functional state in the underground workings of the coal mines have been developed for the first time.

Practical value. The application of the developed requirements to the devices for monitoring, processing and transmitting the data on the organism functional state will ensure the safety of the mine-rescuers in the extreme microclimatic conditions of the coal mines.

Keywords: *safety requirements; monitoring device; physiological indices; extreme microclimatic conditions; underground mine workings; ingress protection; monitoring of indices.*

УДК 504.171

*Дарья Владимировна Мачикина, ассистент; e-mail: d.machikina@mail.ru
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. (+38 062) 343-70-29*

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ**

Цель. Исследование проблем экологической безопасности предприятий тепловой энергетики угледобывающих регионов при образовании низкотемпературных отложений на стенках водогрейного оборудования котельных и тепловых сетей.

Методы. Анализ зависимости увеличения расхода топлива от толщины слоя низкотемпературных отложений. Изучение сезонных колебаний общей жёсткости воды, подаваемой в котельные и теплосети ДНР.

Результаты. Изучена тенденция сезонных колебаний общей жёсткости воды, подаваемой в котельные и теплосети ДНР. Практически подтверждено увеличение расхода топлива при увеличении толщины слоя накипи на стенках водогрейного оборудования на промышленной котельной шахты «Калиновская-Восточная» (г. Макеевка). Рассчитаны экономические издержки вследствие увеличения расхода топлива.

Научная новизна. Результаты теоретических исследований позволили установить зависимость увеличения расхода топлива от толщины слоя накипи на стенках водогрейного оборудования и рассчитать экономические издержки, вызванные данным процессом. Предложен вариант снижения расхода реагента для подготовки воды, подаваемой в котельные и теплосети, на основании сезонных колебаний общей жёсткости воды.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют оценить экономические издержки, вызванные образованием накипи на стенках водогрейного оборудования, и снизить расход реагентов для смягчения воды, подаваемой в котельные установки и теплосети, в зависимости от сезонных колебаний общей жёсткости воды.

Ключевые слова: *накипь; умягчение; жёсткость; теплосети; теплопроводность.*

Постановка проблемы. В настоящее время в угледобывающих регионах и в мире в целом сложилась сложная экологическая обстановка. Прежде всего она обусловлена стремительным ростом численности населения в мире и интенсивным развитием промышленности. Как следствие, в окружающую природную среду поступает большое количество загрязняющих веществ, которые ежедневно ухудшают экологическое состояние воздушного бассейна, поверхностных водоёмов, подземных вод и почвенного покрова. Загрязнение объектов окружающей природной среды становится причиной ухудшения здоровья населения и необратимой деградации природной среды (особенно урбанизированных территорий). В последнее время наблюдается устойчивая тенденция к ужесточению требований природоохранного законодательства по вопросам контроля выбросов загрязняющих веществ на промышленных предприятиях. Среди этих мер целесообразно выделить штрафные санкции

за выбросы, содержащие вредные загрязняющие вещества, концентрация которых превышает установленные санитарно-гигиенические нормативы.

Анализ последних исследований. В работах [1 – 5] авторы обосновали важность решения проблемы образования накипи на стенках водогрейного оборудования, однако не подтвердили результаты расчётом экономических и экологических издержек. Также не учтены сезонные колебания жёсткости воды с целью сохранения ресурсов в процессе подготовки воды для водогрейного оборудования.

Материалы исследования. Одно из важных условий жизнедеятельности человека в современных условиях городской среды – обеспечение населения теплом и горячей водой. Горячую воду, нагреваемую в котлах отопительных котельных или водяных подогревателей тепловых пунктов, подают в системы теплоснабжения. В процессе возникают потери горячей воды, вызванные её бытовым и производственным применением. Существенные потери воды также могут быть результатом аварий в теплотехнических системах. Для возмещения возникающих потерь системы горячего водоснабжения подпитывают свежей водой из природных источников или централизованного водоснабжения. Вода, забираемая из природных источников, зачастую имеет высокое содержание солей кальция и магния, которые и обуславливают её жесткость (табл. 1).

Таблица 1

Карбонатная и некарбонатная жёсткость воды

Соединения, обуславливающие карбонатную жесткость воды	Соединения, обуславливающие некарбонатную жесткость воды
Карбонат кальция (CaCO_3)	Сульфат кальция (CaSO_4)
Карбонат магния (MgCO_3)	Сульфат магния (Mg SO_4)
Бикарбонат кальция ($\text{Ca}[\text{HCO}_3]_2$)	Хлорид кальция (CaCl_2)
Гидроксид кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Хлорид магния (Mg Cl_2)
Гидроксид магния ($\text{Mg} (\text{OH})_2$)	

Процесс накипеобразования зависит от множества факторов. Кроме содержания солей кальция и магния существенное влияние на скорость образования низкотемпературных отложений оказывает водородный показатель pH среды [2].

Данные об общей жёсткости и водородном показателе pH воды, подаваемой в системы теплоснабжения населенных пунктов ДНР, представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Концентрация соединений, обуславливающих общую жесткость и водородный показатель рН воды, подаваемой потребителям ДНР (2015–2017 гг.)

Фильтровальная станция	2015 г.				2016 г.				2017 г.			
	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период
Донецкая	<u>7,77*</u>	<u>7,85</u>	<u>7,93</u>	<u>7,95</u>	<u>7,82</u>	<u>7,96</u>	<u>7,82</u>	<u>7,80</u>	<u>7,87</u>	<u>7,95</u>	<u>7,80</u>	<u>7,75</u>
	7,20	7,67	6,33	6,22	7,50	6,40	6,77	5,97	8,08	8,00	6,63	6,10
Макеевская	<u>7,95</u>	<u>8,04</u>	<u>7,98</u>	<u>7,73</u>	<u>7,87</u>	<u>7,84</u>	<u>8,06</u>	<u>8,04</u>	<u>7,88</u>	<u>8,05</u>	<u>7,80</u>	<u>7,82</u>
	7,50	6,06	6,99	6,38	8,15	7,58	7,10	6,30	8,20	7,62	6,83	6,40
Горловская № 1	<u>7,92</u>	<u>7,97</u>	<u>7,93</u>	<u>7,92</u>	<u>7,80</u>	<u>7,90</u>	<u>8,00</u>	<u>7,90</u>	<u>7,66</u>	<u>8,20</u>	<u>7,80</u>	<u>7,80</u>
	7,55	8,13	6,77	6,11	7,80	7,00	6,40	6,90	7,83	8,20	7,00	6,58
Енакиевская	<u>7,88</u>	<u>7,92</u>	<u>7,92</u>	<u>7,80</u>	<u>7,82</u>	<u>7,82</u>	<u>8,15</u>	<u>7,80</u>	<u>7,70</u>	<u>7,93</u>	<u>7,80</u>	<u>7,75</u>
	7,56	7,90	6,56	6,00	8,10	6,90	6,90	5,90	7,63	7,77	7,73	6,45
Верхнекальмиусская	<u>7,94</u>	<u>8,00</u>	<u>7,85</u>	<u>7,93</u>	<u>7,88</u>	<u>7,83</u>	<u>7,98</u>	<u>7,73</u>	<u>7,72</u>	<u>8,05</u>	<u>7,89</u>	<u>7,75</u>
	7,40	8,15	6,60	6,12	7,80	7,10	6,60	6,30	7,83	7,52	6,45	6,70
Волынцевская	<u>7,91</u>	<u>7,84</u>	<u>7,63</u>	<u>7,76</u>	<u>7,63</u>	<u>7,63</u>	<u>7,67</u>	<u>7,59</u>	<u>7,60</u>	<u>7,87</u>	<u>8,00</u>	<u>7,79</u>
	7,43	7,27	5,90	5,90	6,10	5,70	5,90	6,00	7,55	7,26	6,35	6,20

* Водородный показатель рН/общая жесткость воды, ммоль/дм³.

Таблица 3

Концентрация соединений, обуславливающих общую жесткость и водородный показатель рН воды, подаваемой потребителям ДНР (2018–2020 гг.)

Фильтровальная станция	2018 г.				2019 г.				2020 г.			
	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период	Зимний период	Весенний период	Летний период	Осенний период
Донецкая	<u>7,83</u>	<u>7,85</u>	<u>7,55</u>	<u>7,80</u>	<u>7,70</u>	<u>8,00</u>	<u>7,75</u>	<u>7,70</u>	<u>7,90</u>	<u>8,00</u>	<u>7,60</u>	<u>7,60</u>
	7,95	8,30	6,52	6,52	8,00	8,30	6,60	6,20	7,73	7,80	6,10	6,30
Макеевская	<u>7,90</u>	<u>8,00</u>	<u>7,80</u>	<u>7,75</u>	<u>7,95</u>	<u>8,20</u>	<u>7,80</u>	<u>7,80</u>	<u>8,00</u>	<u>7,85</u>	<u>7,75</u>	<u>7,75</u>
	7,60	8,00	6,80	6,90	7,70	8,40	6,80	6,40	7,90	6,30	6,70	6,10
Горловская № 1	<u>7,85</u>	<u>7,70</u>	<u>7,85</u>	<u>7,80</u>	<u>7,80</u>	<u>8,00</u>	<u>7,80</u>	<u>7,70</u>	<u>7,85</u>	<u>7,70</u>	<u>7,85</u>	<u>7,70</u>
	7,60	7,80	6,75	6,75	8,00	8,50	6,70	6,20	7,80	7,93	6,90	7,10
Енакиевская	<u>7,55</u>	<u>7,85</u>	<u>7,80</u>	<u>7,75</u>	<u>7,70</u>	<u>8,05</u>	<u>8,00</u>	<u>7,65</u>	<u>7,75</u>	<u>7,80</u>	<u>7,50</u>	<u>7,50</u>
	7,30	8,00	6,60	6,60	8,30	8,00	6,65	6,20	7,70	7,10	6,60	6,00
Верхнекальмиусская	<u>8,00</u>	<u>8,00</u>	<u>7,80</u>	<u>7,70</u>	<u>7,75</u>	<u>8,00</u>	<u>7,70</u>	<u>7,60</u>	<u>8,00</u>	<u>7,50</u>	<u>7,00</u>	<u>7,30</u>
	8,30	8,20	7,00	6,30	8,20	8,30	6,70	6,30	7,80	7,30	6,70	6,30
Волынцевская	<u>7,80</u>	<u>7,75</u>	<u>7,60</u>	<u>7,60</u>	<u>7,70</u>	<u>7,80</u>	<u>7,55</u>	<u>7,60</u>	<u>8,00</u>	<u>7,70</u>	<u>7,52</u>	<u>7,60</u>
	7,00	7,15	6,40	7,30	8,00	7,65	6,35	6,40	7,85	7,10	6,53	6,20

Более наглядно сезонные колебания жёсткости воды отображает график (рис. 1), на котором представлены изменения общей жёсткости воды по месяцам за январь 2020 – март 2021 г.

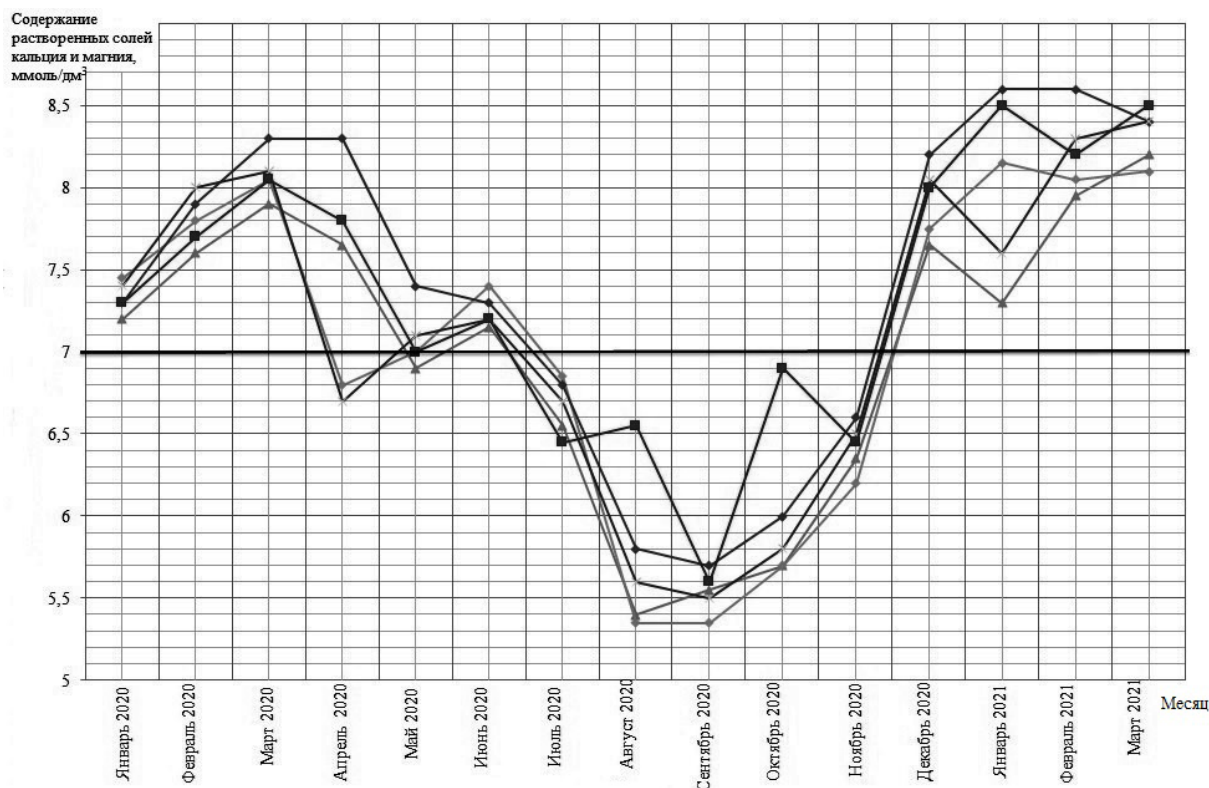


Рис. 1. Сезонные колебания общей жёсткости воды, подаваемой в котельные

Общая жёсткость воды, подаваемой для подпитки теплосетей, не должна превышать $7,0$ ммоль/дм³ при оптимальной величине водородного показателя $pH = 9,0$. Как видно из табл. 2 и 3 и рис. 1, вода, подаваемая в котельные ДНР, имеет повышенную жёсткость (за исключением теплого периода года). Также можно отметить тенденцию к росту общей жёсткости воды на всех фильтровальных станциях в периоды январь-март 2020 г. и январь-март 2021 г. в среднем на $0,63$ ммоль/дм³, что ещё раз подтверждает актуальность изучения вопроса смягчения воды, подаваемой для подпитки водогрейного оборудования. Рост концентрации солей кальция и магния приводит к стремительной интенсификации процессов накипеобразования. Накипь твёрдым низкотемпературным слоем откладывается на стенках водогрейного оборудования и трубопроводов. Толщина накипи может составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. В отдельных случаях накипь может полностью забивать трубы в котлах и водоподогревателях, что приводит к сокращению срока эксплуатации оборудования и возрастанию числа внеплановых ремонтных работ.

Основной компонент низкотемпературных отложений, формирующих слой накипи на поверхностях нагрева водогрейного оборудования, – карбонат кальция.

Карбонат кальция может быть представлен в виде двух кристаллических форм: арагонита и кальцита. В зависимости от химического состава исходной воды и конкретных условий работы теплообменника в отложениях могут присутствовать оксиды железа, сульфат кальция, силикаты и др. [3, 4].

Слой накипи имеет очень низкую теплопроводность. Поэтому отложение накипи на стенках водогрейного оборудования приводит к ухудшению условий передачи тепла в котельном и теплообменном оборудовании, снижению их мощности и теплопроизводительности. Накипь снижает эффективность использования топлива, приводит к его перерасходу и тем самым увеличивает количество продуктов сгорания, выбрасываемых в атмосферу (оксиды серы, азота и углерода, сажа и др.).

Установлена зависимость увеличения расхода топлива от толщины накипи (рис. 2).

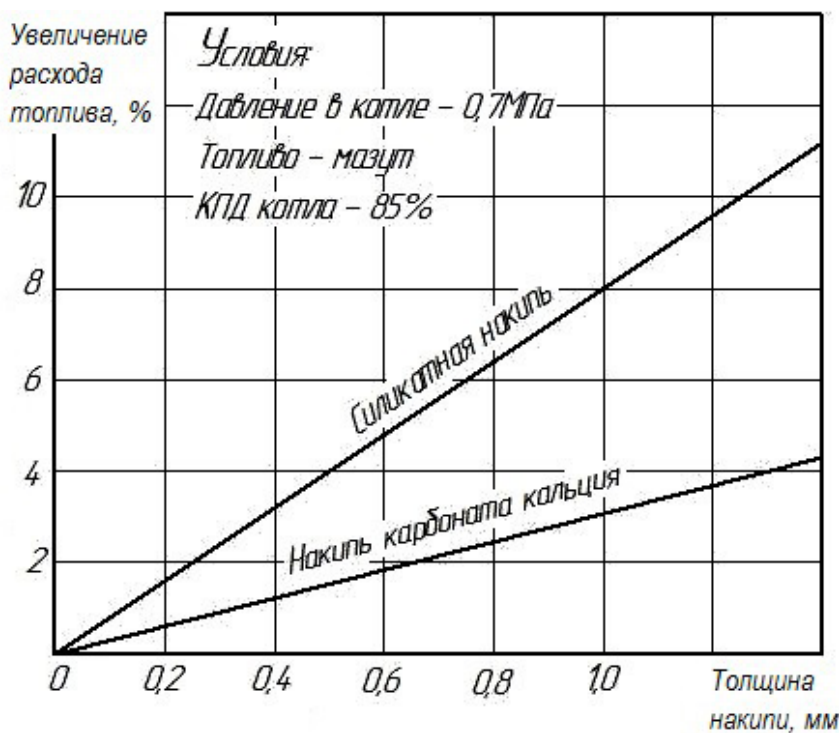


Рис. 2. Изменение энергетических показателей котла в зависимости от толщины накипи и типа накипеобразователя

Исследования, проведённые на промышленной котельной шахты «Калиновская-Восточная» (г. Макеевка), позволили установить увеличение энергозатрат в зависимости от толщины накипи 0,34 и 0,12 мм. Далее расчётным путём установлено увеличение энергозатрат при толщине накипи 0,60 и 1,7 мм. Также были оценены затраты на топливо в зависимости от толщины отложений (табл. 4).

При отсутствии отложений накипи годовая экономия расходов на топливо составит 28,51 млн руб., а при наличии отложений толщиной 0,60 мм расход топлива увеличивается в 1,2 раза. Такое увеличение расхода топлива незамедлительно приведёт к стремительному росту экономических

и экологических издержек, в частности, к увеличению объёмов выбросов загрязняющих веществ, образовавшихся в результате сжигания топлива, в атмосферу. Изученная зависимость увеличения расхода топлива и, как следствие, экономических и экологических издержек применима ко всем котельным. Данные о количестве котельных на территории ДНР представлены в табл. 5.

Таблица 4
Затраты на топливо в зависимости от толщины отложений

Толщина отложений, мм	Увеличение энергозатрат, %	Увеличение энергозатрат на кВт/ч, руб/ч	Затраты по котельной, руб/ч	Затраты за год, млн руб/год
0,12	4	1,72	6864	29,65
0,34	12	1,85	7392	31,93
0,60	21,5	2,0	8019	34,64
1,70	61,8	2,67	10679	46,13

Таблица 5
Котельные ДНР

Название	Количество единиц
Централизованные	985
Газ	715
Уголь	236
Жидкое топливо	6
Электрокотельные	28
Мини-котельные	152
Всего:	1137

При сжигании различных видов топлива твёрдые и газообразные соединения, попадающие в атмосферу, наносят ощутимый ущерб качеству атмосферного воздуха. Например, диоксид серы, обладая высокой реакционной способностью, после попадания в атмосферный воздух претерпевает ряд химических превращений. Наиболее опасным является его окисление и, как следствие, образование H_2SO_4 . В атмосферном воздухе, насыщенном парами воды, диоксид серы преобразовывается в сернистую, а затем в серную кислоту.

Оксиды азота, попадая в атмосферу, становятся источниками образования азотной кислоты, которая, в отличие от серной кислоты, способна длительное время пребывать в атмосферном воздухе в газообразном состоянии вследствие ее плохой конденсации. Далее пары азотной кислоты поглощаются атмосферной влагой и аэрозолями.

Основной способ очищения атмосферного воздуха – выпадение осадков (кислотных дождей, снега, туманов). Кислотные осадки наносят непоправимый

ущерб растительному и животному миру. Увеличение выбросов CO₂ усиливает «парниковый эффект», который обуславливает одну из причин повышения средней температуры поверхности Земли. В отходах предприятий тепловой энергетики скапливаются остатки недогоревшего топлива и зола. Их накопление в зонах промышленных регионов наносит существенный урон экосистемам почв [1, 4].

С целью обеспечения экологической безопасности и снижения негативного воздействия предприятий тепловой энергетики на окружающую природную среду необходимо избавиться от дополнительного расхода топлива, вызванного низкотемпературными отложениями на поверхности водогрейного оборудования и трубопроводов. Поэтому для подпитки тепловых сетей воду перед использованием требуется подвергать обработке, чтобы снизить её способность к накипеобразованию.

Существует несколько методов снижения накипеобразующей способности воды: ионообменное умягчение воды, реагентное умягчение воды, умягчение воды электродиализом, ингибирование солей жёсткости, обработка воды физическими полями [1, 4, 5].

В настоящее время для подготовки воды наиболее распространено катионирование, то есть пропускание ее через слой зернистого катионита. В результате ионы кальция и магния обмениваются на ионы натрия, присутствующие в катионите. Отработанный катионит регенерируют раствором поваренной соли.

Однако такой метод водоподготовки имеет ряд недостатков. Основной из них – образование при регенерации ионообменных фильтров отработанных регенерационных растворов, содержащих хлористые кальций, магний, натрий в концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые.

Отработанные регенерационные растворы после попадания в водоёмы негативно влияют на живые организмы, обитающие в этих водоёмах. Живые организмы адаптировались к среде с водородным показателем pH = 6÷7. В среде, загрязненной отработанными регенерационными растворами, яйцеклетки и молодь водных обитателей гибнут. Изменения затрагивают пищевые цепи, сокращая сначала популяции птиц и животных, питающихся обитателями вод, а затем и хищников.

Таблица 6

Противонакипный эффект воздействия физических полей

Способ обработки	Противонакипный эффект, %
Магнитное поле	53,6
Электрическое поле	72,0
Ультразвуковое поле	57,8

Кроме вышеуказанных методов широкое применение получила обработка воды физическими полями. В табл. 6 представлен противонакипный

эффект физических полей (для воды с общей жёсткостью 6,0 ммоль/дм³) [5].

Существует ряд отечественных и зарубежных исследований, направленных на изучение возможности комбинированного воздействия физических полей на обрабатываемую воду (табл. 7) [5]. Однако ввиду эксплуатационной сложности внедрения данной технологии на предприятиях они пока не получили широкого применения.

Таблица 7

Возможный комбинированный противонакипный эффект
воздействия физических полей

Физическое поле	Комбинированный противонакипный эффект, %
Электрическое поле – магнитное поле	71,5
Магнитное поле – электрическое поле	74,9
Электрическое поле – ультразвуковое поле	75,8
Ультразвуковое поле – электрическое поле	77,1
Магнитное поле – ультразвуковое поле	87,28
Ультразвуковое поле – магнитное поле – электрическое поле	88,37

В настоящее время все изученные физические методы предотвращения накипеобразования обладают одним существенным недостатком – они не позволяют полностью предотвратить процесс образования накипи.

Выводы. Среди проблем экологической безопасности предприятий тепловой энергетики угледобывающих регионов можно выделить следующие:

- Дефицит воды надлежащего качества для подачи в систему теплоснабжения, что обусловлено повышением концентрации соединений кальция и магния вследствие сброса откачиваемых шахтных вод в поверхностные водоёмы. В Донецком регионе даже после процедуры водоподготовки воду, подаваемую для подпитки котлов котельных, можно отнести к «жёсткой».

- Вынужденное использование в качестве подпиточной воды с повышенным показателем общей жёсткости, что приводит к интенсификации процессов накипеобразования.

- Образование низкотемпературных слоёв отложений на стенках водогрейного оборудования и трубопроводов приводит к увеличению расхода топлива и, как следствие, к увеличению экологических издержек. В частности, возрастают выбросы оксидов азота и серы, оксидов углерода, метана, тяжелых металлов и взвешенных веществ в атмосферный воздух.

- Отсутствие дешёвого и экологически безопасного метода умягчения воды в процессе подготовки ее для систем теплосети. Большая часть существующих методов характеризуется наличием существенных эксплуатационных и капитальных экономических издержек, а также требует утилизации использованных реагентов.

• Проведённое исследование на промышленной котельной шахты «Калиновская-Восточная» (г. Макеевка) позволило оценить затраты на топливо в зависимости от толщины отложений. Было установлено, что при отсутствии отложений накипи годовая экономия расходов на топливо составит 28,51 млн руб., а при наличии отложений толщиной 0,60 мм расход топлива увеличивается в 1,2 раза.

• Установленная устойчивая сезонная тенденция изменения общей жёсткости воды позволяет предложить снижение расходов ресурсов на смягчение воды для подачи в водогрейное оборудование. В теплоё время года (июнь-октябрь) смягчения воды не требуется ввиду установленного показателя общей жесткости, не превышающего 6,5 ммоль/дм³, что позволит сократить техногенную нагрузку на окружающую природную среду и даст положительный экономический эффект.

Список литературы / References

1. Гулько, С.Е. Уменьшение вредного влияния шахтных вод на окружающую среду / С.Е. Гулько, С.П. Высоцкий // 22 марта – Всемирный день водных ресурсов: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (22 марта 2019 г.). – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2019. – С. 57 – 75.

Gul'ko S.Ye., Vysotskiy S.P. *Umen'shenie vrednogo vliyaniya shakhtnykh vod na okruzhayushhuyu sredu* [Reduction of mine waters harmful effect on the environment]. *22 marta – Vsemirnyi den' vodnykh resursov: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (22 marta 2019 g.)* [The 22nd March – International Water Resources Day: materials of the International scientific and practical conference (March 22, 2019)]. Lugansk, LNU im. V. Dalya Press, 2019, pp. 57-75. (In Russian).

2. Галковский, В.А. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности / В.А. Галковский, М.В. Чупова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 5 – 8.

Galkovskiy V.A., Chupova M.V. *Analiz snizheniya koeffitsienta teploperedachi teploobmennyykh apparatov vsledstvie zagryazneniya poverkhnosti* [Analysis of thermal conduction coefficient reduction of the heat exchangers due to surface fouling]. *Naukovedenie – Science studies*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 5-8. (In Russian).

3. Высоцкий, С.П. Оптимизация реагентных методов осаждения твёрдых образований в системах умягчения воды / С.П. Высоцкий, Д.В. Мачикина // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2021. – № 2(37). – С. 53 – 59.

Vysotskiy S.P., Machikina D.V. *Optimizatsiya reagentnykh metodov osazhdeniya tvyordyykh obrazovaniy v sistemakh umyagcheniya vody* [Optimization of reagent methods of solid scale settlement in the water softening systems]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta – News of the Automobile and Road Construction Institute*, 2021, no. 2(37), pp. 53-59. (In Russian).

4. Высоцкий, С.П. Перспективы использования энергоносителей для производства тепловой и электрической энергии / С.П. Высоцкий,

А.В. Кондрыкинская // Вестник Луганского университета им. В. Даля. – 2019. – № 10(28). – С. 194 – 201.

Vysotskiy S.P., Kondrykinskaya A.V. *Perspektivy ispol'zovaniya energonositelei dlya proizvodstva teplovoi i elektricheskoi energii* [Prospects of using the energy carriers for thermal and electric energy production]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni V. Dallya – Bulletin of the Lugansk National University named after V. Dahl*, 2019, no. 10(28), pp. 194-201. (In Russian).

5. Неведров, А.В. Проблемы накипеобразования и экологической безопасности предприятий тепловой энергетики / А.В. Неведров, Г.В. Ушаков, Б.Г. Трясунов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2003. – № 2. – С. 83 – 85.

Nevedrov A.V., Ushakov G.V., Tryasunov B.G. *Problemy nakipeobrazovaniya i ekologicheskoi bezopasnosti predpriyatii teplovoi energetiki* [Problems of scale formation and environmental safety of thermal power enterprises]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2003, no. 2, pp. 83-85. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 26.08.2021

Darya Vladimirovna Machikina, assistant; e-mail: d.machikina@mail.ru

The State Educational Institution of High Professional Education “Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”

283123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone (+38 062) 343-70-29

ENVIRONMENTAL SAFETY PROBLEMS OF THERMAL POWER ENTERPRISES OF COAL-MINING REGIONS

Purpose. Investigation of the environmental safety issues of thermal power enterprises of the coal-mining regions emerged with formation of low-temperature scales on the walls of water-heating facilities of boiler houses and heat supply networks.

Methods. Analysis of dependence between the increasing fuel-consumption rate and the thickness of low-temperature scale layer. Research of seasonal fluctuations of water total hardness supplied to the boiler houses and the heat supply networks of the Donetsk People’s Republic.

Results. The tendency of seasonal variations of water total hardness supplied to the boiler houses and the heat supply networks of the DPR. The increase in fuel-consumption rate resulted from thickening of the scale on the walls of water-heating facilities at the industrial boiler house of the Kalinovskaya-Vostochnaya coal mine (Makeyevka) has been practically confirmed. The economic costs resulted from the increase in fuel-consumption rate have been calculated.

Scientific novelty. The results of theoretical investigations have made it possible to establish the dependence between the increase in fuel-consumption rate and the thickness of scale layer on the walls of the water-heating facilities and to calculate the economic costs caused by that process. Based on the seasonal variations of the water total hardness the option to decrease the reagent consumption rate for water treatment supplied to the boiler houses and the heat supply networks has been proposed.

Practical value. The obtained results make it possible to estimate the economic costs caused by the scale formation on the walls of the water-heating facilities and to reduce the consumption rate of reagents softening the water supplied to the boiler houses and the heat supply networks depending on the seasonal variations of the water total hardness.

Keywords: *scale; softening; hardness; heat supply networks; thermal conduction.*

**Указатель статей, опубликованных в журнале «Научный вестник
НИИГД “Респиратор”: научно-технический журнал» в 2021 году**

ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	Вып.	Стр.
Агеев В.Г., Галухин Н.А., Болдырев М.Н., Ефименко В.Л. Динамика движения жидкости в стволе импульсного пожаротушающего устройства	1	7
Агеев В.Г., Коврижкин О.И. Фильтрация азота через выработанное пространство при инертизации изолируемого выемочного участка	2	7
Агеев В.Г., Пефтибай Г.И., Галухин Н.А. Генератор ультразвуковых колебаний для распыления пожаротушающей жидкости	3	7
Агеев В.Г., Пефтибай Г.И., Галухин Н.А. Совершенствование рецептуры быстротвердеющих смесей на основе цементного вяжущего	4	7
Булгаков Ю.Ф., Подвигин К.А. Математическая модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте со льдом	1	34
Булгаков Ю.Ф., Дикенштейн И.Ф., Мельникова В.В. Накопление метана в тупиковых выработках при их заполнении пеной во время взрывных работ	4	28
Греков С.П., Орликова В.П. Реакционная поверхность угля и эндогенная пожароопасность	1	17
Греков С.П., Орликова В.В. Определение коэффициентов диффузии кислорода в ископаемых углях на основе изотерм адсорбции	3	17
Греков С.П., Орликова В.В. Влияние химической активности угля на процесс поглощения кислорода	4	16
Греков С.П., Орликова В.В., Волынец В.В. Двухфазное кислородное окисление углей различных фракционных составов	2	15
Головченко Е.А., Момот Д.И., Пашковский О.П. Пожаробезопасные параметры формирования плоского породного отвала	2	40
Коврижкин О.И. Методика расчета подачи газообразного азота в изолированную тупиковую горную выработку	3	32
Коляда А.Ю., Осадчий А.В., Разиньков С.В. Пожарная опасность шахтных кабельных сетей	4	39
Лебедева В.В. Полимерная композиция для получения огнезащитного материала	3	24
Лебедева В.В., Непочатых И.Н. Покрытие для огнезащиты деревянных конструкций	1	27
Лебедева В.В., Храпоненко О.В. Обнаружение компонентов легковоспламеняющихся жидкостей методом газовой хроматографии	2	31
Мамаев В.В., Галухин Н.А. Газодинамические процессы в закачных огнетушителях	2	24

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ	Вып.	Стр.
Агарков Ан.В. Применение симплекс-решетчатого метода при исследовании сорбционной емкости сорбентов	1	40
Агеев В.Г., Коляда А.Ю. Параметры локализации пожаров распыленной водой	3	50
Гулько С.Е., Мавроди А.В. Влияние дегазации на метановыделение из сближенных пластов	3	42
Гуржий В.В., Березин А.А. Совокупные признаки аварийных режимов работы в контактных соединениях электроустановок	4	77
Долженков А.Ф., Князева Т.В., Мороз Т.О., Лопатина Е.В. Оценка эффективности защиты спасателей	1	51
Зборщик Л.А., Плетенецкий Р.С., Францев В.И. Зависимости массообмена от схем испытаний сорбентов	2	58
Иваненко А.Ф., Мухин П.Е., Попова Л.М., Омелаева А.А. Анализ состояния нормативно-методической базы оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях	3	60
Ковалев А.П. Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложной по структуре восстанавливаемой системы с учетом двух видов несовместных отказов электрооборудования	2	78
Козлитин А.А., Лебедева В.В., Непочатых И.Н., Храпоненко О.В. Огнезащита древесины с помощью состава на основе силиката	4	56
Лебедева В.В., Щербакова О.Н. Разработка многокомпонентных сорбентов симплекс-решетчатым методом	2	48
Медгаус В.М., Папазова О.В., Попов Н.Н., Шлома В.В. Исследование времени хранения охлаждающих элементов при повышенной температуре окружающей среды	1	77
Новиков А.О., Дрипан П.С., Старикова И.Г. Бесклеевой способ установки анкера под действием статической нагрузки	1	59
Головченко Е.А., Орликова В.П., Момот Д.И. Идентификация вида сгорающего вещества при аварии в угольной шахте	4	47
Симонов А.М., Карнаух Н.В., Агарков Ал.В. Проветривание аварийных участков шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа	3	68
Симонов А.М., Карнаух Н.В., Агарков Ал.В. Мониторинг газовой обстановки на горных отводах шахт, в зданиях и сооружениях	4	65
Тохташ Н.А. Влияние психологических аспектов на снижение производственного травматизма спасателей	2	64
Хацько М.С., Никитюк Н.А., Дикенштейн И.Ф., Тохташ Н.А. Формирование профессиональных качеств сотрудников газодымозащитной службы МЧС ДНР в области человеческого фактора	1	68

ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	Вып.	Стр.
Гуржий В.В., Березин А.А., Свердил Д.К. Признаки локального нагрева в контактных соединениях электроустановок	1	102
Дикенштейн И.Ф., Кравец О.П. Анализ эффективности осуществления надзорной деятельности в сфере пожарной безопасности	4	92
Долженков А.Ф., Князева Т.В., Мороз Т.О. Обоснование подходов к оценке эффективности средств индивидуальной защиты спасателей	3	80
Иваненко А.Ф., Булатников А.А. Требования к индивидуальным устройствам контроля функционального состояния горноспасателя	4	99
Лебедева В.В., Непочатых И.Н., Храпоненко О.В. Лабораторная установка для исследования свойств огнезащитного покрытия	2	100
Лебедева В.В., Щербакова О.Н. Влияние состава многокомпонентных сорбентов на их сорбционную емкость	3	88
Мамаев В.В., Симонов А.М., Агарков Ал.В. Системы дистанционного контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров в шахтах	2	90
Мачикина Д.В. Проблемы экологической безопасности предприятий тепловой энергетики угледобывающих регионов	4	111
Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А. Разработка объемного метода анализа поглотителей сорбентов диоксида углерода	3	107
Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А., Францев В.И. Малогабаритный шланговый аппарат для ведения работ в загрязненных средах	4	83
Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А., Чапкович А.В., Францев В.И. Процессы теплообмена тепловой камеры для испытания дыхательных аппаратов	1	84
Подвигин К.А. Закономерности движения струи охлажденного воздуха в горной выработке	2	109
Симонов А.М., Карнаух Н.В., Агарков Ал.В., Захлебин В.В. Контроль за выделением вредных газов на земную поверхность	1	94
Шаповалов В.В., Ганнова Ю.Н., Шаповалова Т.В., Берестовая А.А. Адсорбенты диоксида серы на основе СаО и СаСО ₃ , активированные нитратом лития	3	96

Требования к оформлению и опубликованию статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступом 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и адрес электронной почты;
- название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован и содержать следующие элементы: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов) на русском и английском языках;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи (постановка задания);
- описание методов (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 10 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фотоснимки и др.) предоставляются в виде отдельных файлов общепринятых графических форматов (jpeg, bmp). Диаграммы, схемы, графики должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Visio). *Рисунки* (диаграммы, фотоснимки и др.) располагают вместе с текстом в местах ссылок на них. Изображения должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подрисуночные подписи обязательны. Недопустимо включать их в сам рисунок.

Формулы выполняются в редакторе Math Type (кроме однострочных), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом и располагают по центру строки. Номер формулы указывается справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы располагаются в книжной ориентации, они должны иметь заголовки и быть пронумерованными, если их две или более. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; обозначают цифрами в квадратных скобках. Порядок изложения элементов библиографического описания на русском языке определен требованиями ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. В списке литературы должно быть не более 20 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи. Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты; ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Рецензия

• Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению. Если рукопись научной статьи соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

- Рецензент оценивает статью и дает заключение о целесообразности ее публикации.
- Рецензии хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Если статья не соответствует профилю журнала, то автору сообщается о невозможности её публикации.

В случае положительного решения редакция регистрирует статью и совместно с автором ведёт подготовку статьи к публикации. Перед публикацией статьи автору представляется отредактированный сверстный вариант для просмотра.

Рукописи статей, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

Статьи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2021, № 4(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 09.12.2021.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-60

Объем 6,55 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 13 декабря 2021 г.