



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 3(57)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2020

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 3(57). – 120 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	С.П. Греков – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	Ю.Ф. Булгаков
д-р техн. наук	С.П. Высоцкий
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.Г. Игишев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	В.П. Коптиков (Российская Федерация)
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	В.В. Мамаев
д-р техн. наук	Ф.В. Недопекин
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
канд. техн. наук	В.С. Харьковский (Республика Казахстан)
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 5 от 13.08.2020).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 3(57)

Published quarterly

Founded in 1970

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2020. – No. 3(57). – 120 p.

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

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

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

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Vysotskiy
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Igishev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	V.P. Koptikov (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev
Dr. Sci. (Tech.)	F.V. Nedopekin
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Cand. Sci. (Tech.)	V.S. Kharkovskiy (Republic of Kazakhstan)
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 5 from 13.08.2020).

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., Агарков Ан.В.,
Козлитин А.А., Лебедева В.В.**
Природные сорбенты для поглощения
химически опасных веществ **7**

- Мамаев В.В., Пефтибай Г.И.,
Галухин Н.А., Ефименко В.Л.**
Математическая модель динамических
процессов импульсного устройства
пожаротушения **18**

- Греков С.П., Орликова В.П.**
Расчет температуры самонагрева
угля **26**

- Коврижкин О.И., Коляда А.Ю.,
Калиниченко Н.А.**
Использование газообразного азота при
ликвидации подземных пожаров **37**

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

- Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.**
Система обеспечения вызова
экстренных оперативных служб
по единому номеру **45**

- Мамаев В.В., Симонов А.М.,
Агарков Ал. В., Турчанин В.Г.**
Система дистанционного отбора проб
шахтного воздуха при ведении
аварийно-спасательных работ **54**

- Коляда А.Ю., Осадчий А.В.,
Буряк Д.С.**
Тушение пожаров на промышленных
объектах с маслonaполненным
электрооборудованием **64**

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

- Ageyev V.G., Agarkov An.V.,
Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.**
Natural sorbents for absorption
of chemically hazardous substances **7**

- Mamayev V.V., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A., Yefimenko V.L.**
The mathematical model of dynamic
processes of a pulse fire-extinguishing
device **18**

- Grekov S.P., Orlikova V.P.**
Calculation of coal spontaneous heating
temperature **26**

- Kovrizhkin O.I., Kolyada A.Yu.,
Kalinichenko N.A.**
Use of the gaseous nitrogen during
elimination of underground fires **37**

II. Safety in emergencies

- Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.**
The emergency response service support
system with a single emergency number **45**

- Mamayev V.V., Simonov A.M.,
Agarkov Al.V., Turchanin V.G.**
System of remote collection of mine air
samples during carrying-out the emergency
and rescue operations **54**

- Kolyada A.Yu., Osadchiy A.V.,
Buryak D.S.**
Fighting the fires at industrial objects
with oil-filled electric equipment **64**

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,
Храпоненко О.В.**

Полимерный материал для огнезащиты
строительных конструкций

75

**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,
Khraponenko O.V.**

Polymeric material for fire retardation
of building structures

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

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

Греков С.П., Всякий А.А.

Коэффициенты диффузии метана
в углях разных степеней метаморфизма

84

Grekov S.P., Vsyakiy A.A.

Methane diffusion coefficients in coal
of different metamorphic grades

**Медгаус В.М., Папазова О.В.,
Попов Н.Н., Шлома В.В.**

Повышение эффективности хранения
охлаждающих элементов

92

**Medgaus V.M., Papazova O.V.,
Popov N.N., Shloma V.V.**

Efficiency improvement of storage
of cooling elements

**Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А.,
Францев В.И.**

Имитация потребления кислорода при
испытаниях дыхательных аппаратов

99

**Pletenetskiy R.S., Zborshchik L.A.,
Frantsev V.I.**

Simulation of oxygen consumption during
testings of breathing apparatuses

Ковалев А.П.

Методика расчета надежности сложных
невосстанавливаемых систем

108

Kovalyov A.P.

Methodology of calculating the reliability
of complex non-restorable systems

Требования к оформлению статьи

118

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [552.574:544.723.2]:547.532

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

Андрей Викторович Агарков, соискатель; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

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

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

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

ПРИРОДНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Сравнительные исследования сорбционной способности каменных углей Донецкого региона, оценка возможности их применения в качестве сорбционных материалов при ликвидации последствий аварийных проливов химически опасных веществ.

Методы. Определение сорбционной емкости каменных углей ускоренным и продолжительным гравиметрическим методом в статических условиях эксперимента. Адсорбционный метод определения предельной сорбционной емкости материалов. Математическая обработка экспериментальных данных методом Глюкауфа.

Результаты. Исследована сорбция по бензолу каменных углей Донецкого региона различных марок: антрацита, газового и длиннопламенного газового, коксового, жирного коксового, тощего. Определены значения сорбционной емкости образцов каменных углей в статических условиях эксперимента. Адсорбционным методом получены интегральные кривые сорбции паров бензола, определена предельная сорбционная емкость образцов каменных углей. Установлено, что среди исследуемых марок каменного угля лучшими сорбционными свойствами обладают газовый и длиннопламенный газовый уголь.

Научная новизна. Впервые для каменных углей различной степени метаморфизма получены значения сорбционной емкости по бензолу – одному из аварийно химически опасных веществ в статических и динамических условиях эксперимента.

Практическая значимость. Исследование сорбционной способности каменных углей различных марок позволяет накопить базу экспериментальных и расчетных характеристик, которые могут быть использованы при разработке природных сорбентов. Показана перспективность практического использования газового и длиннопламенного газового угля в качестве сырья для получения дешевых и доступных природных сорбентов, применение которых позволит оперативно и эффективно ликвидировать отрицательные последствия аварий, связанных с проливами химически опасных веществ, и тем самым повысить экологическую безопасность. Использование местных ресурсов расширит сырьевую базу получения природных сорбентов, снизит их стоимость за счет применения доступных материалов.

Ключевые слова: *аварийный пролив; адсорбционный метод; бензол; газовый уголь; гравиметрический метод; длиннопламенный газовый уголь; сорбционная емкость; экологическая безопасность.*

Постановка проблемы. Химически опасные вещества создают потенциальную угрозу экологической системе в случае их аварийного пролива. Кроме того, пролитые жидкости и их пары могут послужить причиной возникновения и развития пожаров, приводящих к социальным потерям и огромному материальному ущербу. Но если социальные потери от пожара

(погибшие и пострадавшие люди) и материальный ущерб, как правило, известны после пожара, то экологический ущерб имеет не только текущие, но и отдаленные последствия для человечества и всей экологической системы. Следовательно, оперативная локализация, сбор и ликвидация последствий аварийных проливов опасных жидкостей будут способствовать снижению уровня поступающих в природную среду токсичных веществ и предотвращению тяжелых негативных воздействий на различные объекты окружающей среды.

Один из эффективных и широко используемых способов ликвидации проливов химически опасных веществ заключается в засыпке аварийной зоны и снижении испарения паров опасных веществ с поверхности пролива сорбирующими материалами (сорбентами). В качестве сорбентов могут быть использованы синтетические и природные материалы, имеющие хорошо развитую пористую структуру, благодаря чему они обладают повышенной поглощающей способностью. В числе синтетических сорбирующих материалов выгодно выделяются по своим характеристикам вспененные материалы на основе полимерных смол различной химической природы. Типичными представителями таких сорбентов служат поролон, синтепон, лавсан, карбамидные и полистирольные пенопласты, материалы на основе полиуретановой пены и др. [1]. Среди природных сорбирующих материалов можно отметить кокс, графит, торф, активированные угли, волокна и ткани и др.

Однако наряду с ценным комплексом свойств, которыми обладают синтетические сорбенты и активированные угли, к их существенному недостатку следует отнести высокую стоимость и дефицит, что ограничивает использование этих материалов для ликвидации последствий аварий техногенного характера, связанных с масштабными проливами химически опасных веществ.

Разработка альтернативных более дешевых сорбентов, позволяющих приблизиться к уровню сорбционной емкости активированных углей, для решения вопросов защиты окружающей среды и повышения экологической безопасности стимулирует использование местных природных материалов, которые отличаются дешевизной и доступностью.

Анализ последних исследований. Из литературных источников [2 – 4] известно о применении сорбентов природного происхождения для очистки воздуха и воды, в производстве металлов, полимерной химии, пищевой промышленности, энергетике, медицине, фармакологии и других областях. Вопросам ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов с помощью сорбентов посвящены современные научные исследования [5 – 7]. К сожалению, проблеме разработки дешевых и недефицитных природных сорбентов для ликвидации последствий масштабных проливов химически опасных веществ в результате аварий техногенного характера не уделяется должного внимания.

Один из путей решения задачи заключается в использовании богатой сырьевой базы Донецкого региона, главным образом значительных запасов

каменного угля, свойства которого: насыпная плотность, механическая прочность, объем микропор и удельная поверхность – позволяют использовать его в качестве углеродного сорбента [8].

Цель работы – сравнительные исследования сорбционной способности каменных углей Донецкого региона, оценка возможности их применения в качестве сорбционных материалов для ликвидации последствий аварийных проливов химически опасных веществ.

Изложение основного материала. Для исследования взяты природные материалы, которые в достаточном объеме можно добыть на территории Донецкого региона, – каменные угли шести марок: А (антрацит), Г (газовый), ДГ (длиннопламенный газовый), ЖК (жирный коксовый), К (коксовый) и Т (тощий). Для сравнения и оценки сорбционных свойств материалов определяли сорбционную емкость угля активированного СКТ и АГН в аналогичных условиях эксперимента.

Исследования проводили по бензолу, пары которого используют в качестве стандартного вещества при исследовании свойств углеродных сорбентов [4].

Критерием поглощающей способности материала служит его сорбционная емкость – количественная характеристика поглощения единицей массы сорбента жидкой или паровоздушной фазы вещества. Поэтому оценку и выбор материалов, которые могут применяться в качестве сорбентов, проводили путем сравнения их сорбционной емкости в статических и динамических условиях эксперимента.

Статическую сорбционную емкость определяли ускоренным и продолжительным гравиметрическим методом. Ликвидация аварийных проливов химически опасных веществ на твердую поверхность, с учетом интенсивности испарения и возможности воспламенения пожароопасных паров, требует минимизации времени насыщения сорбента. Учитывая это требование к сорбентам, сорбционную эффективность оценивали по максимально возможной сорбционной способности за минимальное время (15 мин) насыщения образца угля жидкой фазой бензола.

Подготовка образцов угля для исследований включала предварительное дробление, измельчение и отсев целевой фракции размером 0,315...0,5 мм. Оптимальный размер фракции установлен на основании исследований сорбционной емкости каменных углей пяти фракций в работе [9].

Для получения сопоставимых результатов образцы угля предварительно высушивали до постоянной массы и насыщали бензолом в течение 15 мин (ускоренные испытания) и 24 ч (продолжительные испытания).

Испытания проводили трижды для получения и вычисления на их основе среднего значения насыщаемости бензолом единицы массы угля. Статическую сорбционную емкость угля по бензолу $A_{ст}$ (табл. 1) рассчитывали по формуле

$$A_{ст} = m_s / m_0, \quad (1)$$

где $m_s = (m_{ст} - m_0)$ – масса сорбированного бензола, г;

m_{ST} — масса навески угля после обработки бензолом, г;
 m_0 — исходная масса навески угля, г.

Таблица 1

Статическая сорбционная емкость образцов угля

Марка и место отбора образца угля	Статическая сорбционная емкость образца угля по бензолу $A_{ст}$	
	ускоренный гравиметрический метод, время насыщения бензолом 15 мин	продолжительный гравиметрический метод, время насыщения бензолом 24 ч
Уголь марки А (антрацит), шахта «Прогресс»	0,60	0,60
Уголь марки К (коксовый), пласт l_1^B , шахта «Щегловская-Глубокая»	0,60	0,65
Уголь марки ЖК (жирный коксовый), шахта им. А.А. Скочинского	0,62	0,67
Уголь марки Т (тощий), пласт k_5 , шахта № 22 «Коммунарская»	0,65	0,70
Уголь марки Г (газовый), пласт l_6 , шахта «Белореченская»	0,72	0,73
Уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый), пласт l_1 , шахта им. Челюскинцев	0,72	0,81
Уголь активированный АГН	1,32	1,42
Уголь активированный СКТ	1,60	1,90

Среди исследованных марок каменного угля наибольшие значения сорбционной способности получены для образцов газового и длиннопламенного газового угля, самая низкая сорбционная способность – для антрацита и коксового угля.

Следует отметить, что значения сорбционной емкости всех исследованных образцов каменного угля ниже значений активированных углей. В ходе экспериментов установлено, что наиболее активное поглощение бензола образцами угля происходит довольно быстро и одинаково длится в течение первых 15 мин насыщения бензолом, а затем этот процесс резко замедляется (см. табл. 1).

Учитывая, что большинство химически опасных веществ, при нормальных условиях окружающей среды, представляют собой легколетучие жидкости и при аварийных проливах легко образуют вторичное облако, необходимо было изучить предельную сорбционную емкость углей по парам бензола.

Предельную сорбционную емкость углей определяли адсорбционным методом с использованием лабораторной установки по определению сорбции

твердых веществ и материалов, принцип действия которой основан на хроматографическом методе.

В динамических условиях эксперимента для каждой исследуемой марки угля получены интегральные кривые сорбции паров бензола (рис. 1).

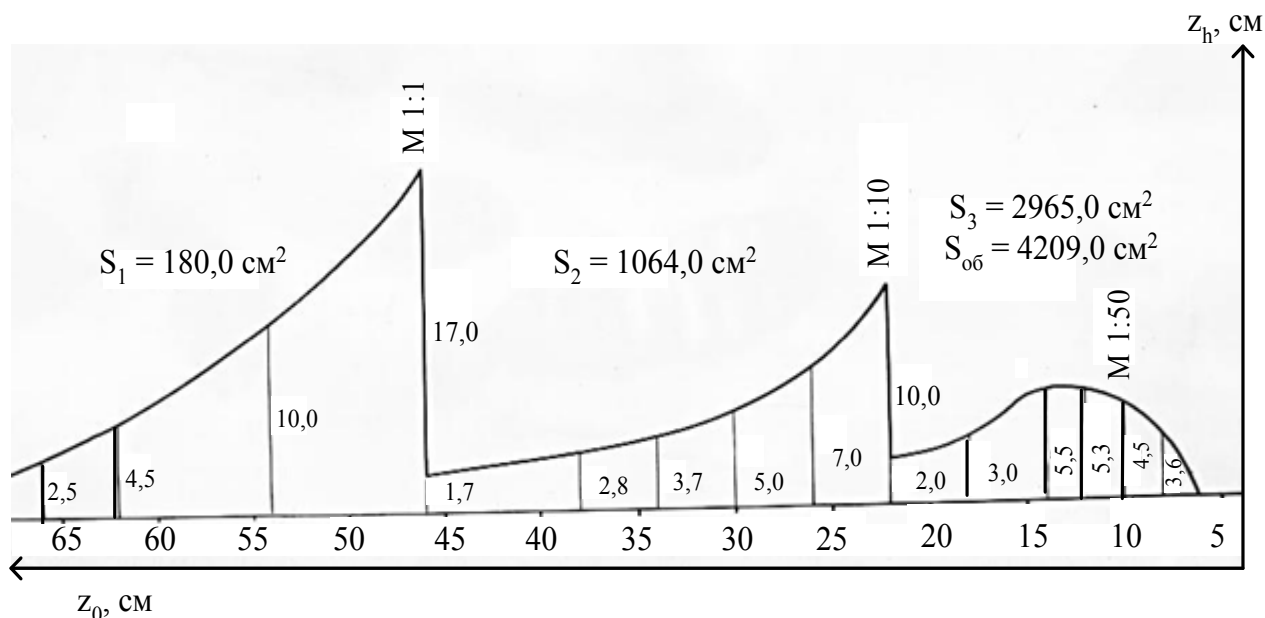


Рис. 1. Интегральная кривая сорбции паров бензола образца длиннопламенного газового угля

Математическую обработку интегральных кривых сорбции паров бензола проводили методом Глюкауфа исходя из материального баланса хроматографического процесса с допущением о мгновенном установлении сорбционного равновесия по следующей формуле (табл. 2):

$$A_{\text{дин}} = \frac{K\omega}{mq} \int_0^h (z_h - z_0) dh = \frac{K\omega}{mq} S_{\text{адс}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{дин}}$ – динамическая сорбционная емкость угля, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$;

K – калибровочная константа детектора, $\text{ммоль} \cdot \text{см}^{-4}$;

ω – объемная скорость газа-носителя, $\text{см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$;

m – масса навески угля, г;

q – скорость движения диаграммной ленты, $\text{см} \cdot \text{мин}^{-1}$;

$z_h - z_0$ – расстояние на диаграммной ленте потенциометра от момента выхода газа-носителя с определенной концентрацией бензола до соответствующего отклонения h , см;

h – отклонение пера потенциометра от нулевой линии, см;

$S_{\text{адс}} = \int_0^h (z_h - z_0) dh$ – площадь, определяемая на диаграммной ленте потенциометра между осью h и интегральной кривой сорбции бензола, см^2 .

Калибровочную константу детектора определяли, используя формулу

$$K = \frac{m_a q}{S_{\text{пика}} \omega}, \quad (3)$$

где m_a – количество введенного в колонку бензола, см³;

$S_{\text{пика}}$ – площадь пика под всей выходной интегральной кривой сорбции, вычисляемой методом трапеции, см².

После упрощения уравнения (2) подстановкой в него выражения (3) получили формулу расчета динамической сорбционной емкости угля:

$$A_{\text{дин}} = \frac{m_a S_{\text{адс}}}{m S_{\text{пика}}}. \quad (4)$$

Таблица 2

Данные эксперимента и расчета методом Глюкауфа

Абсолютная температура воздуха T , К	Объем бензола, введенного в колонку m_a , см ³	Площадь пика под всей выходной интегральной кривой $S_{\text{пика}}$, см ²	Калибровочная константа детектора $K \cdot 10^{-5}$, ммоль·см ⁻⁴	Динамическая сорбционная емкость угля $A_{\text{дин}} \cdot 10^{-3}$, см ³ ·г ⁻¹
Уголь марки Т, пласт k_5 , шахта № 22 «Коммунарская»				
296,2	0,004	173,063	0,3849	1,895
Уголь марки Г, пласт l_6 , шахта «Белореченская»				
295,2	0,004	232,749	0,2919	3,392
Уголь марки К, пласт l_1^B , шахта «Щегловская-Глубокая»				
301,2	0,004	547,940	0,3614	2,072
Уголь марки ДГ, пласт l_1 , шахта им. Челюскинцев				
300,2	0,004	776,378	0,2592	3,25
Уголь марки ЖК, шахта им. А.А. Скочинского				
301,2	0,003	345,877	0,4279	1,611
Уголь марки А, шахта «Прогресс»				
299,2	0,002	237,751	0,4223	0,782
Активированный уголь марки СКТ (образец сравнения)				
296,2	0,071	3708,812	0,3210	117,3
Активированный уголь марки АГН (образец сравнения)				
303,2	0,071	3004,625	0,3876	98,737

Наибольшие значения динамической сорбционной емкости по бензолу получены для газового и длиннопламенного газового угля (см. табл. 2). Значения динамической сорбционной емкости исследуемых марок каменного угля по парам бензола необходимы для расчета их предельной сорбционной емкости.

На основе экспериментальных данных в координатах линейной формы уравнения Дубинина-Радужкевича для всех исследуемых образцов угля построены графики сорбции паров бензола, которые представляют собой

зависимости динамической сорбционной емкости от относительного давления паров бензола в координатах $\lg A_{\text{дин}} - [\lg (P_s/P)]^2$ при постоянной температуре, где P_s – давление насыщенных паров бензола, Па;

P – давление равновесных паров бензола, Па.

Характер представленных зависимостей (рис. 2) идентичен – логарифм сорбционной емкости в области изменения относительного давления линейно уменьшается с ростом отношения давления насыщенных паров бензола P_s к давлению равновесных паров бензола P для каждого исследуемого материала.

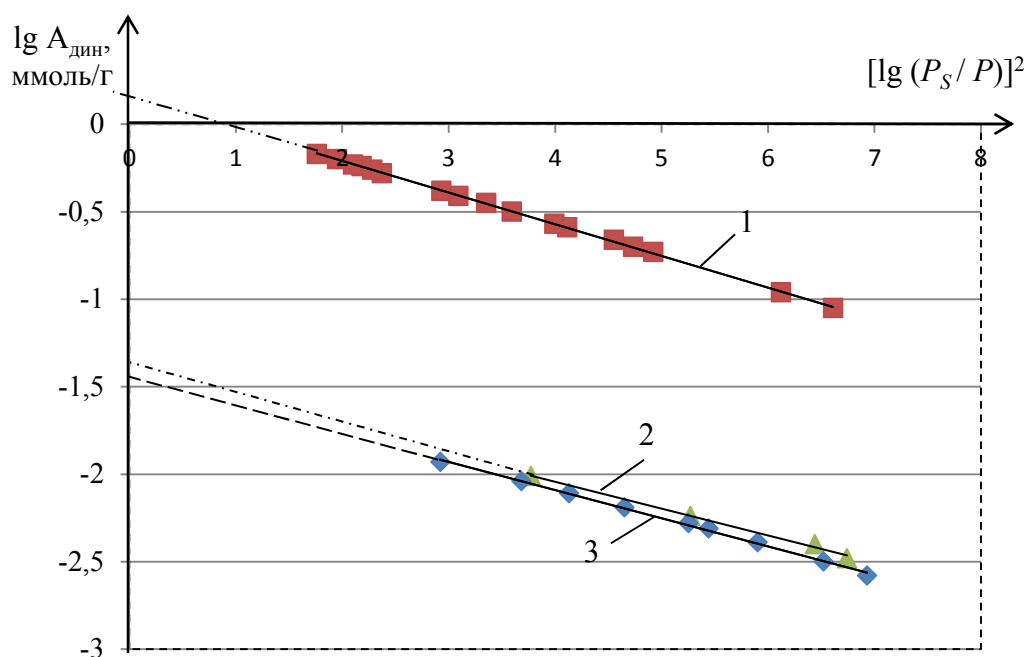


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости от относительного давления паров бензола для материалов:

1 – активированный уголь СКТ; 2 – уголь марки Г; 3 – уголь марки ДГ

Полученные результаты подтверждают положение о том, что предельная сорбция является функцией давления [10]. Для сравнительной оценки сорбционной способности образцов каменного угля на основе экспериментальных данных и графиков сорбции паров бензола (см. рис. 2) рассчитали предельную сорбционную емкость материалов, используя формулу [10]

$$A_{\text{дин}} = \frac{W_0}{V_{\text{мол}}} \exp^{-b(\lg P_s/P)^2}, \quad (5)$$

где $A_{\text{дин}}$ – динамическая сорбционная емкость, моль·г⁻¹;

W_0 – предельная сорбционная емкость, см³·г⁻¹;

$V_{\text{мол}}$ – мольный объем бензола, см³·моль⁻¹;

b – угловой коэффициент, который представляет собой отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат (см. рис. 2).

Для расчета предельной сорбционной емкости после логарифмирования уравнения (5) получили формулу следующего вида:

$$\lg a_{\text{дин}} = \lg \frac{W_0}{V_{\text{мол}}} - b \left(\lg P_s / P \right)^2. \quad (6)$$

Коэффициент b в формулах (5) и (6) равен

$$b = \lg \frac{W_0}{V_{\text{мол}}}. \quad (7)$$

После экстраполяции графиков зависимости сорбционной емкости от относительного давления паров бензола, зная угловой коэффициент и объем 1 моль бензола, используя формулу (7), вычислили значение предельной сорбционной емкости для каждого исследуемого материала (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета предельной сорбционной емкости

Марка угля	Угловой коэффициент b	Предельная сорбционная емкость $W_0 \cdot 10^{-3}$, см ³ ·г ⁻¹
Уголь марки А	-2,03	0,929
Уголь марки ЖК	-1,73	1,884
Уголь марки Т	-1,65	2,241
Уголь марки К	-1,62	2,426
Уголь марки ДГ	-1,45	3,530
Уголь марки Г	-1,43	3,645
Уголь активированный АГН	0,05	113,85
Уголь активированный СКТ	0,15	140,21

Адсорбционный метод позволил определить значения предельной сорбционной емкости каменных углей различной степени метаморфизма в динамических условиях эксперимента.

Вывод. Результаты исследований показали возможность и целесообразность практического использования газового и длиннопламенного газового углей, обладающих наибольшими значениями сорбционной емкости по бензолу, в качестве сырья для получения экономически выгодных природных сорбентов и применения их при ликвидации последствий масштабных аварийных проливов опасных веществ на химически опасных объектах и транспорте.

Список литературы / References

1. Байбурдов, Т.А. Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоемов: обзор русскоязычной литературы за 2000–2017 гг. (часть 3) / Т.А. Байбурдов, А.Б. Шиповская // Изв. Сарат. ун-та. Сер. Химия.

Биология. Экология. – 2018. – № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/polimernye-sorbenty-dlya-sbora-nefteproduktov-s-poverhnosti-vodoyemov-obzor-russkoyazychnoy-literatury-za-2000-2017-gg-chast-3> (дата обращения: 14.04.2020).

Bayburdov, T.A., Shipovskaya, A.B. *Polimernyye sorbenty dlya sbora nefteproduktov s poverkhnosti vodoyemov: obzor russkoyazychnoy literatury za 2000-2017 gg. (chast' 3)* [Polymeric sorbents for collection of oil products from the surface of water bodies: review of the Russian-language literature of the years 2000–2017 (part 3)]. *Izv. Sarat. un-ta. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya*. [Proceedings of the Saratov university. Series: Chemistry. Biology. Ecology], 2018 no. 3 [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/polimernye-sorbenty-dlya-sbora-nefteproduktov-s-poverhnosti-vodoyemov-obzor-russkoyazychnoy-literatury-za-2000-2017-gg-chast-3> (accessed: 14.04.2020).

2. Компанцев, Д.В. Определение сорбционной способности различных сорбентов по отношению к 5-оксиметилфурфурулу и родственными соединениям / Д.В. Компанцев, Э.Ф. Степанова, Л.П. Мыкоц и др. // Научные ведомости. Медицина. Фармация. – 2012. – № 10 (129), вып. 18/3. – С. 34 – 39.

Kompantsev, D.V., Stepanova, E.F., Mykots, L.P. et al. *Opredeleniye sorbtionnoy sposobnosti razlichnykh sorbentov po otnosheniyu k 5-oksimetilfurfuroly i rodstvennyy soyedineniyam* [Determination of the sorption capacity of various sorbents by relation to 5-(hydroxymetyl)furfurol and related compounds]. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Meditsina. Farmatsiya* [Belgorod State University Scientific bulletin. Medicine. Pharmacy], 2012, no. 10(29), issue 18/3, pp. 34 – 39.

3. Сорбционная способность природных сорбентов / С.В. Беленова, В.И. Вигдорович, Н.В. Шель и др. // Вестник ТГУ. – 2015. – Т. 20, вып. 2. – С. 388 – 396.

Belenova, S.V., Vigdorovich, V.I., Shel', N.V. et al. *Sorbtsionnaya sposobnost' prirodnikh sorbentov* [Sorption capacity of natural sorbents]. *Vestnik TGU* [Bulletin of the TGU], 2015, vol. 20, issue 2, pp. 388 – 396.

4. Термодинамика сорбции токсичных компонентов органической природы из растворов на твердых сорбентах / Ф.Т. Махмудов, М.А. Рагимли, С.А. Алиева и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 338 – 345.

Makhmudov, F.T., Ragimli, M.A., Aliyeva, S.A. et al. *Termodinamika sorbtсии toksichnykh komponentov organicheskoy prirody iz rastvorov na tvyerdykh sorbentakh* [Thermodynamics of sorption of toxic components of organic nature from solutions based on solid sorbents]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2018, vol. 18, no. 13, pp. 338 – 345.

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

Thu Aung Si, Myint Saw, Klushin, V.N., Nistratov, A.V. et al. *Issledovaniye poristoy struktury aktivnogo uglya iz risovoy shelukhi* [Investigation of the porous

structure of activated carbon from rice husks]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 102 – 109.

6. Сорока, М.Л. Применение текстильных отходов в качестве сорбентов для ликвидации разливов нефтепродуктов на транспорте / М.Л. Сорока, Л.А. Ярышкина // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 31. – С. 129 – 135.

Soroka, M.L., Yaryshkina, L.A. *Primeneniye tekstil'nykh otkhodov v kachestve sorbentov dlya likvidatsii razlivov nefteproduktov na transporte* [Use of textile waste as sorbates for elimination of oil products spillage in transport]. *Avtomobil'nyy transport – Automobile transport*, 2012, issue 31, pp. 129 – 135.

7. Применение сорбентов природного происхождения / И.Н. Меркотун, Е.В. Соколова, Р.А. Магомедов, А.А. Филимонов, А.Ю. Даржания // ИВД. – 2017. – № 4 (47) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sorbentov-prirodnogo-proishozhdeniya> (дата обращения: 09.04.2020).

Merkotun, I.N., Sokolova, Ye.V., Magomedov, R.A., Filimonov, A.A., Darzhaniya, A.Yu. *Primeneniye sorbentov prirodnogo proiskhozhdeniya* [Application of sorbents of natural origin]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [The Don Engineering Bulletin], 2017, no. 4(47) [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-sorbentov-prirodnogo-proishozhdeniya> (accessed: 09.04.2020).

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

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

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

Agarkov, An.V., Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Shcherbakova, O.N. *Sposobnost' poristyykh materialov pogloshchat' avariyno khimicheski opasnyye veshchestva* [Sorption capacity of porous materials to absorb chemically hazardous substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific and technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 94 – 99.

10. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия [Электронный ресурс]. URL: <https://eknigi.org/tehnika/98437-osnovy-adsorbtsionnoj-tehniki.html> (дата обращения: 09.04.2020).

Kel'tsev, N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Principles of the adsorption technology]. Moscow, Khimiya Publ. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://eknigi.org/tehnika/98437-osnovy-adsorbtsionnoj-tehniki.html> (accessed: 09.04.2020).

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

Andrey Viktorovich Agarkov, applicant; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

Aleksey Andreyevich Kozlitsin, head of department; e-mail: kozlitsin1942@mail.ru;

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

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

NATURAL SORBENTS FOR ABSORPTION OF CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES

Purpose. Comparative investigations of the sorption capacity of black coal of the Donets basin, evaluation of possibility of their application as sorption materials during elimination of consequences of emergency spillages of chemically hazardous substances.

Methods. Determination of the sorption capacity of black coal ranks by express and prolonged gravimetric methods in static conditions of the experiment. The adsorption method of determination of the maximum sorption capacity of the materials. Mathematical processing of the experimental data by the Glueckauf method.

Results. The sorption of benzene by the Donets region black coal of various ranks, i.e. hard coal, gas and long flaming coal, coking coal, fat coking and lean coal, has been investigated. The sorption capacity values of the black coal samples in the static conditions of the experiment have been determined. The integral curves of benzene fume sorption have been obtained by the adsorption method, the maximum sorption capacity of black coal samples has been determined. It has been stated that the gas and long flaming coal possess the best sorption properties among the investigated ranks of black coal.

Scientific novelty. For the first time for the hard coal of the various metamorphic grade the sorption capacity values of benzene, i.e. one of the chemically hazardous substances in the static and dynamic conditions of the experiment, have been obtained.

Practical value. The investigation of the sorption capacity of black coal of different ranks allows accumulating the base of experimental and calculated characteristics that may be used in the development of natural sorbents. The perspectiveness of the practical use of gas and long flaming gas coal as a raw material for production of low-price and obtainable natural sorbents has been shown, the application of which will permit to eliminate timely and effectively the negative consequences of accidents caused by spillages of the chemically hazardous substances and thereby to improve the environmental safety. The utilization of local resources will expand the raw material base for producing the natural sorbents and reduce their cost due to the use of the available materials.

Keywords: *emergency spillage; adsorption method; benzene; gas coal; gravimetric method; long flaming coal; sorption capacity; environmental safety.*

УДК [614.844.2:62-181.4]:[522.525.2:001.891.572]

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора (по научной работе);

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

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

Николай Александрович Галухин, 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; 332-78-38

Виталий Леонидович Ефименко, ассистент; e-mail: lydaefim81@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел. (+38 062) 304-43-76

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОГО УСТРОЙСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Цель. Разработка математической модели динамических процессов, сопровождающих формирование импульса в стволе пожаротушающего устройства.

Методы. Теоретические методы с использованием термодинамических уравнений при переменной массе газа и уравнений технической гидромеханики.

Научная новизна. Получена математическая модель динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения, описывающая процесс импульсного формирования потока жидкости на срезе насадка пожаротушающего устройства, отличающаяся тем, что учтено влияние инерционных потерь давления и местного сопротивления при внезапном сужении насадка.

Практическая значимость. Использование предложенной математической модели позволяет на этапе проектирования импульсного пожаротушающего устройства определить влияние конструктивных параметров на основные характеристики: скорость струи, расход жидкости, расход газа, время импульса, реактивную силу и другие.

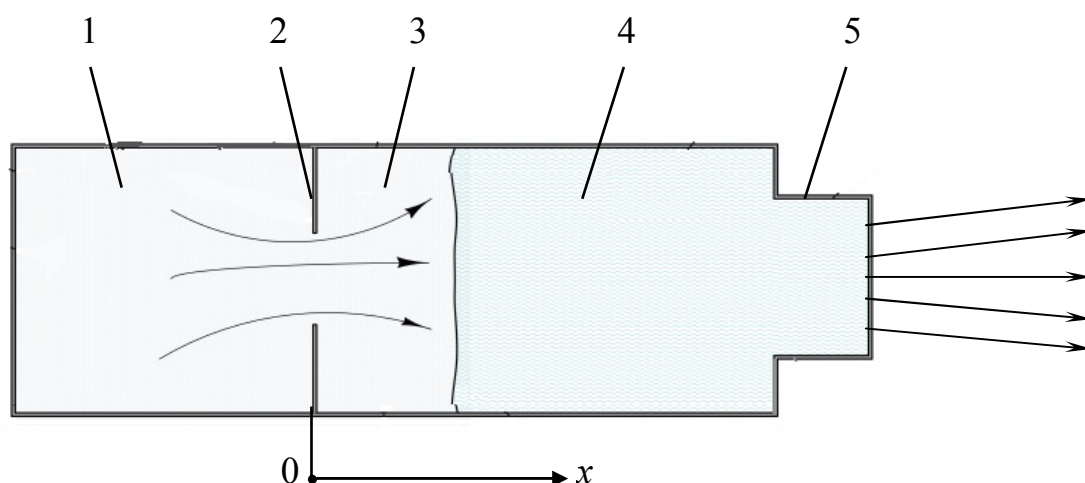
Ключевые слова: пожаротушающее устройство; импульс; динамические процессы; ствол; дифференциальные уравнения.

Постановка проблемы. Эффективность тушения пожара во многом зависит от оперативности разворачивания сил и средств пожарных расчетов. Требованиям оперативности применения в наибольшей степени соответствуют ранцевые устройства пожаротушения и, в частности, импульсные устройства пожаротушения. Быстрое реагирование и оперативное прибытие пожарных расчетов, снабженных индивидуальными переносными устройствами пожаротушения, обеспечивают наиболее эффективные условия тушения пожара – в его начальной стадии, а импульсная технология мелкодисперсного распыления воды и ее высокоскоростная доставка с большой кинетической энергией в очаг пожара повышают эффективность тушения пожара и сокращают ущерб от последствий его тушения [1]. Поэтому импульсные устройства пожаротушения – достаточно мощные средства борьбы с огнем и позволяют ликвидировать пожар на площади несколько десятков квадратных метров. В связи с этим актуально раскрытие закономерностей формирования динамических процессов в импульсных пожаротушающих устройствах.

Анализ последних исследований. В установке импульсного водяного пожаротушения, включающей баллон, буферную емкость, ствол, обратный клапан, пневмоклапан и регулятор давления, ошибочно определено отношение объема буферной емкости к конечному объему газа, что приводит к неправильному выводу о несоответствии установки требованиям, предъявляемым к габаритам средств пожаротушения для шахтных условий. В работе [2] исследованы динамические процессы в стволе импульсного устройства пожаротушения. Получено дифференциальное уравнение движения жидкости на основе уравнения И.В. Мещерского для тела с переменной массой и реактивной силой. Недостаток работы состоит в том, что не учтены влияние потерь давления на сообщение ускорения жидкости. В работе [3] динамические процессы при истечении жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения описаны на основе уравнения Бернулли. Получены характеристики струи без учета влияния сопротивления клапана на истечение газа, что упростило вывод уравнений.

Цель работы – создание математической модели динамических процессов, сопровождающих формирование импульса в стволе пожаротушающего устройства.

Изложение основного материала исследований. Ствол импульсного устройства пожаротушения представляет собой (см. рисунок) полый цилиндр, внутри которого расположены разобщенные клапаном газовая и жидкостная полости. Со стороны жидкостной полости расположен цилиндрический насадок. При выстреле пожаротушащим зарядом клапан мгновенно открывается и газ из газовой полости вытесняет жидкость из жидкостной полости через насадок. При этом за клапаном образуется газовая полость переменного объема, которая постоянно увеличивается за счет уменьшения объема жидкости до ее полного вытеснения из ствола.



Ствол импульсного устройства пожаротушения:

- 1 – газовая полость; 2 – клапан; 3 – газовая полость переменного объема;
4 – жидкостная полость; 5 – насадок

При разработке математической модели динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения приняты следующие допущения:

- влиянием изменения площади сечения клапана при его открывании на динамические процессы пренебрегаем ввиду быстроты открывания клапана;
- граница раздела фаз (газа и жидкости) – плоская (скорость течения жидкости по сечению ствола одинакова);
- термодинамические процессы в газовых полостях ствола происходят без теплообмена (за счет большой скорости вытеснения жидкости), т.е. адиабатические с показателем адиабаты $k = 1,4$;
- стенки ствола абсолютно жесткие.

Работа ствола импульсного устройства пожаротушения связана с периодическим наполнением и опорожнением сжатым воздухом полостей постоянного и переменного объема, причем массовое количество воздуха в полостях непрерывно меняется. Из-за этого закономерности, связывающие между собой параметры состояния воздуха в ходе термодинамических процессов, нарушаются. Поэтому газовые процессы в полостях с переменной массой газа наиболее точно описываются уравнением адиабат в дифференциальной форме, полученным на основе уравнения энергетического баланса (уравнения сохранения энергии).

Запишем уравнение адиабаты в дифференциальной форме для газовых полостей. Опорожняющаяся газовая полость ($v_1 = \text{const}$) описана уравнением адиабаты в дифференциальной форме:

$$\frac{dp_1}{d\tau} = -kp_1 \frac{1}{m_1} \frac{dm_1}{d\tau}, \quad (1)$$

где p_1 – давление в газовой полости, Па;

m_1 – масса газа в газовой полости, кг.

Для наполняющейся газовой полости переменного объема уравнение адиабаты в дифференциальной форме запишем в виде

$$\frac{dp_2}{d\tau} = kp_2 \left(\frac{1}{m_2} \frac{dm_2}{d\tau} - \frac{1}{v_2} \frac{dv_2}{d\tau} \right), \quad (2)$$

где p_2 – давление в газовой полости переменного объема, Па;

m_2 – масса газа в газовой полости переменного объема, кг;

v_2 – переменный объем газовой полости, м³.

Связь между термодинамическими параметрами уравнений (1) и (2) найдем, используя уравнение Сен-Венана и Ванцеля для подкритического истечения газа через проходное сечение клапана:

$$\frac{dm_1}{d\tau} = -\mu_1 f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{m_1}{v_1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

где μ_1 – коэффициент расхода клапана (справочное значение);

f – площадь сечения клапана, м^2 .

Очевидно, что для массовых расходов газа, перетекающего из газовой полости постоянного объема в газовую полость переменного объема, справедливо соотношение

$$\frac{dm_1}{d\tau} = -\frac{dm_2}{d\tau}. \quad (4)$$

Насадок ствола считаем малым отверстием с тонкой стенкой, для которого справедливо уравнение объемного расхода жидкости Q , $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p},$$

где μ – коэффициент расхода насадка;

S – площадь сечения насадка, м^2 ;

ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Δp – перепад давления на насадке, Па.

На основании закона неразрывности потока можно записать, что объемный расход газа в полости переменного объема равен объемному расходу жидкости через насадок:

$$\frac{dv_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}. \quad (5)$$

Перепад давления Δp находим по формуле

$$\Delta p = p_2 - \Delta p_c - \Delta p_{\text{и}} - p_a,$$

где Δp_c – потери давления на местном сопротивлении при переходе от ствола к насадку, Па;

$\Delta p_{\text{и}}$ – потери давления на преодоление силы инерции жидкости, Па;

p_a – давление окружающей среды, Па.

Потери давления на местном сопротивлении равны

$$\Delta p_c = \zeta \left(1 - \frac{S}{A} \right) \frac{\rho v_{\text{н}}^2}{2}, \quad (6)$$

где ζ – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения площадей ствола и насадка (справочное значение);

A – площадь сечения ствола, м^2 ;

v_n – скорость жидкости в насадке, м/с .

Инерционные потери давления в стволе найдем по формуле

$$\Delta p_{\text{и}} = \rho(l_{\text{ж}} - x) \frac{du}{d\tau}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ж}}$ – длина жидкостной полости, м ;

u – скорость жидкости в стволе, м/с ;

x – координата перемещения жидкости, м .

Скорость жидкости в стволе находим из уравнения неразрывности потока

$$\frac{dv_2}{d\tau} = -uA, \text{ откуда}$$

$$u = -\frac{1}{A} \frac{dv_2}{d\tau}. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в формулу (7), получаем

$$\Delta p_{\text{и}} = -\rho \frac{l_{\text{ж}} - x}{A} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2}.$$

Ввиду того, что $x = v_2/A$, имеем

$$\Delta p_{\text{и}} = -\rho \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2}.$$

Квадрат скорости v_n^2 жидкости в насадке, входящей в формулу (6), определим следующим образом. Скорость v_n найдем из уравнения

$$v_n = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_2 - \Delta p_{\text{и}} - \Delta p_{\text{с}} - p_{\text{а}}},$$

где φ – коэффициент скорости струи в насадке.

Подставляем найденные выражения для $\Delta p_{\text{с}}$ и $\Delta p_{\text{и}}$ в формулу для v_n , получаем

$$v_n = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_2 + \rho \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - \zeta \left(1 - \frac{S}{A}\right) \frac{\rho}{2} v_n^2 - p_{\text{а}}}.$$

Возводим обе части полученного уравнения в квадрат и решаем уравнение относительно v_H^2 :

$$v_H^2 = \frac{2\varphi^2}{1 + \varphi^2 \zeta \left(1 - \frac{S}{A}\right)} \left(\frac{1}{\rho} P_2 + \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - \frac{1}{\rho} P_a \right). \quad (9)$$

Таким образом, уравнение (5) в развернутом виде:

$$\frac{dv_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_2 - \zeta \left(1 - \frac{S}{A}\right) \frac{\rho v_H^2}{2} + \rho \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - P_a}. \quad (10)$$

Объединяя уравнения (1) – (4), (9), (10), получаем систему дифференциальных уравнений, замкнутую относительно переменных p_1, p_2, m_1, m_2, v_2 :

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{d\tau} = -kp_1 \frac{1}{m_1} \frac{dm_1}{d\tau}; \\ \frac{dp_2}{d\tau} = kp_2 \left(\frac{1}{m_2} \frac{dm_2}{d\tau} - \frac{1}{v_2} \frac{dv_2}{d\tau} \right); \\ \frac{dm_2}{d\tau} = -\mu f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{m_1}{v_1}} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]; \\ \frac{dm_1}{d\tau} = -\frac{dm_2}{d\tau}; \\ v_H^2 = \frac{2\varphi^2}{1 + \varphi^2 \zeta \left(1 - \frac{S}{A}\right)} \left(\frac{1}{\rho} p_2 + \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - \frac{1}{\rho} p_a \right); \\ \frac{dv_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_2 - \zeta \left(1 - \frac{S}{A}\right) \frac{\rho v_H^2}{2} + \rho \frac{Al_{\text{ж}} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - p_a}. \end{cases} \quad (11)$$

Начальные условия системы (11) $p_1(0) = p_{10}$; $p_2(0) = p_{20}$; $m_2(0) = m_{20}$; $v_2(0) = v_{20}$; $v_2'(0) = v_{21}$. Начальное значение массы газа $m_1(0)$ в полости постоянного объема найдем, используя уравнение состояния идеального газа:

$$m_1(0) = \frac{p_1(0)v_1}{RT},$$

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

T – температура газа, К.

Численные значения начальных условий могут принимать, например, следующие значения: $p_{10} = 2,6$ МПа; $p_{20} = 0$; $m_1(0) = 0,0257$ кг; $m_{20} = 0$; $v_{20} = 0$; $v_{21} = 0$.

Время импульса $\tau_{\text{и}}$ находим при условии опорожнения жидкостной полости (заполнения ее вытесняемым газом), т.е. при условии $v_2(\tau_{\text{и}}) = v_{\text{ж}}$, где $v_{\text{ж}}$ – объем жидкостной полости, м³.

В результате решения системы (11) также получаем: массовый расход газа $\frac{dm_2}{d\tau}$, объемный расход жидкости на срезе насадка $\frac{dv_2}{d\tau}$, скорость струи на

срезе насадка $v_{\text{н}}$. Реактивную силу струи R , Н, находим по формуле $R = v_{\text{н}} \frac{dm_2}{d\tau}$,

а ее среднее значение за время импульса $\tau_{\text{и}}$ равно

$$\bar{R} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} v_{\text{н}} \frac{dm_2}{d\tau} d\tau = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} v_{\text{н}} dm_2.$$

Выводы. Разработанная математическая модель динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения учитывает влияние потерь на ускорение пожаротушающей жидкости и местное сопротивление при переходе от ствола к насадку, а также устанавливает взаимосвязь конструктивных и газодинамических параметров для научного обоснования технических требований при проектировании устройства, получения расчетных параметров для сравнения с аналогичными ранцевыми устройствами пожаротушения, функционирующими на основе других принципов работы, и выбора направления научной работы.

Список литературы / References

1. Пахомов, Г.Б. Новейшая технология пожаротушения тонкораспыленной водой. Характеристики устройств и перспективы развития / Г.Б. Пахомов // Мир и безопасность. – 2008. – № 3. – С. 24 – 29.

Pakhomov, G.B. *Noveyshaya tekhnologiya pozharotusheniya tonkoraspylyennoy vody* [The newest technology of the fire-extinguishing with the fine-dispersed water. Characteristics of devices and trends]. *Mir i bezopasnost' – World and safety*, 2008, no. 3, pp. 24–29.

2. Богомаз, А.М. Динамические процессы в стволе импульсного устройства пожаротушения / А.М. Богомаз, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 3(54). – С. 16 – 25.

Bogomaz, A.M., Peftibay, G.I., Galukhin, N.A. *Dinamicheskiye protsessy v stvole impul'snogo ustroystva pozharotusheniya* [Dynamic processes in a nozzle of a pulse fire-extinguishing device]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2017, no. 3(54), pp. 16–25.

3. Дмитриченко, А.С. Характеристики импульсного истечения жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения / А.С. Дмитриченко, А.Г. Иваницкий // Вестник Командно-инженер. ин-та МЧС Республики Беларусь. – 2005. – № 1. – С. 80 – 87.

Dmitrichenko, A.S., Ivanitskiy, A.G. *Kharakteristiki impul'snogo istecheniya zhidkosti iz stvola ustanovki impul'snogo pozharotusheniya* [Characteristics of the pulse liquid outflow out of a nozzle of a pulse fire-extinguishing installation]. *Vest. Komandno-inzhener. in-ta MChS Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Command Control Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations (Belarus)], 2005, no. 1, pp. 80–87.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 28.07.2020

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

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

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

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, 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. Phones: (+38 062)332-78-36, 332-78-38;

Vitaly Leonidovich Yefimenko, lecturer; e-mail: Lydaefim81@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Professional Education "The Civil Defence Academy"

of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters

of Donetsk People's Republic;

283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+38 062)304-43-76

THE MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC PROCESSES OF A PULSE FIRE-EXTINGUISHING DEVICE

Purpose. Development of the mathematical model of the dynamic processes accompanying the pulse forming in a nozzle of the fire-extinguishing device.

Methods. Theoretical methods with the application of thermodynamic equations with the variable gas mass and of technological hydromechanics equations.

Scientific novelty. The mathematical model of the dynamic processes in the nozzle of the pulse fire-extinguishing device has been obtained describing the process of the pulse forming of the liquid flow at the nozzle cut of the fire-extinguishing device that distinguishes itself by taking into account the influence of inertial pressure losses and local resistance by the abrupt contraction of the nozzle.

Practical value. The application of the proposed mathematical model allows determining the influence of design parameters on principal characteristics, i.e. jet velocity, liquid consumption, gas consumption, pulse time, reactive force etc., at the designing stage.

Keywords: *fire-extinguishing device; pulse; dynamic processes; nozzle; differential equations.*

УДК 622.822.22:001.891.572

Святослав Павлович Греков, гл. науч. сотр.; e-mail: niigd@mail.ru;

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-79-07*

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОНАГРЕВАНИЯ УГЛЯ

Цель. Анализ имеющихся математических моделей низкотемпературного окисления угля и входящих в них параметров и разработка упрощенной модели самонагрева угля и ее аналитического решения для расчетов температуры.

Методика. Математическое моделирование гетерогенного процесса хемосорбции кислорода по различным методикам и обоснование применения упрощенного метода расчета динамики температуры самонагрева угля.

Результаты. Для различных горно-геологических характеристик шахт Донбасса и условий разработки пластов по рассмотренным методикам выполнены расчеты динамики температуры самонагрева углей с учетом минимального пожароопасного объема скопления. Обоснована предложенная математическая модель самонагрева и разработан упрощенный метод расчета температуры угля.

Научная новизна. Полученная аналитическая зависимость позволяет исследовать динамику температуры в очаге самонагрева с учетом притока теплоты, образующейся в результате реакции окисления, и теплоотдачи, связанной с выделением метана в окружающую среду.

Практическая значимость. Результаты работы позволят прогнозировать безопасные условия разработки пластов на угледобывающих предприятиях и предупредить самовозгорание угля.

Ключевые слова: *очаговое самонагревание угля; низкотемпературное окисление; реакционная поверхность; тепловой взрыв; тепловыделение и теплоотдача.*

Состояние вопроса и постановка задачи исследования. Самовозгорание угля – это процесс, связанный с условиями накопления и рассеивания теплоты в его скоплении. В работах В.С. Веселовского, А.С. Скочинского, В.Ф. Орешко, опубликованных в 60-е годы прошлого столетия, сформулированы условия, приводящие к эндогенному возгоранию угля. Приведены выражения для определения критической толщины скопления [1], пожароопасной скорости фильтрации воздуха и инкубационного периода самовозгорания [2].

Разработано несколько моделей низкотемпературного окисления углей и их самовозгорания. Так, в работе [3] рассмотрены совместно тепловая и диффузионная задачи самонагрева угля, предполагая известными функциональные зависимости плотности источников и стоков температуры и концентрации веществ. Сформулирована физическая и адекватная математическая модель процесса в слое угля различной толщины и предложен способ численно-аналитического решения задачи. Математическим моделированием процесса самонагрева угля с различными входящими в него параметрами, характеризующими выделение теплоты и ее унос, получено выражение для расчета температуры в угольном скоплении в виде

$$T = T_0 + 1,1 \cdot 10^{11} q k \alpha^{-0,64} \nu^{1,4} \beta^{0,13} \tau^{3,2h} W^{-0,25}, \quad (1)$$

где T_0 – начальная температура угля, К;
 q – теплота реакции окисления угля, Дж/моль;
 k – константа скорости окисления угля, м³/(с·моль);
 α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);
 ν – скорость утечек воздуха через угольное скопление, м/с;
 β – коэффициент массоотдачи, м/с;
 τ – время, сут;
 h – толщина скопления угля, м;
 W – влажность угля, моль/м³.

Недостаток этой модели – не учитывается изменение концентрации кислорода в газовой фазе со времени начала окисления угля, что в ряде случаев может существенно отразиться на результатах расчетов.

В работе [4] для описания теплообменных процессов в двухфазных средах впервые учтена роль газоотдающей поверхности углей и использована система параболических дифференциальных уравнений переноса любой субстанции (теплоты, влаги и пр.). Приведены уравнения для концентрации кислорода в газовой и твердой фазе с учетом истечения из угля метана, который препятствует проникновению окислителя в поры сорбента. Получено аналогичное уравнение для изменения температуры угля.

Решение поставленной задачи самонагрева угля показало, что переходные тепловые процессы в твердой фазе протекают значительно медленнее, чем тепло- и массообменные в газовой среде. Поэтому такие процессы в газовой среде можно считать квазистационарными, что в дальнейшем должно быть учтено при расчетах процессов самонагрева углей. Расчетами, выполненными на конкретных примерах, показано, что учет метановыделения из угля может играть существенную роль при определении времени достижения им критической температуры самовозгорания. Однако недостаток полученного решения – сложность расчетов.

С учетом полученных результатов сформулирована задача и найдено ее аналитическое решение исходя из совместного рассмотрения уравнений адсорбции и теплопроводности. При этом для линеаризации уравнения теплопроводности вместо экспоненциальной функции реакции окисления углерода принята линейная и показана возможность определения температуры в диапазоне 300...400 К, что особенно интересно при низкотемпературном окислении углей.

Д-ром физ.-мат. наук А.А. Березовским с соавторами сформулирована математическая модель самонагрева угля с учетом влияния испарения влаги. Математическим моделированием процесса окисления угля установлено незначительное изменение во времени ряда параметров, которые могут быть приняты постоянными. Это позволило упростить задачу и представить ее аналитическое решение [2] в виде

$$\tau = \int_{v_0}^v \psi^{-1}(v) dv; \quad v > v_0, \quad (2)$$

$$\text{где } \psi^{-1}(v) = 1 - v + \frac{f_v}{\tilde{v} + \exp(\delta_1/v)} - f_s \exp \left[-\delta(v - 1) - \frac{\delta_2}{v} \right]; \quad (3)$$

$f_v, f_s, \tilde{v}, \delta_1, \delta_2$ – безразмерные постоянные величины, объединяющие теплофизические и диффузионные характеристики, а также параметры кинетики реакции окисления угля.

Достоинство приведенного решения – его аналитический вид, а недостаток – сложность вычисления адсорбции и теплопроводности.

В дальнейшем НИИГД была предложена модель самовозгорания угля на основе уравнений неизотермической кинетики хемосорбции газов микропористыми сорбентами [2] и получено решение задачи в аналитическом виде. Выражения для концентрации кислорода в адсорбированном слое и температуры угля получены в виде

$$C_{O_2} = \gamma C_{ст} \frac{1 - \exp \left(-\frac{\mu_d^2 Fo_d}{1 + \gamma} \right)}{1 + (\Gamma_d / \mu_d^2)}, \quad (4)$$

$$T = T_0 \left\{ 1 + \frac{1 - [\exp(\Gamma_T Fo) - \Gamma_v]}{\Gamma_v} \right\}, \quad (5)$$

где γ – константа Генри;

$C_{ст}$ – концентрация кислорода на границе газ – твердое тело, моль/м³;

μ_d^2 – параметр, зависящий от критерия Био;

Fo_d – диффузионный критерий Фурье;

Γ_d – диффузионный критерий скорости химической реакции;

T_0 – начальная температура угля, К;

Γ_T – комплексный критерий генерации и отвода теплоты;

Fo – критерий Фурье, равный $Fo = a\tau/R_3^2$;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

R_3 – радиус эквивалентной сферы скопления угля, м, который рассчитывают по формуле $R_3 = 3V/S_{п}$;

V – объем скопления, м³;

$S_{п}$ – площадь внешней поверхности скопления, м².

Анализ приведенных моделей самонагревания угля показал, что для узкого диапазона температуры (от начальной до критической температуры самовозгорания) можно упростить уравнение, описывающее окислительный процесс, и получить решение, пригодное для инженерных расчетов. Такой подход использован в работе [5], содержащей уравнение с известными параметрами:

$$\rho c_V \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha_{п}}{s} (T_c - T) + w, \quad (6)$$

где ρ – плотность газа, кг/м^3 ;

c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

T – температура в очаге пожара, К ;

T_0 – температура до пожара, К ;

T_c – температура пород, окружающих скопление угля, К ;

τ – время, с ;

u – скорость движения воздуха, м/с ;

l – длина зоны горения, м ;

α – коэффициент теплообмена между скоплением угля и окружающими его породами, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Π – периметр скопления угля, м ;

S – площадь поперечного сечения скопления угля, м^2 ;

w – интенсивность источника теплоты при горении, Вт/м^3 .

Однако представленная модель не учитывает стоки теплоты за счет дросселирования из угля метана и испарения влаги.

Цель работы – проанализировать имеющиеся математические модели низкотемпературного окисления углей, входящие в них тепловые и диффузионные параметры и их зависимость от температуры и времени и на этой основе предложить упрощенную модель самовозгорания углей и ее аналитическое решение, приемлемое для инженерных расчетов.

Результаты исследований. Анализ физико-химических процессов низкотемпературного окисления углей и расчета температур по приведенным выше математическим моделям позволил заключить следующее:

- максимальные значения температуры угля, рассчитанные по модели (1), наблюдаются на расстоянии $0,6 \dots 0,9$ м от места поступления кислорода;

- с достаточной для практических целей точностью возможно последовательное рассмотрение решения диффузионной и тепловой задачи самонагрева углей, ограничиваясь первым приближением уравнения адсорбции кислорода и принимая $T = T_0 = \text{const}$, а затем решая тепловое уравнение с найденным значением концентрации кислорода в твердой фазе;

- концентрация кислорода в межкусковом пространстве скопления угля, оставленного в выработанном пространстве, зависит от скорости подвигания линии очистного забоя, газоносности пласта и окружающих его пород, способа управления горным давлением;

- концентрация кислорода, вступающего в реакцию окисления с углем, зависит от свободной реакционной поверхности, которая обусловлена метаморфизмом угля и связана со скоростью выделения из нее метана;

- в реальных условиях самонагревание угля происходит при пожароопасной скорости фильтрации через него воздуха, которая равна $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ м/с, когда стоки теплоты за счет конвективно-диффузионного переноса можно определить, ограничившись теплоотдачей в окружающие породы;

- необходимо учитывать сток теплоты из углей за счет дросселирования из них метана.

Учитывая вышеуказанные особенности низкотемпературного окисления и нагревания углей в шахтных условиях, предлагаем к рассмотрению и анализу следующую более упрощенную математическую модель этого процесса:

$$\rho_y c_y \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\alpha \Pi}{S} (T_c - T) + Q, \quad (7)$$

где ρ_y , c_y – плотность, кг/м^3 , и удельная теплоемкость угля, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 Q – удельное количество теплоты, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, обусловленное окислением угля $Q_{\text{ок}}$, дросселированием метана $Q_{\text{м}}$, испарением влаги $Q_{\text{в}}$ и определяемое по формулам

$$Q = Q_{\text{ок}} - Q_{\text{м}} - Q_{\text{в}}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{ок}} = \xi C_{\text{O}_2} q k_{\text{кр}} = \xi C_{\text{O}_2} v_q; \quad (9)$$

$$Q_{\text{м}} = \delta q_{\text{др}} J_{\text{м}}; \quad (10)$$

$$Q_{\text{в}} = 0,556 q_{\text{в}} k_{\text{в}} W^a \rho_y; \quad (11)$$

C_{O_2} – концентрация адсорбированного углем кислорода, моль/м^3 ;

v_q – скорость выделения теплоты, $\text{Дж}/(\text{с} \cdot \text{моль})$;

δ – доля выделяющегося метана;

$q_{\text{др}}$ – теплота дросселирования из угля метана, Дж/моль ;

$J_{\text{м}}$ – интенсивность выделения метана из угля, $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;

$q_{\text{в}}$ – теплота испарения влаги, Дж/моль ;

$k_{\text{в}}$ – константа скорости испарения влаги, с^{-1} ;

W^a – массовая доля влаги в аналитической пробе угля, %;

ξ – доля реакционной поверхности угля, определяемая зависимостью [5]

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (V^{\text{daf}})^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} V^{\text{daf}} + 3,76 \cdot 10^{-3}; \quad (12)$$

V^{daf} – объемная доля летучих веществ угля, %.

Для случая, когда процесс не лимитирует скорость адсорбции, что имеет место при окислении угля в шахтах, выражение (4) для концентрации кислорода C_{O_2} можно записать в виде [2]

$$C_{\text{O}_2} = \gamma C_{\text{ст}} \frac{1}{1 + (\Gamma_{\text{д}}/\mu_{\text{д}}^2)}, \quad (13)$$

где $C_{\text{ст}}$ – концентрация кислорода на границе газ – твердое тело, моль/м^3 , определяемая из зависимости

$$C_{\text{ст}} = C_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{0,76}{0,83 + J_0 \rho_y} 1,1 \cdot 10^{-5} \tau \right) \right]; \quad (14)$$

C_0 – концентрация кислорода в лаве, моль/м^3 ;

J_0 – газоносность пласта, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Диффузионный критерий скорости химической реакции определим из выражения

$$\Gamma_d = kR^2/D, \quad (15)$$

где k – константа скорости химической реакции, с^{-1} ;

R – радиус частиц угля, м;

D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$, определяемый по зависимости

$$D = \exp[-15,2 - 0,62\ln(\tau + 1)]. \quad (16)$$

Значение константы скорости химической реакции находят в результате лабораторных исследований определенной фракции угля, в то время как фактический гранулометрический состав скопления различен. Поэтому используют выражение

$$k = 0,15D_p \frac{d_q}{d_0} k_{\text{л}}, \quad (17)$$

где D_p – дробимость угля;

d_q – средний диаметр частиц угля, загружаемого в хроматографическую колонку, мм;

d_0 – средний диаметр исходных частиц угля, мм;

$k_{\text{л}}$ – константа скорости химической реакции, определенная в лабораторных условиях, с^{-1} .

Для начальных значений диффузионного критерия Био Bi_d параметр μ_d подчиняется равенству [6]

$$\mu_d^2 = 3Bi_d, \quad (18)$$

где $Bi_d = \beta R/D$; (19)

β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$, который в работе [2] рекомендовано определять из выражения

$$\beta = D/R. \quad (20)$$

После подстановки выражений (19) и (20) в (18) получим, что $\mu_d^2 = 3$.

В результате проведенных исследований, представленных в работе [7], установлена зависимость скорости выделения теплоты v_q , используемой в выражении (9), от константы скорости химической реакции в виде

$$v_q = 6980k^{0,18}. \quad (21)$$

Для определения параметров, необходимых для расчета удельного количества теплоты, обусловленного дросселированием метана, установлены следующие выражения [8]:

$$\delta = 1/(V^{\text{daf}} + 1); \quad (22)$$

$$q_{\text{др}} = 630(\text{Др} - 1)^{1,3}; \quad (23)$$

$$J_{\text{м}} = G/\tau. \quad (24)$$

Решение уравнения (7) для квазистационарного случая, полагая $T_{\text{с}} = T_0$, найдено в виде

$$T = T_0 + \frac{QS}{\alpha\Pi}. \quad (25)$$

Согласно полученному решению повышение температуры угля в скоплении определяется его геометрическими параметрами S , Π , удельным количеством выделяемой теплоты Q и ее стоком за счет теплообмена с окружающей средой α . При этом теоретически и экспериментально обоснованы все выполненные при постановке и решении задачи упрощения, приводящие к минимально допустимым погрешностям. В то же время уточнен расчет параметра Q , который зависит от трех источников: $Q_{\text{ок}}$ – реакции окисления угля кислородом; $Q_{\text{м}}$ – дросселирования из угля метана (со знаком минус) и $Q_{\text{в}}$ – испарения влаги (со знаком минус).

Согласно выражению (9) источник теплоты – реакция окисления угля, зависящая от скорости тепловыделения v_q , доли реакционной поверхности угля ξ и концентрации сорбированного кислорода в порах угля C_{O_2} [5]. Последний параметр наименее изучен, трудно определяемый и существенно влияющий на вероятность возникновения эндогенного пожара. Выполненные НИИГД «Респиратор», ДонУГИ и ИГД им. А.А. Скочинского исследования показали, что величина $C_{\text{ст}}$, входящая в формулу (13), зависит от продолжительности окислительного процесса и газоносности пласта, поэтому может колебаться для различных случаев в широких пределах.

Принимая во внимание, что газоносность пластов, разрабатываемых шахтами ДНР, порядка $10...40 \text{ м}^3/\text{т}$, рассчитано изменение значения концентрации кислорода в процессе окисления твердой поверхности $C_{\text{ст}}$ по формуле (14) при $C_0 = 9,36 \text{ моль}/\text{м}^3$ (см. таблицу).

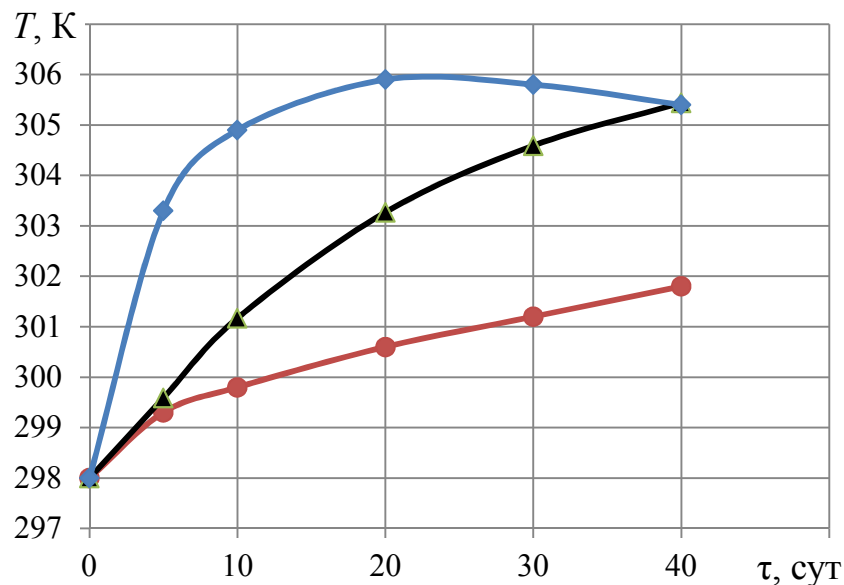
Минимальные и максимальные значения удельного количества теплоты, обусловленного окислением угля, дросселированием метана, испарением влаги, рассчитаны для диапазона объемной доли летучих веществ от 5 до 35 % при дробимости 5...25 и массовой доле влаги 0,5...2,5 %, а также значений константы скорости окисления, определенной в лабораторных условиях, которые находятся в пределах $5 \cdot 10^{-4}...5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Используя приведенные данные, установили динамику температуры угля для скопления толщиной 0,19 м при $\alpha = 0,29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $T_0 = 298 \text{ К}$, анализ которой показывает влияние исследуемых параметров на развитие процесса самонагрева.

На примере угля пласта k_5 шахты «Коммунарская» проанализируем изменение температуры скопления в процессе окисления кислородом воздуха по рассмотренным моделям (см. рисунок). Основные физико-химические

характеристики исследуемого угля: $V^{\text{daf}} = 6\%$; $T_0 = 298\text{ K}$; $Q_0 = 11,3\text{ м}^3/\text{т}$; $W^a = 1,2\%$; $k_{\text{л}} = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$; $\text{Др} = 9$; $S/\text{П} = 0,05\text{ м}$; $\rho = 1200\text{ кг/м}^3$; $\alpha = 0,29\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Динамика температуры угля при минимальных и максимальных параметрах

Время τ , сут	5	10	15	20	30
$C_{\text{ст}}$, моль/ м^3 , при $Q_0 = 10\text{ м}^3/\text{т}$	1,98	3,54	4,77	5,74	7,11
$C_{\text{ст}}$, моль/ м^3 , при $Q_0 = 40\text{ м}^3/\text{т}$	0,57	1,09	1,59	2,06	2,91
$C_{\text{O}_2} _{Q_0=10\text{ м}^3/\text{т}}$, моль/ м^3	9,44	13,19	15,08	16,01	16,44
$C_{\text{O}_2} _{Q_0=40\text{ м}^3/\text{т}}$, моль/ м^3	0,47	0,61	0,70	0,77	0,85
$Q_{\text{ок}} _{\min k, Q_0}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	60,51	84,53	96,60	102,57	105,33
$Q_{\text{ок}} _{\max k, Q_0}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	4,83	6,28	7,20	7,85	8,71
$Q_{\text{м}} _{\min Q_0}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	1,33				
$Q_{\text{м}} _{\max Q_0}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	9,13				
$Q_{\text{в}} _{\min W^a}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	0,57				
$Q_{\text{в}} _{\max W^a}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	5,73				
$T _{\min k, Q_0, W^a}$, К	307,6	311,5	313,5	314,5	314,9
$T _{\max k, Q_0, W^a}$, К	296,4	296,6	296,7	296,8	297,0



Динамика температуры скопления угля, рассчитанная по различным формулам:

♦ – формула (25); ● – формула (1); ▲ – формула (5)

Результаты расчета температуры угля по предлагаемой упрощенной формуле (25) и формулам (1) и (5) представлены на рисунке и показывают, что характер кривых на начальной стадии процесса аналогичен. Однако с течением времени отличие значений температуры, рассчитанных по формуле (25), связано с учетом теплообменных процессов скопления угля с окружающей средой.

Выводы. Путем разработки математической модели процесса окисления угля и использования экспериментальных данных предложен метод определения температуры угля, позволяющий контролировать раннюю стадию самонагрева.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2013. – 792 с.
Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 792 p.
2. 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'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya* [Actual questions of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.
3. Березовский, А.А. Динамика процесса самонагрева плоского слоя угля / А.А. Березовский, С.П. Греков, В.Ю. Пудрик // Вестник Херсонского гос. техн. ун-та. – Херсон, 2002. – № 2. – С. 67 – 71.
Berezovskiy, A.A., Grekov, S.P., Pudrik, V.Yu. *Dinamika protsessy samonagrevaniya ploskogo sloya uglya* [Dynamics of the spontaneous heating process of a flat coal seam]. *Vestnik Khersonskogo gos. tekhn. un-ta.* [Bulletin of the Kherson State Technical University]. Kherson, 2002, no. 2, pp. 67 – 71.
4. Греков, С.П. Тепломассообменные процессы в самовоспламеняющихся газоотдающих двухфазных средах / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Вестник Херсонского гос. техн. ун-та. – Херсон, 2005. – № 2. – С. 124 – 133.
Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. *Teplomassoobmennyye protsessy v samovosplamenyayushchikhsya gazootdayushchikh dvukhfaznykh sredakh* [Heat and mass exchange processes in self-ignitable gas-discharging two-phase media]. *Vestnik Khersonskogo gos. tekhn. un-ta.* [Bulletin of the Kherson State Technical University]. Kherson, 2005, no. 2, pp. 124 – 133.
5. Греков, С.П. Контроль за признаками самонагрева угля / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2015. – № 5. – С. 40 – 43.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Orlikova, V.P. *Kontrol' za priznakami samonagrevaniya uglya* [Monitoring of signs of coal spontaneous heating]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2015, no. 5, pp. 40 – 43.

6. Условия теплообмена при очаговом самонагревании органических веществ / С.П. Греков, В.П. Орликова, К.В. Глушенко, В.В. Волюнец // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2017. – № 4 (54). – С. 21 – 32.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P., Glushenko, K.V., Volynets, V.V. *Usloviya teploobmena pri ochagovom samonagrevanii organicheskikh veshchestv* [Heat exchange conditions during local spontaneous heating of organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2017, issue 4(54), pp. 21 – 32.

7. Греков, С.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 6. – С. 46 – 50.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Orlikova, V.P. *Teplovoy effekt okisleniya ugley i endogennaya pozharoopasnost'* [Thermal effect of coal oxidation and spontaneous fire hazard]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2014, no. 6, pp. 46 – 50.

8. Греков, С.П. Тепловой эффект дросселирования метана из угля / С.П. Греков, А.А. Всякий, И.Г. Старикова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2019. – № 2(56). – С. 88 – 94.

Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Starikova, I.G. *Teplovoy effekt drosselirovaniya metana iz uglya* [Thermal effect of methane throttling from coal]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2019, no. 2(56), pp. 88 – 94.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 04.06.2020

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

Viktoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

CALCULATION OF COAL SPONTANEOUS HEATING TEMPERATURE

Purpose. Analysis of available mathematical models of the low-temperature coal oxidation and their constituent parameters as well as development of a simplified model of coal spontaneous heating and its analytical solution for calculations of the temperature.

Methodology. Mathematical modeling of the heterogeneous process of oxygen chemisorption according to various methodologies and substantiation of the simplified method application for calculation of the dynamics of coal spontaneous heating temperature.

Results. According to reviewed methodologies and taking into account the minimum fire-hazardous volume of an accumulation the calculations of the dynamics of the coal spontaneous heating temperature have been conducted for various mining and geological characteristics of the Donetsk Basin mines and conditions of mining the seams. The proposed mathematical model of the spontaneous heating has been substantiated, and the simplified method for calculation of the coal temperature has been developed.

Scientific novelty. The obtained analytical dependence allows investigating the temperature dynamics in the place of the spontaneous heating with allowance for the heat gain being generated by the oxidation reaction and heat exchange being linked to the release of methane into environment.

Practical value. The results of the work will make it possible to predict safe conditions of mining the seams at the coal mining enterprises and to prevent the coal spontaneous combustion.

Keywords: *local spontaneous heating of coal; low-temperature oxidation; reaction surface; thermal explosion; heat release and heat transfer.*

УДК 622.822:614.842.614

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

Оперативный государственный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР
283048, Донецк, пер. Николенко, 7. Тел. (+38 062) 343-52-64

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

Наталья Александровна Калиниченко, инж.; e-mail: kalinichenko_080597@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-41

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО АЗОТА ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ

Цель. Усовершенствование технологии борьбы с подземными пожарами за счет применения специальных установок, вырабатывающих газообразный азот, и схем его подачи.

Методика. Анализ, обобщение и обработка опытно-экспериментальных данных.

Результаты. Проведен анализ технологии использования азота для ликвидации и локализации подземных пожаров. Определены наиболее эффективные схемы подачи газообразного азота.

Научная новизна. Установлено, что перепад давления на перемычке, за счет которого поступает воздух в изолированный объем, может быть снижен путем создания шлюзовой камеры, заполняемой азотом.

Практическая значимость. Предложен способ предотвращения попадания воздуха в изолированный участок и повышения в нем объемной доли кислорода более 2 %. Рассмотренная установка АМГП-15/0,7СУ1 находится на вооружении в подразделениях ГВГСС.

Ключевые слова: газообразный азот; шахта; выработанное пространство; перемычка; очаг самовозгорания; очаг горения.

Постановка задачи. В Донецкой Народной Республики (в дальнейшем – ДНР) опасность возникновения эндогенных пожаров по-прежнему высока. Проведенная командным составом ГВГСС целевая проверка «Эндогенная пожаробезопасность» и выполненный на ее основании Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС, показал, что из 79 отработываемых шахтопластов 17 (более 11%) склонны к самовозгоранию, имеется 63 зоны с повышенной опасностью возникновения очагов самовозгорания угля, из них 26 расположены на проходческих и добычных участках.

Наметившаяся тенденция углубления горных работ и увеличения размеров выемочных столбов ведет к росту объемов выработанного пространства, что увеличивает продолжительность и трудоемкость ликвидации очагов эндогенных пожаров.

Поэтому один из наиболее перспективных способов предупреждения, локализации и тушения пожаров в шахтах – инертизация воздуха аварийного

участка, под которой понимается искусственное снижение концентрации кислорода в горных выработках путем подачи инертного газа.

Анализ последних публикаций. В шахтных условиях для борьбы с пожарами пытались использовать все доступные виды инертных газов. Применение углекислого газа имело эпизодический характер [1, 2], поскольку выяснилось, что CO_2 интенсивно поглощают вода и уголь, что приводит к быстрому снижению его концентрации в горных выработках.

Успешное применение азота для борьбы с подземными пожарами на угольных шахтах началось с 1967 г. Впервые азот был эффективно применен при тушении подземного пожара на шахте № 29 комбината «Воркутауголь» в 1968 г. [3]. Разработкой и внедрением средств борьбы с подземными пожарами занимались такие специалисты горноспасательного дела, как В.Ю. Горб, П.С. Пашковский, М.А. Яремчук, В.Г. Игишев, В.М. Портола, О.Э. Толкачев, Ю.Ф. Булгаков, В.К. Кобенко и др.

Материалы и результаты исследования. Более широкое использование для борьбы с подземными пожарами получили продукты сгорания. Основной способ их получения – работа воздушно-реактивных авиационных двигателей. На этой основе НИИГД был разработан генератор инертных газов ГИГ-1. Образовавшиеся при сгорании в двигателе керосина продукты сгорания поступают в камеру охлаждения, где за счет распыленной воды их температура снижалась до 250°C . Производительность генератора $350 \text{ м}^3/\text{мин}$, а объемная доля кислорода в парогазовой смеси, подаваемой в зону горения, около 3 % [4].

Более усовершенствованная установка ГИГ-4, в которой используют газотурбинный двигатель АИ-8П. Производительность установки доходила до $350 \text{ м}^3/\text{мин}$, температура смеси снижена до $80\ldots 90^\circ\text{C}$.

Однако широкому применению разработанных установок препятствовал ряд недостатков:

- во-первых, высокая температура ($80\ldots 90^\circ\text{C}$) образовавшейся парогазовой смеси снижает эффективность охлаждения высокотемпературных областей и приводит к разогреванию значительных масс угля и породы;
- во-вторых, значительное количество оксида и диоксида углерода в смеси (соответственно 0,2 и 7 %) создает опасность отравления людей во время и после работы установки;
- в-третьих, сложность работы и обслуживания установки;
- в-четвертых, необходимость доставки в шахту большого количества керосина (расход 850 кг/ч);
- в-пятых, небольшая дальность подачи парогазовой смеси.

Еще один способ инертизации – использование пожарных газов, исходящих из очага горения. Этот способ также имеет недостатки: температура таких газов высока, что ухудшает процесс охлаждения, кроме того, для организации рециркуляции необходимо проведение значительного объема работ на аварийном участке. Исходящие из очага горения пожарные газы

имеют высокую температуру, поэтому их необходимо перед подачей охладить, например тонкораспыленной водой.

Наибольшее распространение получил азот, который широко применяется в таких развитых угледобывающих странах, как Англия, Германия, Российская Федерация. Согласно отчету Главной горноспасательной станции в Эссене за 1974...1985 гг. азот для борьбы с подземными пожарами успешно использовали 102 раза. В результате инертизации были сохранены 72 очистных забоя с суммарными запасами угля 26 млн т. В подавляющем большинстве случаев (85 раз, что составляет 83 %), азот применялся для локализации очагов самовозгорания угля в выработанном пространстве действующих выемочных полей, что позволило предотвратить возникновение очагов эндогенных пожаров.

В Российской Федерации азот применяли для борьбы с самовозгоранием угля на шахтах Кузбасса [5].

Основные преимущества азота по сравнению с другими инертными газами: возможность получения низких температур подаваемого газа и его низкая поглощаемость. Так, по сравнению с CO_2 азот поглощается слабее: углем – в 3...8 раз, породой – в 4...6 раз и шахтной водой – в 30 раз. Благодаря удельному весу, близкому к удельному весу воздуха, азот равномерно распределяется в горных выработках и выработанном пространстве.

Первоначально использовался жидкий азот и установки для его газификации. Но этой технологии присущи существенные недостатки:

- необходимость применения сложного и дорогостоящего криогенного оборудования;
- сложность и дороговизна транспортирования и хранения;
- значительные потери;
- расходы энергии на газификацию и т.д.

Более перспективный и приемлемый в шахтных условиях способ получения газообразного азота непосредственно на шахте с помощью газоразделительных станций (устройств, разделяющих воздух на его составляющие). Научные основы этой технологии разработаны НИИГД «Респиратор», и на их основе создана передвижная установка АМГП-15/0,7СУ1 (см. таблицу).

Основные элементы установки – мембранные газоразделительные аппараты, которые составляют единый блок (батарею). Аппараты работают по методу мембранного деления, суть которого состоит в разной скорости прохождения газов через плоскую полимерную перегородку за счет перепада парциальных давлений.

Воздух сжимается компрессором до рабочего давления и подается в блок очистки, где отделяются капельная влага и масло, потом он поступает в фильтр-адсорбер, где удаляются пары масла. Очищенный воздух поступает в мембранный блок, где за счет перепада парциальных давлений кислород проникает под мембрану и выбрасывается в атмосферу, азот подают

потребителю. С помощью регулирующего вентиля осуществляется изменение расхода и концентрации азота.

Основные технические параметры установки типа АМГП-15/0,7СУ1

Параметр, размерность	Значение
Всасываемый газ	Воздух
Производительность винтового компрессорного агрегата, приведенная к нормальным условиям, м ³ /мин	40±2
Давление начальное, номинальное, МПа	0,101
Давление конечное, номинальное, МПа	1,1
Производительность станции по азоту на выходе из мембранного модуля при объемной доле азота 95 %, м ³ /мин	15±2
Объемная доля азота на выходе из станции, %	95,5
Давление азота на выходе, номинальное, МПа	0,8
Масса станции в укомплектованном состоянии, кг, не более	32000
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	3000
Средний ресурс до капитального ремонта, ч, не менее	20000

Азотно-компрессорная станция устанавливается на поверхности шахты и соединяется специально проложенным или технологическим шахтным трубопроводом с аварийным участком [6].

Подача газообразного азота осуществляется со стороны откаточного или вентиляционных горизонтов, через проемы в изолирующих перемычках, а также по буровым скважинам, пробуренным с поверхности в изолированный пожарный участок.

Однако опыт применения газоразделительных установок при ликвидации аварии на шахтах им. А.Ф. Засядько, им. Ф.Э. Дзержинского показал, что добиться эффективного подавления очагов горения с их помощью не удастся.

Дело в том, что в полученном из мембранных установок азоте содержится до 5 % кислорода, кроме того, в изолированный объем поступает в виде утечек воздух через перемычку, трещины во вмещающих выработку породах (рис. 1).

За счет этого объемная доля O₂ в изолированном перемычками пространстве возрастает до 10 %. Для подавления тлеющего горения объемная доля кислорода в газовой смеси не должна превышать 1...2 %.

Для преодоления этого в статье [7] предложено возводить дополнительную изолирующую перемычку, а от трубопровода для подачи азота сделать ответвление, через которое азот поступает в пространство (камеру) между перемычками (рис. 2).

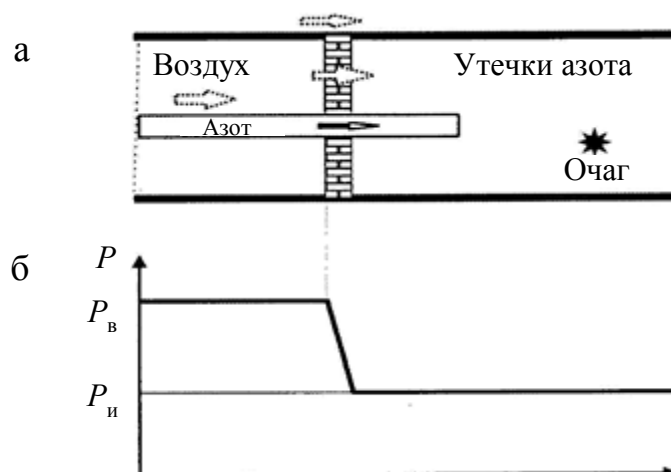


Рис. 1. Схема подачи инертного газа к очагу горения (а) и распределение давления газа (б) в выработке:

$P_{\text{в}}$, $P_{\text{и}}$ – соответственно давление воздуха до и позади изолирующей перемычки

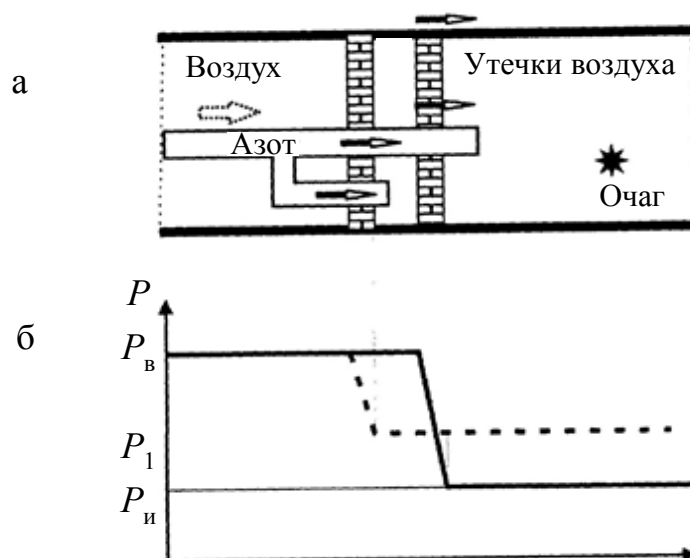


Рис. 2. Схема подачи инертного газа к очагу горения с предотвращением утечек воздуха (а) и распределение давления газа (б) в выработке при новом (сплошная) и существующем (пунктир) способах инертизации:

$P_{\text{в}}$, $P_{\text{и}}$ – соответственно газовое давление до и позади изолирующей перемычки;
 P_1 – газовое давление позади изолирующей перемычки при существующем способе

Давление азота в трубопроводе достигает 1,0 МПа (см. таблицу) и намного превышает воздушный напор на перемычку, равный нескольким десяткам декапаскалей. Когда камера заполняется азотом, подачу его через ответвление регулируют таким образом, чтобы выровнять давление в выработке со стороны поступающей свежей воздушной струи и между перемычками. В этой ситуации отсутствуют подсосы воздуха через перемычку в камеру.

Перепад давлений перераспределяется на участок выработки, разделенный дополнительной перемычкой, по обе стороны которой находится азот, из него же состоят утечки. Таким образом, исключены подсосы воздуха в изолированную выработку.

Применение установок пятого поколения, использующих пористое полимерное волокно с нанесенным газоразделительным слоем, позволяет получить газообразный азот чистотой 95...99,9 % под давлением от 0,5 до 4 МПа с производительностью до 5000 $\text{нм}^3/\text{ч}$. Для борьбы с пожарами на шахтах можно использовать передвижные азотные мембранные станции серии АМВЦ. Производительность по газу у этих установок от 150 (АМВП-2,5/0,7) до 1590 $\text{нм}^3/\text{ч}$ (АМВП-26,5/7) под давлением 0,8 МПа с чистотой азота 99,5 %.

Расчеты показывают, что при потребности газообразного азота до 10000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ с чистотой 90...99 % экономически более целесообразны мембранные установки. При постоянной потребности азота более 10000 $\text{нм}^3/\text{ч}$ следует использовать криогенные установки получения азота.

Инертизация с помощью газообразного азота позволяет в ходе ликвидации подземного пожара решить следующие задачи:

- сократить срок ликвидации аварии;
- предотвратить взрывы газозооушной смеси на аварийном участке;
- ускорить охлаждение высокотемпературной зоны до безопасного уровня;

- сократить до минимума или полностью прекратить процесс горения.

Газообразный азот рекомендуют применять в следующих случаях:

- при изоляции пожарных участков, а также при изоляции в сочетании с различными способами ускорения процесса охлаждения очага пожара (рециркуляция пожарных газов, добавка к подаваемому азоту тонкораспыленных водных растворов антипирогенов) для предупреждения взрывов и прекращения горения;

- при ликвидации пожаров в горизонтальных и тупиковых выработках любой длины, в случае подачи азота в тупиковую часть выработки по трубопроводу (например, подача через вентилятор местного проветривания по вентиляционному трубопроводу);

- при ведении взрывных работ в горных выработках для создания инертной среды в месте проведения взрыва;

- для предупреждения эндогенных пожаров в угольных скоплениях, образовавшихся при внезапных выбросах.

Выводы. Азот продолжает оставаться перспективным средством борьбы с подземными пожарами и наиболее эффективным средством инертизации воздуха выработанного пространства.

При дальнейших исследованиях для расчета количества азота, необходимого для ликвидации очага горения, необходимо построить математическую модель распространения азота в выработанном пространстве шахт и теплоотвода от разогретого угля.

Для получения больших объемов азота можно применять разделение воздуха с помощью криогенной или мембранной технологии. При потребности газообразного азота до 10000 м³/ч с чистотой 90...99 % более экономически выгодно применять мембранные установки, а при более высокой потребности в азоте следует использовать криогенные установки получения азота.

Список литературы / References

1. Син, С.А. Повышение эффективности применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах / С.А. Син, В.А. Портола, В.Г. Игишев // Уголь. – 2018. – № 5. – С. 51 – 57.

Sin, S.A., Portola, V.A., Igishev, V.G. *Povysheniye effektivnosti primeneniya azota dlya bor'by s samovozgoraniyem uglya v shakhtakh* [Improvement of effectiveness of nitrogen employment for fighting the coal spontaneous combustion in coal mines]. *Ugol' – Coal*, 2018, no. 5, pp. 51 – 57.

2. Портола, В.А. Оценка эффективности тушения скопления угля различными хладагентами / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 2. – С. 181 – 185.

Portola, V.A., Galsanov, N.L. *Otsenka effektivnosti tusheniya skopleniya uglya razlichnymi khladagentami* [Evaluation of effectiveness of extinguishing the coal accumulations with various cooling agents]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2014, no. 2, pp. 181 – 185.

3. Портола, В.А. Эффективность использования инертных составов для тушения пожаров в выработанном пространстве шахт / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С. 80 – 83.

Portola, V.A., Galsanov, N.L. *Effektivnost' ispol'zovaniya inertnykh sostavov dlya tusheniya pozharov v vyrabotannom prostranstve shakht* [Effectiveness of the use of inert compositions for extinguishing the fires in the goaf of coal mines]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2013, no. 6, pp. 80 – 83.

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

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

5. Син, С.А. Применение азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах / С.А. Син // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 167 – 171.

Sin, S.A. *Primeneniye azota dlya bor'by s samovozgoraniyem uglya v shakhtakh* [Employment of nitrogen for fighting the coal spontaneous combustion in mines]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2015, no. 3, pp. 167 – 171.

6. Костенко, В.К. Совершенствование технологии инертизации воздуха в горных выработках / В.К. Костенко, Т.В. Костенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № S2. – С. 198 – 204.

Kostenko, V.K., Kostenko, T.V. *Sovershenstvovaniye tekhnologii inertizatsii vozdukha v gornyykh vyrabotkakh* [Improvement of technology of air inertization in mine workings]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – Mining information and analytical bulletin: scientific and technical journal, 2005, no. S2, pp. 198 – 204.

7. Булгаков, Ю.Ф. Газоразделительные мембранные модули для создания инертной среды в пожарных участках / Ю.Ф. Булгаков, А.Л. Толмачева, С.Г. Филимонов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк, 2002. – С. 102 – 110.

Bulgakov, Yu.F., Tolmacheva, A.L., Filimonov, S.G. *Gazorazdelitel'nyye membrannyye moduli dlya sozdaniya inertnoy sredy v pozharnykh uchastkakh* [Gas-separation membrane moduli for creation the inert medium in fire sections]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr.* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2002, pp. 102 – 110.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 29.07.2020

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

The State operation Para-military mine-rescue unit of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic

283048, Donetsk, 7, pereulok Nikolenko. Phone (+38 062) 343-52-64;

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

Natalya Aleksandrovna Kalinichenko, engineer; e-mail: kalinichenko_080597@mail.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-41

USE OF THE GASEOUS NITROGEN DURING ELIMINATION OF UNDERGROUND FIRES

Purpose. Improvement of a technology of fighting the underground fires with the application of special installations generating the gaseous nitrogen and that one of circuits of its delivery.

Methodology. Analysis, generalization and processing of research and experimental data.

Results. The analysis of the nitrogen use technology for elimination and containment of the underground fires has been conducted. The most effective circuits of the gaseous nitrogen delivery have been defined.

Scientific novelty. It has been established that the differential pressure at the stopping which facilitates the air entry into the sealed volume may be decreased by creating a gate chamber being filled with nitrogen.

Practical value. The method has been proposed to prevent the air entry into the sealed section and the increase of oxygen volume fraction over 2 % in it. The examined АМГП-15/0,7СУ1 unit is in operational service of the State Para-military Mine-Rescue Service subdivisions.

Keywords: gaseous nitrogen; coal mine; goaf; stopping; place of spontaneous combustion; seat of fire.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.8"363":654,,Система-112“

Алексей Александрович Кострубицкий, министр; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

*Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики
283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-28*

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-01*

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫЗОВА ЭКСТРЕННЫХ ОПЕРАТИВНЫХ СЛУЖБ ПО ЕДИНУМУ НОМЕРУ

Цель. Исследование возможности организации телефонного обращения в экстренные оперативные службы по типу «одного окна» для повышения эффективности реагирования экстренных оперативных дежурных (диспетчерских) служб, оценка готовности администраций городов Донецкой Народной Республики к проведению мероприятий при возникновении угроз и чрезвычайных ситуаций, снижение возможного социально-экономического ущерба.

Методика. Анализ и обобщение существующих нормативных правовых и методических документов Донецкой Народной Республики, других государств в области создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112.

Результаты. Определение перечня нормативных правовых актов Донецкой Народной Республики, требующих разработки или уточнения в процессе создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112.

Научная новизна. Разработаны подходы, позволяющие совершенствовать качество мероприятий по созданию и внедрению системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Донецкой Народной Республике, повысить удобство при обращении граждан за помощью с использованием принципа «одного окна».

Практическая значимость. Внедрение системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 позволит обеспечить информационное взаимодействие органов повседневного управления Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Донецкой Народной Республике.

Ключевые слова: *система-112; чрезвычайные ситуации; Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций; единые дежурные (диспетчерские) службы органов местного самоуправления; дежурные (диспетчерские) службы экстренных оперативных служб.*

Постановка задачи. Важнейший показатель эффективности действий экстренных оперативных служб – их своевременное реагирование. Сокращение времени их реагирования непосредственно влияет на оперативность принятия решений, что, в свою очередь, приводит к снижению вероятности возникновения неблагоприятных последствий чрезвычайных ситуаций и как следствие к уменьшению общего материального ущерба, снижению количества пострадавших и погибших.

Систему обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 (далее – система-112) в Донецкой Народной Республике планируют создать для удобства обращения граждан за помощью по принципу «одного

окна» [1]. Внедрение такой системы позволит жителям Донецкой Народной Республики в условиях чрезвычайной ситуации не расходовать время, предназначенное для ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, на выбор необходимой экстренной службы и поиск номера телефона для ее вызова. Как следствие – сокращение затрат времени на период от момента возникновения происшествия до приема экстренного вызова оператором и облегчение информирования населения о порядке вызова экстренных служб.

В то же время функционирование системы-112 позволит обеспечить информационное взаимодействие органов повседневного управления Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе: единых дежурных (диспетчерских) служб органов местного самоуправления и дежурных (диспетчерских) служб экстренных оперативных служб. Внедрение системы-112 на территории Донецкой Народной Республики улучшит информированность сил и средств о возникновении чрезвычайных ситуаций и повысит возможность оперативно реагировать на них. Это, в свою очередь, позволит реализовать конституционные права граждан Донецкой Народной Республики в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций в соответствии со статьей 19 Закона Донецкой Народной Республики «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [2].

Анализ последних исследований. Проанализирован многолетний опыт работы экстренных оперативных служб на базе единого номера в различных зарубежных странах. Великобритания была первой страной, которая установила универсальный номер службы экстренной помощи (999) в 1937 г. Номер 999 используют по нынешний день наравне с общеевропейским 112. С 1991 г. номер 112 стал единым номером вызова экстренной помощи в Европейском союзе. Национальная Ассоциация пожарных США еще в 1957 г. предложила ввести национальный телефонный номер службы экстренной помощи. Но только в 1967 г., по инициативе президента Линдона Б. Джонсона, было принято решение об использовании абонентами одного телефонного номера в чрезвычайных ситуациях по всей стране. В конце 1967 г. Федеральная комиссия по связи (Federal Communications Commission) в партнерстве с American Telephone and Telegraph Company (AT&T) постановила, что новый универсальный номер экстренных служб должен состоять из цифр 9-1-1 [3]. По данным Национальной ассоциации экстренного номера (National Emergency Number Association), на номер 911 в США каждый год поступает около 240 миллионов звонков [4]. Поскольку Канада также применила 911 в качестве номера вызова экстренной помощи, он стал международным. Анализ работы служб 911, рассчитанных на обслуживание вызовов только чрезвычайного характера, показывает, что около половины телефонных обращений к службе 911 не являются таковыми, что приводит к возникновению перегрузок на сетях связи, отказу или длительному ожиданию обслуживания вызовов, носящих действительно чрезвычайный характер. Для решения этой проблемы в США,

дополнительно к службе 911, создана служба 311, которая обслуживает вызовы, не носящие чрезвычайного характера.

В Российской Федерации система-112 – территориально распределенная автоматизированная информационно-управляющая система, создаваемая в границах субъекта Российской Федерации, она состоит из следующих основных подсистем: телекоммуникационной, информационно-коммуникационной, консультативного обслуживания, геоинформационной, мониторинга, обеспечения информационной безопасности [5].

В систему-112 интегрируются экстренные оперативные службы: пожарной охраны, реагирования в чрезвычайных ситуациях, полиции, скорой медицинской помощи, аварийной службы газовой сети, службы «Антитеррор» [6].

Основные цели создания системы-112 в Российской Федерации – организация вызова экстренных оперативных служб по принципу «одного окна», организация комплекса мер, обеспечивающих ускорение реагирования и улучшение взаимодействия экстренных оперативных служб при вызовах (сообщениях о происшествиях), реализация требований по гармонизации способа вызова экстренных оперативных служб в Российской Федерации с законодательством Европейского союза [5, 7].

Сегодня примерно 99 % людей в Соединенных Штатах имеют доступ к системе экстренной телефонной связи 911 [3]. В Европейском союзе звонки на номер 112 составляют 51 % от всех звонков, осуществленных в экстренных случаях. Согласно данным работы [8], количество звонков на номер 112 за 2019 г. увеличилось на 12 %, а общее количество экстренных вызовов выросло на 6 %. В России эти цифры несколько ниже, поскольку полностью система не внедрена и процесс этот продолжается. Так, в соответствии с Федеральной целевой программой Российской Федерации «Создание системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Российской Федерации на 2013–2017 годы», разработанной Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций, создан системный проект телекоммуникационной подсистемы. Она была развернута на всей территории пилотного субъекта Российской Федерации, с дальнейшим проведением ее опытной эксплуатации. Программа завершилась Государственными испытаниями развернутой в субъекте Российской Федерации системы-112 и ее внедрением.

Цель исследования. Исследование возможности организации телефонного обращения к экстренным оперативным службам по типу «одного окна» для повышения эффективности реагирования экстренных оперативных дежурных (диспетчерских) служб, оценка готовности администраций городов Донецкой Народной Республики к проведению мероприятий при возникновении угроз и чрезвычайных ситуаций, снижение возможного социально-экономического ущерба.

Результаты исследования. Основные методы, используемые при выполнении работы, – анализ и обобщение действующих нормативных правовых документов Донецкой Народной Республики и Российской Федерации в области разработки стратегии и развития системы-112. С целью

создания и внедрения системы-112 в Донецкой Народной Республике планируется Концепция создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112. В данной Концепции определена система взглядов на проблему, установлено направление и разработаны принципиальные положения по совершенствованию Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Будет обоснована необходимость взаимодействия сил и средств республиканских, муниципальных служб при их совместных действиях, направленных на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций. Разработка и внедрение системы-112 позволит оптимизировать процесс организации работы с обращениями граждан в службы экстренного реагирования путем ввода единого телефонного номера.

Первый этап разработки системы-112 – исследование нормативных правовых актов в области функционирования экстренных оперативных служб. Важен вопрос доведения вызова (сообщения о происшествии) до дежурных (диспетчерских) служб соответствующих экстренных оперативных служб. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых и корректировании существующих нормативных правовых актов для назначения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 на всей территории Донецкой Народной Республики (см. таблицу).

Нормативные правовые акты в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций

Донецкая Народная Республика	Российская Федерация
Закон от 20.02.2015 № 11-ИНС «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»	Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»
Закон от 30 сентября 2016 г. № 151-ИНС «О пожарной безопасности»	Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности»
Положение о Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденное Постановлением Совета Министров Донецкой Народной Республики 9 апреля 2015 г. № 5-11	Положение о Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 30.12.2003 № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»
Положение о Министерстве по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, утвержденное Указом Главы Донецкой Народной Республики 12 апреля 2019 г. № 98	Положение о Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, утвержденное Указом Президента Российской Федерации от 11 июля 2004 г. № 868 «Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

В Российской Федерации Федеральным законом от 11.02.2013 № 9-ФЗ внесены следующие изменения в статью 11 «Полномочия органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций» Федерального закона от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»:

- органы государственной власти субъектов Российской Федерации осуществляют создание системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112, обеспечивают ее эксплуатацию и развитие;
- органы местного самоуправления самостоятельно участвуют в создании, эксплуатации и развитии системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112.

Также были внесены изменения в статью 22 «Тушение пожаров и проведение аварийно-спасательных работ» Федерального закона от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности», в которой речь идет о том, что для приема сообщений о пожарах и чрезвычайных ситуациях используют единый номер вызова экстренных оперативных служб 112 и телефонный номер приема сообщений о пожарах и чрезвычайных ситуациях, назначаемый федеральным органом исполнительной власти в области связи.

В Законе Донецкой Народной Республики «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», в статье 13 «Полномочия органов государственной власти в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций» и статье 14 «Полномочия органов местного самоуправления в сфере защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций» не указаны полномочия по созданию и эксплуатации системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112. Данные полномочия по аналогии с Российской Федерацией должны быть установлены для внедрения системы-112 в Донецкой Народной Республике.

В статью 40 «Тушение пожаров» главы 4 «Обеспечение пожарной безопасности» Закона Донецкой Народной Республики «О пожарной безопасности» необходимо добавить информацию об использовании для приема сообщений о пожарах и чрезвычайных ситуациях единого номера вызова экстренных оперативных служб 112.

Также в пункт 10.4 раздела III «Основные функции» Положения о Министерстве по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики должны быть добавлены следующие функции МЧС ДНР: МЧС ДНР в соответствии с возложенными на него задачами осуществляет координацию проводимых органами исполнительной власти и органами местного самоуправления работ по созданию, развитию и организации эксплуатации системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112.

Ключевой проблемой, стоящей на пути массового развертывания полноценных сегментов системы-112 в России, была проблема разделения полномочий между ведомствами, отвечающими за построение системы. Только в декабре 2010 г. президент России подписал указ (Указ Президента Российской Федерации от 28 декабря 2010 г. № 1632 «О совершенствовании системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб на территории Российской Федерации»), где были четко определены зоны ответственности различных ведомств. В соответствии с этим документом МЧС России координирует действия по созданию, развитию и эксплуатации системы-112, в связи с чем внесены соответствующие изменения в Положение о Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций отвечает за организацию взаимодействия с сетью связи общего пользования. Также МЧС, Министерство связи и массовых коммуникаций, Министерство внутренних дел, Федеральная служба безопасности, Министерство здравоохранения и социального развития, Министерство регионального развития обеспечивают информационное взаимодействие экстренных оперативных служб для своевременной обработки вызовов по номеру 112. В то же время органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления должны создать дежурно-диспетчерские службы органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и единые дежурно-диспетчерские службы муниципальных образований.

Следующее препятствие на пути к быстрому развертыванию системы в Российской Федерации – недостаточность финансирования проекта в различных регионах. Предполагалось, что финансирование будет идти из бюджетов всех уровней: местных, субъекта Российской Федерации и федерального. Однако, например, в Калужской области работы начались на средства местного бюджета, но без финансовой поддержки центра были приостановлены [9, 10].

Опираясь на опыт Российской Федерации в преодолении трудностей, возникающих при развертывании системы-112, для ее эффективного внедрения в Донецкой Народной Республике необходимо при разработке Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Донецкой Народной Республике разграничить полномочия между различными министерствами, или, аналогично пути, выбранному Российской Федерацией, обозначить данные полномочия в соответствующем Указе Главы Донецкой Народной Республики. Важно и точное определение источников финансирования проекта по созданию системы-112.

Для реализации Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Донецкой Народной Республике целесообразно создать Республиканскую целевую программу «Создание системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Донецкой Народной Республике».

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В рамках разработки Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 проведены исследования нормативно-правовой базы с целью создания такой системы в Донецкой Народной Республике. В Концепции создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Донецкой Народной Республике» будет определена система взглядов на проблему, установлено направление и разработаны принципиальные положения по совершенствованию Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Список литературы / References

1. Качанов, С.А. Стратегия развития системы-112 в Российской Федерации / под общ. ред. В.А. Акимова / С.А. Качанов, С.В. Агеев, В.А. Измалкова; МЧС России. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 160 с.

Kachanov, S.A. Ageyev, S.V., Izmailkova, V.A., Akimov, V.A., ed. *Strategiya razvitiya sistemy-112 v Rossiyskoy Federatsii. 2-ye izd., pererab. i dop.* [Strategy of the 112 system development in the Russian Federation. 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs), 2016, 160 p.

2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Закон Донецкой Народной Республики : [принят Постановлением Народного Совета Донецкой Народной Республики 20 февраля 2015 г. № 11-ИНС (с изменениями, внесенными Законом от 02.08.2019 № 50-ИНС)]. – Донецк, 2015. – 23 с.

O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenного kharaktera: Zakon Donetskoy Narodnoy Respubliki: [prinyat Postanovleniyem Narodnogo Soveta Donetskoy Narodnoy Respubliki 20 fevralya 2015 g. № 11-IHC (s izmeneniyami, vnesyennymi Zakonom ot 02.08.2019 № 50-IHC)] [The Donetsk People's Republic Law "On protecting the population and territories from natural and man-made emergency situations" (as amended by the DPR People's Council Resolution of February 20, 2015 no. 11-IHC (with amendments implemented by the Law of August 2, 2019 no. 50-IHC)]. Donetsk, 2015, 23 p.

3. How 911 Became the Emergency Call Number. URL: <https://gizmodo.com/how-911-become-the-emergency-call-number-1601064956>.

4. Mo Katibeh "911, What's Your Emergency?" – Looking Ahead to the Next 50 Years of 911. URL: https://about.att.com/innovationblog/2018/12/the_future_of_911_service.html.

5. «Система-112» и оповещение об угрозах ЧС и ЧП. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/187/>.

"Sistema-112" i opoveshcheniye ob ugrozakh ChS i ChP [The 112 System and emergencies and accidents threats warning]. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/187/>.

6. Концепция федеральной целевой программы «Создание системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 в Российской Федерации на 2012–2017 годы» : [утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 4 мая 2012 г. № 716-п]. – Москва, 2012. – 26 с. URL: <http://pravo.gov.ru/>.

Kontseptsiya federal'noy tselevoy programmy "Sozdaniye sistemy obespecheniya vyzova ekstrennykh operativnykh sluzhb po yedinomu nomeru 112 v Rossiyskoy Federatsii na 2012–2017 gody": [utverzhdena rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 4 maya 2012 g. № 716-p] [The Concept of the Federal target program “Creation of the emergency response service support system with a single emergency number 112 in the Russian Federation in 2012-2017” (as amended by the Government of the Russian Federation of May 4, 2012 no. 716-p)]. Moscow, 2012, 26 p. Available at: <http://pravo.gov.ru/>.

7. Информационный сайт Системы 112 Российской Федерации. URL: <https://sos112.ru/>.

Informatsionnyy sait Sistemy 112 Rossiyskoy Federatsii [Informational website of the Russian Federation 112 system]. Available at: <https://sos112.ru/>.

8. 2019 Report on the implementation of the European emergency number 112. – Brussels, 2020. – 18 p. URL: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/2019-report-implementation-european-emergency-number-112>.

9. Система 112. Цели 112. URL: <https://112info.ru/celi-112/>.

Sistema 112. Tseli 112 [The 112 System. Goals of 112]. Available at: <https://112info.ru/celi-112/>.

10. Методические рекомендации о развитии, организации эксплуатации и контроля функционирования системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру «112» / МЧС России. – М., 2018. – 41 с.

Metodicheskiye rekomendatsii o razvitii, organizatsii ekspluatatsii i kontrolya funktsionirovaniya sistemy obespecheniya vyzova ekstrennykh operativnykh sluzhb po yedinomu nomeru "112"/MChS Rossii [Guidelines on development, organization of operation and monitoring of the emergency response service support system with the single emergency number 112 / Ministry of Emergency Situations (Russia)]. Moscow, 2018, 41 p.

Aleksey Aleksandrovich Kostrubitskiy, Minister; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

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

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-28

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

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

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

THE EMERGENCY RESPONSE SERVICE SUPPORT SYSTEM WITH A SINGLE EMERGENCY NUMBER

Purpose. Investigation of a possibility to organize the phone call to the emergency response services, "single window" type, for improvement of the effectiveness of the standby (dispatching) emergency services response, evaluation of preparedness of the city administrations of the Donetsk People's Republic for conducting the measures in raising threats and emergency situations, reducing the potential social and economic damage.

Methodology. Analysis and generalization of existing normative legal and methodological documents of the Donetsk People's Republic, other states in the framework of creation of the emergency response service support system with the single emergency number 112.

Results. Determination of the list of regulatory and legal acts of the Donetsk People's Republic which require elaboration or adjustment in the process of creation of the emergency response service support system with the single emergency number 112.

Scientific novelty. The approaches have been developed that allow refining the quality of measures on creation and implementation of the emergency response service support system with the single emergency number 112 in the Donetsk People's Republic, improving the convenience of citizens calling for help with the application of the "single window" principle.

Practical value. The implementation of the emergency response service support system with the single emergency number 112 will enable ensuring the information interoperability between the entities of day-to-day operation of the Integrated national prevention and elimination of emergencies system in the Donetsk People's Republic.

Keywords: *the 112 system; emergencies; the Integrated national prevention and elimination of emergencies system; integrated standby (dispatching) services of local authorities; standby (dispatching) units of emergency response services.*

УДК [622.868:622.411.3]:[62-543.27.05]-519

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора (по научной работе);

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

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

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

Владислав Геннадьевич Турчанин, ведущий инж.-конструктор; e-mail: turchanin_v@ukr.net

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

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ОТБОРА ПРОБ ШАХТНОГО ВОЗДУХА ПРИ ВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Цель. Обоснование основных параметров усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ, предназначенной для повышения достоверности мониторинга и контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и других аварий в угольных шахтах подразделениями горноспасательной службы.

Методы. Использован аналитический метод исследования, состоящий из анализа и обработки научной и технической литературы, а также метод проектирования в автоматизированной системе «Компас-3D».

Результаты. Выполнен анализ, обоснованы параметры и приведены технические характеристики усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха для газового мониторинга и контроля аварийных участков угольных шахт.

Научная новизна. Предложен рабочий комплект усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ подразделениями горноспасательной службы, которая позволит осуществлять отбор проб шахтного воздуха по высоте и сечению горной выработки аварийного, в том числе изолированного пожарного, участка, устранить негативное влияние влаги на циркуляцию в системе путем уменьшения ее скапливания в пробоотборном трубопроводе, а также обеспечить достаточное высушивание анализируемых пожарных газов, нередко имеющих высокую влажность, перед их попаданием в емкости для отбора проб шахтного воздуха.

Практическая значимость. Результаты проведенного исследования служат основой для разработки конструкторской документации и изготовления опытного образца усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ подразделениями горноспасательной службы.

Ключевые слова: угольная шахта; горноспасательная служба; аварийный участок; подземные пожары и взрывы; дистанционный отбор проб шахтного воздуха; мониторинг и контроль газовой обстановки; эжекторная установка; аварийно-спасательные работы.

Постановка проблемы. Одна из ключевых отраслей хозяйства, залог энергетической и государственной безопасности, гарант бесперебойной и эффективной работы металлургической, коксохимической и других отраслей промышленности многих стран и государств – горно-добывающая промышленность [1].

Однако в угольной промышленности значительное препятствие на пути к достижению поставленных целей и высоких показателей угледобычи – подземные пожары, которые приводят к полной потере или задержке добычи

подготовленных к выемке запасов угля, принося тем самым огромные убытки угледобывающим предприятиям.

При ликвидации пожаров в угольных шахтах нередко возникают условия, опасные для жизни горноспасателей, поэтому организация дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха с целью получения достоверных данных о газовой обстановке аварийного участка в течение всего периода ликвидации аварии – одно из главных условий безопасного и успешного тушения пожаров [2].

Анализ газовой обстановки дает возможность определить стадию аварии (например, степень развития пожара или его затухания), вероятность взрыва газовоздушной смеси, установить границы заполнения пожарным газом горных выработок для выбора месторасположения подземных баз и определения зон работы горноспасателей без изолирующих дыхательных аппаратов, а также дать оценку эффективности принятых мер по проветриванию и инертизации аварийного (изолированного пожарного) участка и прочее.

Сущность дистанционного мониторинга и контроля газовой обстановки при ведении горноспасательных работ состоит в том, что в точку отбора проб предварительно прокладывают трубопровод, по которому шахтный воздух откачивают на безопасное расстояние побудителями расхода (эжекторами, вакуумными насосами и др.). Пробы шахтного воздуха набирают в специальные емкости, которые направляют на анализ в специализированные газоаналитические лаборатории.

Однако применяемая система дистанционного отбора проб шахтного воздуха имеет ряд недостатков, приведенных в статье [3], в результате чего в практике горноспасательных работ по ликвидации пожаров имеют место случаи взрывов газовоздушных смесей, в то время как по результатам анализа дистанционно отобранных проб воздуха смесь была невзрывчатой, а также обратная ситуация, когда по результатам дистанционного контроля газовой обстановки аварийного участка наблюдали взрывоопасную обстановку, а взрывов не было [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Разработке способов и технических средств дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ посвящены научные труды ведущих ученых и инженеров: С.П. Грекова, И.Н. Зинченко, В.И. Ковальчука, А.Л. Романчука, В.С. Сергеева, Б.А. Сурначева, А.П. Федоровича, D. Adler, F. Burns, D. Chapman, B. Ciepiela, C. Fauconnier, Z. Fink, T. Golisz, A. Kukuczka, W. Marchewka, D. Mitchell, R. Morris, R. Zipf и др. [3]. Этими авторами было проведено множество теоретических и экспериментальных исследований, предложены техника и технологии дистанционного мониторинга и контроля газовой обстановки при ведении аварийно-спасательных работ, которые легли в основу применяемых горноспасательной службой нормативных правовых актов и ведомственных документов. Однако разработанное и используемое оборудование имеет ряд недостатков и не позволяет осуществлять оперативный контроль газовой обстановки аварийного участка с короткими интервалами

времени, отбирать дистанционным способом пробы шахтного воздуха по высоте и сечению горной выработки аварийного участка, исключить или уменьшить скапливание влаги в пробоотборном трубопроводе и др.

Таким образом, обоснование параметров и разработка усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ – это актуальное направление научных исследований и опытно-конструкторских работ.

Цель настоящей статьи – обоснование параметров усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха (далее – система) при ведении аварийно-спасательных работ, предназначенной для повышения достоверности мониторинга и контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и других аварий в угольных шахтах подразделениями горноспасательной службы.

Материалы и результаты исследований. На основании ранее выполненных исследований [4] установлено, что система (рис. 1), основные технические характеристики которой приведены в таблице, должна состоять из следующих частей:

- многоточечного пробоотборника (рис. 2);
- пробоотборного трубопровода;
- фильтрующих элементов (влагоотделителей, осушителей), рис. 3;
- побудителя расхода (эжекторной установки УЭ-1М);
- баллона (с редуктором) со сжатым воздухом;
- емкостей для отбора проб шахтного воздуха;
- буферного резервуара для набора проб шахтного воздуха в камеру, а также приспособления для набора проб шахтного воздуха в камеру без буферного резервуара, состоящего из Т- или Y-образного соединительного тройника, шарового крана и резиновой груши от шахтного интерферометра типа ШИ.

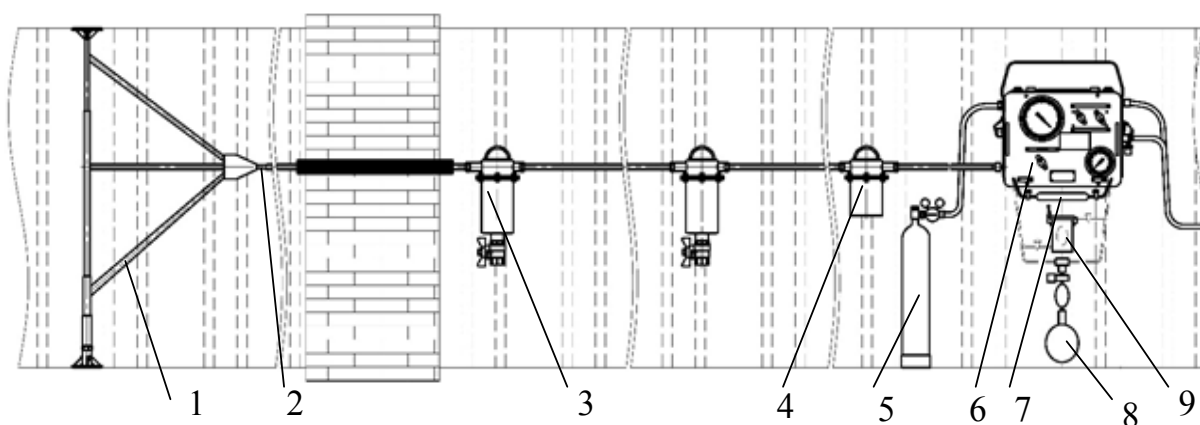


Рис. 1. Рабочий комплект системы:

- 1 – многоточечный пробоотборник; 2 – пробоотборный трубопровод; 3 – влагоотделитель; 4 – осушитель; 5 – баллон (с редуктором) со сжатым воздухом; 6 – установка эжекторная УЭ-1М; 7 – емкость для отбора проб шахтного воздуха (сосуд или камера); 8 – приспособление для набора проб шахтного воздуха в камеру без буферного резервуара (пробонаборного устройства); 9 – буферный резервуар для набора проб шахтного воздуха в камеру (пробонаборное устройство)

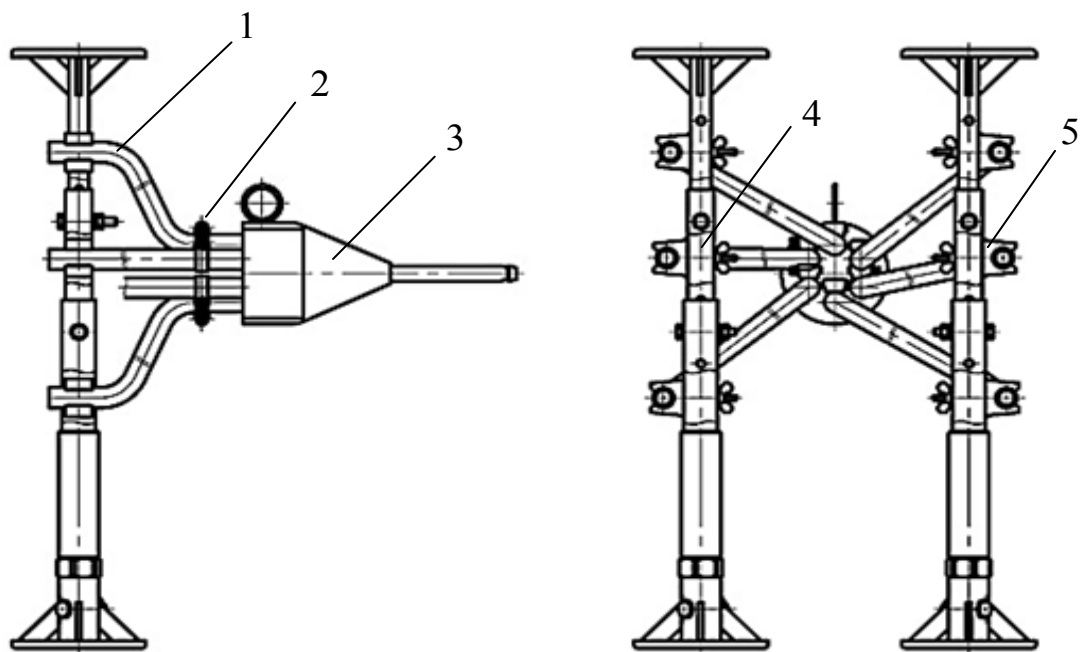


Рис. 2. Многоточечный пробоотборник:

1 – трубка; 2 – соединительные элементы (хомуты); 3 – коллектор;
4 – стойка; 5 – держатель для трубки

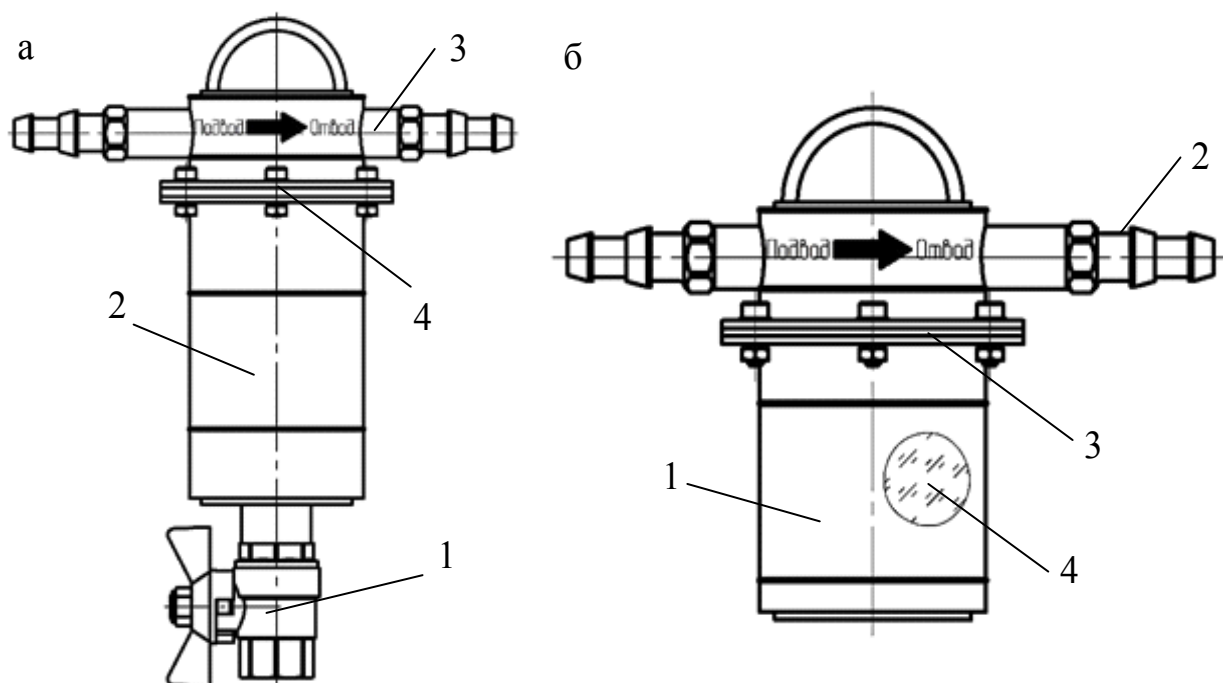


Рис. 3. Фильтрующие элементы:

а – влагоотделитель (1 – шаровый кран; 2 – корпус; 3 – штуцер;
4 – соединительные элементы с прокладкой);
б – осушитель (1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – соединительные элементы
с прокладкой; 4 – технический силикагель)

Основные технические характеристики системы

Показатель	Значение показателя
Питание побудителя расхода (установки эжекторной УЭ-1М*) осуществляется сжатым воздухом от: • пневмосети с давлением, кПа • баллона с редуцированным давлением, кПа	400 ± 100 1500 ± 100
Максимальная длина пробоотборного трубопровода, м	1000
Время откачивания пробы воздуха при длине пробоотборного трубопровода 1000 м с внутренним диаметром 12 мм, мин	12 ± 3
Время набора проб в емкости, мин	$1,5 \pm 0,5$
Время непрерывной работы от баллона (с редуктором) со сжатым воздухом вместимостью: • 40 л, ч • 2 л, мин	8 20
Габариты, мм • многоточечного пробоотборника: • стойки • коллектора • каждого фильтра-влагоотделителя • фильтра-осушителя • установки эжекторной УЭ-1М • буферного резервуара для набора пробы шахтного воздуха в камеру (пробонаборного устройства)	$3580 \times 100 \times 100$ $255 \times 110 \times 80$ $172 \times 230 \times 80$ $172 \times 130 \times 80$ $375 \times 265 \times 165$ $535 \times 400 \times 675$
Масса, кг: • многоточечного пробоотборника • каждого фильтра-влагоотделителя • фильтра-осушителя • установки эжекторной УЭ-1М • буферного резервуара для набора пробы шахтного воздуха в камеру (пробонаборного устройства)	11,50 1,16 0,85 9,50 8,50
Средний полный срок службы системы, годы, не менее	6
* Питание может осуществляться от отдельного насоса (побудителя расхода) с целью увеличения максимальной длины пробоотборного трубопровода более 1000 м. В качестве отдельного насоса может быть использован вакуумный насос ВН-461М с пневматическим или электрическим двигателем во взрывобезопасном исполнении, другой вакуумный насос, имеющий аналогичные характеристики и разрешительную документацию на использование в шахте.	

Время откачивания пробы шахтного воздуха с использованием эжекторной установки УЭ-1М (см. таблицу) рассчитывают по формуле

$$\tau = 0,4 \frac{d^2 l}{Q} \frac{2P - \Delta P}{P},$$

где τ – время транспортирования (откачивания) пробы шахтного воздуха, мин;

d – внутренний диаметр пробоотборного трубопровода, мм;

l – длина пробоотборного трубопровода, м;

Q – производительность эжекторной установки УЭ-1М для пробоотборного трубопровода с параметрами d и l , определяемая ротаметром, л/мин;

P – давление окружающей среды, кПа;

ΔP – разрежение (вакуумметрическое давление) по показаниям вакуумметра, кПа.

На рис. 4 представлены зависимости разрежения ΔP и производительности Q эжекторной установки УЭ-1М от длины пробоотборного трубопровода. При этом разрежение зависит от длины пробоотборного трубопровода и от его исправности (герметичность, отсутствие обрывов, пережатий и засорений).

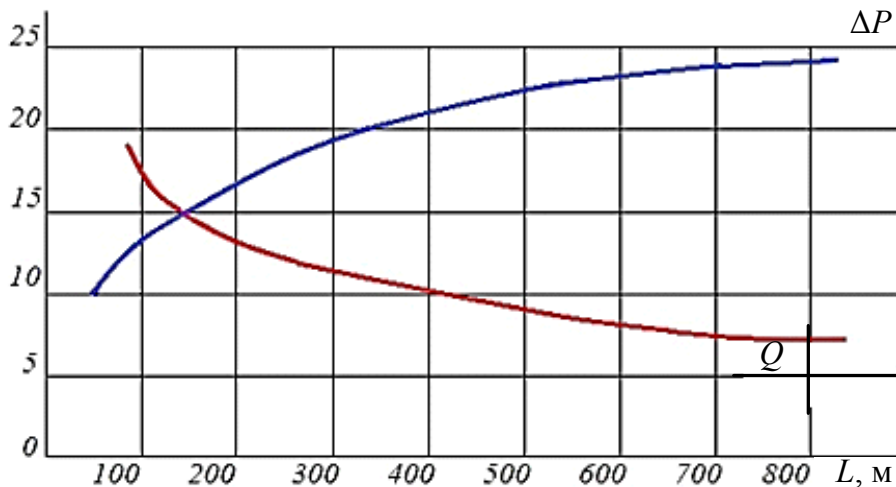


Рис. 4. График расходно-напорных характеристик эжекторной установки УЭ-1М

В качестве пробоотборного рекомендован трубопровод из поливинилхлорида [5] с внутренним диаметром 8...12 мм и толщиной стенки не менее 2 мм. Для соединения отдельных бухт данного трубопровода следует применять конусные штуцеры типа «ерш» (переходные – от 8 до 12 мм) с последующим закреплением концов хомутами. При прокладке по горным выработкам пробоотборный трубопровод необходимо подвешивать к элементам крепи (хомутам, сетке-затяжке) через каждые 10...15 м на высоте 1...1,5 м от

почвы выработки при помощи мягкой проволоки (киперной ленты или др.), исключающей скольжение места увязки и деформацию, избегая пережатий, скручиваний, значительных провисаний, а также резких изгибов пробоотборного трубопровода.

Конструкция многоточечного пробоотборника (см. рис. 2) обеспечивает одновременный отбор проб шахтного воздуха из шести точек по высоте (до 3,5 м) и сечению горной выработки.

Предложенные в настоящей работе фильтрующие элементы (см. рис. 3) позволяют устранить негативное влияние влаги на циркуляцию в системе путем уменьшения ее скапливания в пробоотборном трубопроводе, а также обеспечить достаточное высушивание анализируемых пожарных газов, имеющих нередко весьма высокую влажность, перед их попаданием в емкости для отбора проб шахтного воздуха за счет использования силикагеля технического в качестве осушителя (влагопоглотителя).

Газовый анализ проб, отобранных в сосуды или камеры, может осуществляться в специализированных газоаналитических лабораториях подразделений горноспасательной службы с использованием газоанализаторов «Сигма-СО-602», объемно-оптических газоанализаторов ООГ-2, газовых хроматографов «Хроматэк-Кристалл 5000» и др.

Эффективность и достоверность экспресс-анализа шахтного воздуха непосредственно в шахте (в месте набора проб в сосуды и камеры) с использованием шахтных интерферометров типа ШИ, газоопределителей химических типа ГХ, портативных горноспасательных хроматографов «Поиск-2», которые к тому же имеют возможность непосредственного подключения к эжекторной установке УЭ-1М, и других приборов будет установлена на этапе проведения экспериментальных исследований.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В ходе исследования выполнен анализ, обоснованы параметры и представлены технические характеристики системы, предназначенной для повышения достоверности мониторинга и контроля газовой обстановки при ликвидации пожаров и других аварий в угольных шахтах подразделениями горноспасательной службы.

Результаты проведенного исследования будут служить основой для разработки конструкторской документации и изготовления опытного образца системы.

После изготовления системы на этапе проведения экспериментальных исследований должна быть установлена эффективность и достоверность экспресс-анализа отобранных проб шахтного воздуха с помощью портативных газоаналитических приборов во взрывобезопасном исполнении. В случае положительных результатов предлагаемая в настоящей работе система может быть переименована и названа усовершенствованной системой дистанционного отбора и экспресс-анализа проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ или системой дистанционного мониторинга и контроля шахтной среды (газовой обстановки) при ведении аварийно-спасательных работ в угольных

шахтах после внесения дополнений (в рабочий комплект системы и принципиальную схему), а также изменений в конструкторскую документацию.

Внедрение усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха – один из важных факторов создания безопасных условий труда горноспасателей в шахтах при ликвидации пожаров и других аварий, а также способствует повышению уровня эффективности ведения аварийно-спасательных работ.

Список литературы / References

1. Шелегеда, Б.Г. Тенденции развития угольной промышленности / Б.Г. Шелегеда, Н.В. Погоржельская // Вести Автомобильно-дорожного института. – Донецк, 2017. – № 1(20). – С. 77 – 84.

Shelegeda, B.G., Pogorzhel'skaya, N.V. *Tendentsii razvitiya ugol'noy promyshlennosti* [Coal industry development trends]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [Bulletin of the Automobile engineering institute], Donetsk, 2017, no. 1(20), pp. 77 – 84.

2. Агарков, А.В. Об аварийности в угольных шахтах и применении системы дистанционного контроля состава шахтной среды при проведении горноспасательных работ / А.В. Агарков // Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сборник научных трудов кафедры разработки месторождений полезных ископаемых. – Донецк: ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2019. – № 5. – С. 294 – 313.

Agarkov, A.V. *Ob avariynosti v ugol'nykh shakhtakh i primenenii sistemy distantzionnogo kontrolya sostava shakhtnoy sredy pri provedenii gornospasatel'nykh rabot* [On accident rate in coal mines and application of a remote monitoring system of the mine atmosphere composition during carrying-out the mine-rescue operations]. *Innovatsionnyye tekhnologii razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh: sbornik nauchnykh trudov kafedry razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Innovation technologies of mining the mineral deposits: collection of scientific works of the Department of mining the mineral deposits]. Donetsk, GOU VPO "DONNTU" Press, 2019, no. 5, pp. 294 – 313.

3. Мамаев, В.В. Способы и технические средства дистанционного контроля шахтной среды при ведении аварийно-спасательных работ / В.В. Мамаев, А.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный журнал. – Донецк: ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – № 3(4). – С. 109 – 119.

Mamayev, V.V., Agarkov, A.V. *Sposoby i tekhnicheskiye sredstva distantzionnogo kontrolya shakhtnoy sredy pri vedenii avariyno-spasatel'nykh rabot* [Methods and technical means of the remote mine environment monitoring during carrying-out the emergency and rescue operations]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauchnyy zhurnal* – Fire

and technogenic safety: problems and ways of improvement: scientific journal. Donetsk, GOU VPO "Akademiya grazhdanskoy zashchity" Press, 2019, no. 3(4), pp. 109 – 119.

4. Курбацкий, Е.В. Совершенствование способа дистанционного контроля шахтной среды в изолированных пожарных участках при ведении аварийно-спасательных работ / Е.В. Курбацкий, А.В. Агарков // Донбасс будущего глазами молодых ученых: научно-технический сборник (19 ноября 2019 г.). – Донецк: ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 2019. – С. 93 – 97.

Kurbatskiy, Ye.V., Agarkov, Al.V. *Sovershenstvovaniye sposoba distantzionnogo kontrolya shakhtnoy sredy v izolirovannykh pozharnykh uchastkakh pri vedenii avariyno-spasatel'nykh rabot* [Improvement of the remote mine environment monitoring method in sealed fire sections during carrying-out the emergency and rescue operations]. *Donbass budushchego glazami molodykh uchynykh: nauchno-tekhnicheskiy sbornik (19 noyabrya 2019 g.)* [Donbass of the future through the eyes of young scientists: scientific and technical collection (November 19, 2019)]. Donetsk, GOU VPO "Donetskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet" Press, 2019, pp. 93 – 97.

5. Агарков, А.В. Выбор трубопровода для дистанционного отбора газовых проб при ведении горноспасательных работ / А.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный журнал. – Донецк: ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. – № 1(5). – С. 33 – 39.

Agarkov, Al.V. *Vybor truboprovoda dlya distantzionnogo otbora gazovykh prob pri vedenii gornospasatel'nykh rabot* [Choosing the pipeline for remote taking the gas samples during carrying-out the mine-rescue operations]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauchnyy zhurnal* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk: GOU VPO "Akademiya grazhdanskoy zashchity" Press, 2019, no. 1(5), pp. 33 – 39.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 11.06.2020

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

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

Aleksandr Mikhaylovich Simonov, head of department; e-mail: avrstla@mail.ru;

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, engineer of the 1st category; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru;

Vladislav Gennadiyevich Turchanin, advanced design engineer; e-mail: turchanin_v@ukr.net

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

SYSTEM OF REMOTE COLLECTION OF MINE AIR SAMPLES DURING CARRYING-OUT THE EMERGENCY AND RESCUE OPERATIONS

Purpose. Substantiation of basic parameters of the improved system of remote collection of the mine air samples during carrying-out the emergency and rescue operations that is designed for improvement of reliability of the gas conditions monitoring and control during elimination of fires and other accidents in coal mines by mine-rescue service subdivisions.

Methods. The analytical method of investigation consisting of analysis and processing of the scientific and technical literature as well as the design method in the “Kompas-3D” automatic system have been applied.

Results. The analysis has been conducted, the parameters have been substantiated, and the technical characteristics of the improved system of remote collection of the mine air samples for gas conditions monitoring and control of the accident sections of coal mines have been adduced.

Scientific novelty. The working set of the improved system of remote collection of the mine air samples during carrying-out the emergency and rescue operations by the mine-rescue service subdivisions has been proposed which will permit to take the mine air samples along the height and mine working cross-section of the accident area including the sealed fire one, to eliminate the negative effect of moisture on circulation in the system by decreasing its accumulation in a sampling pipeline as well as to ensure the sufficient drying of the fire gases under analysis which frequently possess high humidity before being pulled into containers for the mine air samples.

Practical value. The results of the conducted investigation serve as a basis for development of the design documentation and manufacture of a prototype model of the improved system of remote collection of the mine air samples during carrying-out the emergency and rescue operations by the mine-rescue service subdivisions.

Keywords: *coal mine; mine-rescue service; accident section; underground fires and explosions; remote collection of mine air samples; gas conditions monitoring and control; ejector installation; emergency and rescue operations.*

УДК 614.842.6:621.314.212

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

Андрей Васильевич Осадчий, ст. науч. сотр.; e-mail: osad4iy@mail.ru;

Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak_ds@rambler.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-41

ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ С МАСЛОНАПОЛНЕННЫМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ

Цель. Проанализировать основные причины возникновения пожаров на промышленных объектах с маслонаполненным оборудованием, изучить варианты развития пожаров и на основании полученных аналитических зависимостей определить средства тушения пожаров на указанных объектах.

Методика. Аналитические исследования и математические расчеты параметров подачи выбранных пожаротушающих средств.

Результаты. Рассмотрены основные сценарии возникновения и развития пожара в силовых масляных трансформаторах, на основании которых разработаны аналитические зависимости по определению времени подачи порошка, его расхода и огнетушащей концентрации в зависимости от объема очага горения; зависимости времени тушения от интенсивности подачи распыленной и тонкораспыленной воды, учитывающей коэффициент использования воды и коэффициент запаса; удельных затрат пенообразования для тушения единицы площади горения.

Научная новизна. Разработана методика расчета параметров пожара в трансформаторной, учтена дополнительная пожарная нагрузка. Разработана модель расчета объема пламени при пожаре.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы в новых научно-технических исследованиях пожаротушения промышленных объектов с маслонаполненным оборудованием, которые будут способствовать снижению материальных потерь вследствие повреждения оборудования и предотвращению в длительных перебоях электроснабжения.

Ключевые слова: маслонаполненное оборудование; горючие жидкости; возгорание; электроэнергия; короткое замыкание.

Постановка проблемы. Энерговооруженность труда постоянно возрастает во всем мире. Увеличивается количество электроэнергии, потребляемой для выработки продукции, ее переработки или утилизации. При этом вероятность возникновения пожаров составляет 10^{-3} в год, что значительно превышает уровень допустимого пожарного риска.

На промышленных объектах эксплуатируют маслонаполненное электрооборудование под напряжением от 220 В до 750 кВ – силовые трансформаторы, автотрансформаторы, шунтирующие и токоограничивающие реакторы, высоковольтные масляные выключатели, масляные вводы, измерительные трансформаторы тока и напряжения и др. В 90 % случаев пожары на объектах с маслонаполненным электрооборудованием связаны с возгоранием трансформаторного масла, которое используется как изолирующая, охлаждающая и дугогасительная среда [1].

Следует учитывать, что согласно физико-химическим свойствам трансформаторного масла температура вспышки плюс 150 °С, низшая теплота сгорания 46,4 МДж/кг, плотность 760 кг/м³, удельная массовая скорость выгорания 0,039 кг/(м²·с).

Масло эксплуатируется в нагретом состоянии, что еще более повышает его пожароопасность. Так, в трансформаторах с системой охлаждения М (естественная циркуляция воздуха и масла) температура верхнего слоя масла может достигать плюс 95 °С [2].

Анализ статистики пожаров в ДНР пока не позволяет сделать однозначные выводы по поводу пожароопасности промышленных объектов с маслonaполненным электрооборудованием, однако опыт других стран указывает на следующее:

- в Российской Федерации с 2005 по 2016 г. произошло более 4000 пожаров в помещениях с маслonaполненным электрооборудованием, что составляет 36,6 % от общего количества пожаров за указанный период [3];

- в США за последние 10 лет произошло 750 аварий на трансформаторах, сопровождающихся пожарами, что причинило ущерб в сотни миллионов долларов, привело к гибели людей, загрязнению окружающей среды и длительным перебоям в электроснабжении.

Пожары на трансформаторных подстанциях приводят не только к материальным потерям вследствие повреждения оборудования и длительным перебоям в электроснабжении, но и как следствие – панике населения.

Таким образом, риск возникновения возгораний и пожаров в помещениях с маслonaполненным электрооборудованием достаточно велик, а возможные последствия пожаров могут достигать колоссальных размеров. Тем не менее профилактике пожаров на маслonaполненном электрооборудовании, противопожарным мерам уделено недостаточно внимания. Кардинальным решением проблемы была бы замена маслonaполненного электрооборудования пожаробезопасным, сухим оборудованием, но его стоимость в настоящее время в 2...2,5 раза превышает стоимость маслonaполненного.

Необходимо обязательное оборудование автоматических систем пожаротушения на объектах с маслonaполненным электрооборудованием для тушения пожаров в начальной стадии.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] были уточнены требования к категорированию помещений с маслonaполненным электрооборудованием, однако основным горючим материалом считают только трансформаторное масло, а наличие значительного объема кабельной продукции не учитывают. Это приводит к значительному завышению критической массы масла в единице оборудования, что позволяло руководителям предприятий на легитимной основе обосновывать нецелесообразность применения автоматической пожарной системы для помещений категории В.

В работе [1] получена расчетная зависимость для определения критического объема масла в единице оборудования, значение которой в 10 раз меньше нормативного значения.

В работе [4] дана оценка пожароопасности высоковольтного маслонаполненного оборудования шахтных электроподстанций и предложено включение в нормативную документацию требования об их обязательной автоматической противопожарной защите.

В работах [5, 6] проведено исследование пожарной безопасности маслонаполненного электрооборудования и получены пути ее повышения за счет своевременного выявления дефектов.

В работах [3, 5, 7] рассмотрены возможные сценарии возникновения и развития пожара в помещениях с маслонаполненным электрооборудованием, однако модели этих пожаров и расчет их параметров отсутствуют.

Цель исследования – изучить основные причины возникновения и варианты развития пожаров в силовых масляных трансформаторах и на основе выявленных характерных особенностей этих пожаров разработать рекомендации по их ликвидации различными огнетушащими средствами.

Материалы и результаты исследования. В работе рассмотрен один из наиболее пожароопасных видов маслонаполненного электрооборудования – силовые масляные трансформаторы.

Для локализации пожаров нормативными документами по пожарной безопасности предусмотрены (в соответствии с Правилами устройства электроустановок):

- автоматическая установка пожаротушения;
- маслоприемное устройство, размещаемое непосредственно под трансформатором;
- маслосборное устройство, размещаемое на площадке для трансформатора, в трансформаторном помещении (камере) для сбора пролитого масла;
- система маслоотводов (подземная прокладка), предназначенная для отвода масла из маслоприемника в маслосборники;
- обваловка дверных проемов в трансформаторную;
- отделение трансформаторов противопожарной стеной.

Также большую роль в тушении пожаров играют следующие факторы:

- наличие заранее разработанного плана пожаротушения, в котором определены особенности использования сил и средств пожарно-спасательных подразделений;
- действия персонала промышленного объекта при возникновении пожара, порядок их взаимодействия с личным составом пожарных подразделений;
- определение характера повреждения трансформатора и вероятность растекания горючей жидкости;
- опасность проникновения горящего масла в соседние помещения, в которых возможно размещение пожароопасного оборудования или материалов.

Для тушения пожаров на маслонаполненном электрооборудовании используют следующие огнетушащие вещества: распыленная и тонкораспыленная вода; огнетушащий порошок, воздушно-механическая и компрессионная пена.

Известна оптимальная интенсивность подачи огнетушащих веществ:

- распыленная вода $0,2 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
- порошковые составы $0,3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
- раствор пенообразователя низкой и высокой кратности $0,15 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Рассмотрим наихудший вариант, при котором бак трансформатора разрушен, масло вытекло и растеклось по полу помещения. Эмпирические данные [8] свидетельствуют, что толщина пленки растекания трансформаторного масла δ , мм, на поверхности стекла $0,09025$ мм. Тогда максимальная площадь растекания $S_{\max}$, м^2 , всего объема масла из трансформатора равна

$$S_{\max} = V / \delta, \quad (1)$$

где V – объем масла в трансформаторе, л.

Например для трансформатора ТМГ-25/15-У1 с запасом масла 63 л $S_{\max}$ равна $918,5 \text{ м}^2$, что значительно превышает возможную площадь помещения трансформаторной. Следовательно, можно полагать, что площадь растекания масла при пожаре равна площади замкнутого помещения $S_{\text{п}}$, м^2 .

Результаты работы [9] свидетельствуют о том, что примерно через 1 мин после начала пожара горящая область распространяется на всю площадь разлива. Таким образом, можно предположить, что к моменту начала тушения огнем охвачена вся площадь помещения.

Для оценки параметров пожара (максимальная и текущая температура) воспользуемся разработанной НИИГД «Респиратор» методикой.

Масса пожарной нагрузки в помещении трансформаторной $m_{\text{пож}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$:

$$m_{\text{пож}} = \frac{0,001V\rho_{\text{м}} + m_k}{S_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность масла, $\text{кг}/\text{м}^3$;

m_k – суммарная масса горючего материала кабелей в помещении трансформаторной, кг ;

$$m_k = \sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,07)l_k; \quad (3)$$

N – количество кабелей в трансформаторной;

S_k – площадь сечения основной жилы k -го кабеля, мм^2 ;

l_k – длина k -го кабеля, м.

Максимальная температура в трансформаторной $T_{\max}$, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\max} = T_0 + \frac{1300m_{\text{пож}}}{7 + m_{\text{пож}}}. \quad (4)$$

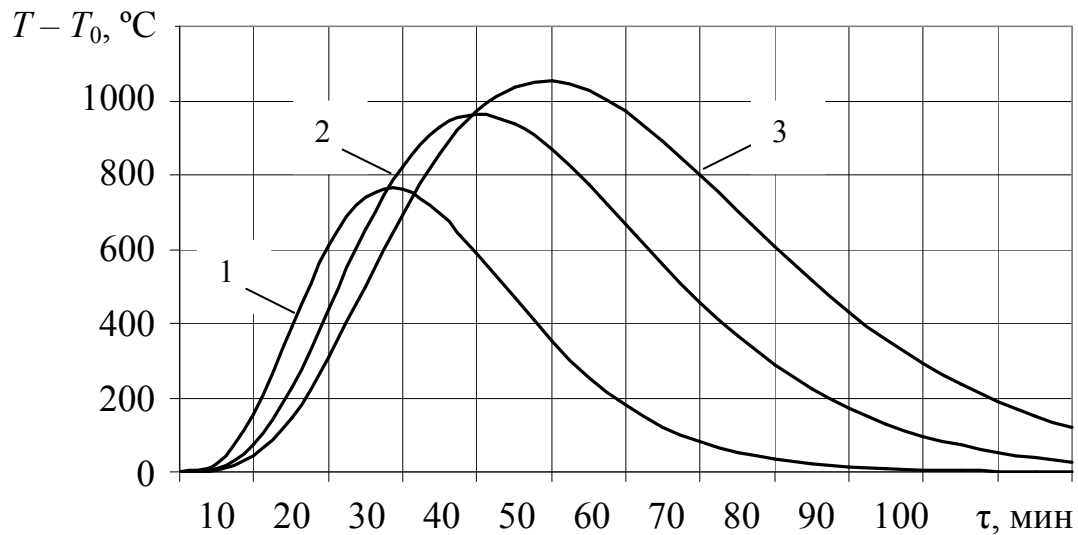
Время достижения максимума температуры в трансформаторе $\tau_{\max}$, мин:

$$\tau_{\max} = 9\sqrt{m_{\text{пож}}} . \quad (5)$$

Текущая температура T , °С, в трансформаторной на момент времени τ , мин:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}} \right)^4 \exp \left[4 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\max}} \right) \right], \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура в помещении трансформаторной, °С.



Динамика развития очага пожара в трансформаторной при различных
пожарных нагрузках:

1 – 10 кг/м²; 2 – 20 кг/м²; 3 – 30 кг/м²

Для определения расхода огнетушащего порошка необходимо знать объем пламени $V_{\text{пл}}$, м³, для тушения которого необходимо создать соответствующую огнетушащую концентрацию. За площадь горения $S_{\text{г}}$, м², принимается горизонтальная проекция площади очага, равная площади помещения (объекта) $S_{\text{п}}$, м², в котором находится трансформатор.

Согласно работе [10] восходящий над пламенем диффузионный поток можно разделить на три зоны. Первая зона, ближайшая к поверхности горячей жидкости, соответствует непрерывному пламени и характеризуется постоянным по высоте приращением температуры по оси. Граница этой зоны определяется по зависимости

$$z = 0,08Q^{215}, \quad (7)$$

где Q – тепловая мощность пожара, определяемая по формуле

$$Q = m Q_n^r S_r, \quad (8)$$

m – массовая скорость выгорания кг/(м²·с);

Q_n^r – низшая теплота сгорания, Дж/кг.

Для трансформаторного масла получаем

$$Q = 181 \cdot 10^6 S_n^{1,4}. \quad (9)$$

При турбулентном режиме горения можно принять, что объем пламени имеет цилиндрическую форму. Тогда, подставив (9) в (1), получим

$$V_{пл} = 25,5 S_n^{1,4}. \quad (10)$$

Время подачи порошка τ_p , с, его расход q_p , кг/с, объем очага горения $V_{пл}$, м³, и огнетушащая концентрация порошка $c_{огн}$, кг/м³, связаны соотношением

$$\tau_p q_p = c_{огн} V_{пл}. \quad (11)$$

Отсюда общий расход порошка, необходимый для ликвидации пламенного горения:

$$M = 25,5 c_{огн} S_n^{1,4}. \quad (12)$$

Теперь рассмотрим параметры тушения масла распыленной водой. Трансформаторное масло относится к вязким горючим жидкостям с температурой вспышки более 100 °С и высокой температурой кипения.

Установлено, что для таких жидкостей основную роль при тушении пламени играет охлаждение их поверхности. Процесс тушения может быть представлен следующим образом: капли воды, испаряясь на поверхности горячей жидкости, отбирают от неё теплоту. Это приводит к понижению температуры жидкости и как следствие к уменьшению количества паров горючего, поступающего в зону горения. В свою очередь, снижение концентрации паров топлива вызывает уменьшение скорости реакций горения, тепловыделения и температуры пламени. При понижении температуры поверхности горючей жидкости до некоторой величины T_n пламя затухает.

Несмотря на многочисленные исследования и большой опыт применения воды для тушения пожаров, зависимость времени тушения горючих жидкостей от интенсивности орошения водой заданной площади горения отсутствует. Указанная зависимость может быть определена экспериментально при проведении полномасштабных натурных испытаний, что требует значительных материальных затрат, большого количества горючих жидкостей и выполнения длительных подготовительных операций.

Воспользуемся для расчета этой зависимости методикой, предложенной в работе [11]. Известно, что ликвидация пламени горючих жидкостей достигается при критической интенсивности подачи воды $I_{кр}$, кг/(м²·с), которая больше некоторого предельного значения. Критическая интенсивность $I_{кр}^*$, кг/(м²·с), учитывающая коэффициент использования воды и коэффициент запаса, равный 1,3, определяется по зависимости

$$I_{кр}^* = 220m_{г}^2 \sqrt[3]{\frac{m_{г}D}{\nu_{ж}\rho_{ж}} \left(\frac{\rho_{ж}T_{кип}}{\rho_{в}(T_{ср} - T_{в})} \right)^{-2}}, \quad (13)$$

где $m_{г}^2$ – массовая скорость выгорания горючей жидкости, кг/(м²·с);

D – средний диаметр капли в струе распыленной воды, м;

$\nu_{ж}$ – динамическая вязкость горючей жидкости, Па·с;

$\rho_{ж}$ – плотность горючей жидкости, кг/м³;

$T_{кип}$ – температура кипения горючей жидкости, °С;

$\rho_{в}$ – плотность воды, кг/м³;

$T_{ср}$ – средняя температура (между температурами кипения и вспышки), °С;

$$T_{ср} = (T_{кип} + T_{всп})/2;$$

$T_{всп}$ – температура вспышки горючей жидкости, °С;

$T_{в}$ – начальная температура капель воды, °С.

Зависимость времени тушения τ , с, от интенсивности подачи воды определяют по формуле

$$\frac{7}{11}t = -\sqrt{\frac{I_{кр}^*}{I}} - \ln \left(1 - \sqrt{\frac{I_{кр}^*}{I}} \right), \quad (14)$$

где t – безразмерное время;

$$t = \frac{m^2 c_{ж}}{\rho_{ж} \lambda_{ж}} \tau_{т}, \quad (15)$$

$c_{ж}$ – теплоемкость горючей жидкости, кДж/(кг·К);

$\lambda_{ж}$ – теплопроводность горючей жидкости, Вт/(кг·К);

$\tau_{т}$ – текущее время, с.

Подставляя выражение $\tau_{т}$ из формулы (15) в уравнение (14), получим

$$\tau_{т} = -\frac{11}{7} \frac{\rho_{ж} \lambda_{ж}}{m^2 c_{ж}} \sqrt{\frac{I_{кр}^*}{I}} t - \frac{\rho_{ж} \lambda_{ж}}{m^2 c_{ж}} \ln \left(1 - \sqrt{\frac{I_{кр}^*}{I}} \right). \quad (16)$$

Аналогичное соотношение может быть получено для пены.

Тушение горящих нефтепродуктов осуществляется подачей пены сверху. Процесс тушения может быть описан с помощью уравнения материального баланса, заключающегося в равенстве приращенного объема поданной пены сумме приращений накопленной и разрушенной пены за элементарный промежуток времени.

В модели, разработанной Ф.А. Шароварниковым, зависимость времени тушения $\tau_{\text{вт}}$, с, от интенсивности подачи пены выглядит следующим образом:

$$\tau_{\text{вт}} = \frac{\rho_f h_0}{2I_{\text{крп}}} - \frac{I + I_{\text{крп}}}{I - I_{\text{крп}}}, \quad (17)$$

где ρ_f – плотность пены, кг/м³;

h_0 – минимальная толщина пены, мм, зависит от природы пенообразователя, дисперсности и кратности пены;

$I_{\text{крп}}$ – критическая интенсивность подачи пены, кг/(м²·с), определяют по формуле

$$I_{\text{крп}} = \frac{mQ_{\text{н}}^{\Gamma}}{zQ_{\text{в}}}, \quad (18)$$

z – коэффициент формы пенных пузырьков;

$Q_{\text{в}}$ – удельная теплота испарения воды, Дж/(кг·К).

Тогда удельные затраты пенообразования G , кг/м², для тушения единицы площади горения

$$G = I\tau_{\text{вт}} = \frac{\tau_0 I(I + I_{\text{крп}})}{I - I_{\text{крп}}}; \quad (19)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho_f h_0}{2I_{\text{крп}}}. \quad (20)$$

Выводы. Рассмотрены причины возникновения пожаров на промышленных объектах с маслonaполненным электрооборудованием. На примере силовых масляных трансформаторов проанализированы развитие и тушение пожаров трансформаторов с использованием огнетушащего порошка, распыленной и тонкораспыленной воды, пены.

Получены соотношения для расчета необходимого количества порошка, подачи воды и пены для эффективного тушения горения пролитого трансформаторного масла, исходя из его теплофизических параметров. Использование этих соотношений позволит решать практические задачи тушения пожаров на промышленных объектах с маслonaполненным электрооборудованием.

Проблема пожаротушения на промышленных объектах с маслonaполненным электрооборудованием остается актуальной и в настоящее время, поэтому необходимо проводить новые научно-технические исследования в области пожаротушения указанных объектов.

Список литературы / References

1. Богомаз, А.М. Пожароопасность помещений с маслonaполненным оборудованием / А.М. Богомаз, А.В. Осадчий, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 4(54). – С. 14 – 20.

Bogomaz, A.M., Osadchiy, A.V., Dikenshteyn, I.F. *Pozharoopasnost' pomeshcheniy s maslonapolnennym oborudovaniyem* [Fire safety of premises with oil-filled equipment]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific and technical journal]. Donetsk, 2017, no. 4(54), pp. 14 – 20.

2. Кулаков, О.В. Особливості категорювання за вибухопожежною та пожежною небезпекою комплектних трансформаторних підстанцій зовнішньої установки / О.В. Кулаков // Проблеми пожежної безпеки: сб. науч. тр. – Харьков, 2013. – № 33. – С. 93 – 97.

Kulakov, O.V. *Osoblyvosti katehoriuvannia za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu komplektnykh transformatornykh pidstantsii zovnishn'oi ustanovky* [Distinctive features of categorization according to the explosion and fire hazard of packaged transformer sub-stations, outdoor installation type. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [Problems of fire safety: collection of scientific papers]. Kharkov, 2013, no. 33, pp. 93 – 97.

3. Варнакова, Д.А. Тушение пожаров на трансформаторных подстанциях // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2016. – Вып. № 6(70). URL: <http://esp.l.mos.ru/ttb> (дата обращения: 11.12.2019).

Varnakova, D.A. *Tusheniye pozharov na transformatornykh podstantsiyakh* [Extinguishing the fires at transformer sub-stations]. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti" – "Technogenic safety technologies": online-magazine*, 2016, issue 6(70). Available at: <http://esp.l.mos.ru/ttb> (accessed: 11.12.2019).

4. О пожароопасности шахтных электроподстанций / В.В. Мамаев, И.Ф. Дикенштейн, В.В. Гуржий, А.А. Диденко // Уголь Украины. – 2015. – № 3 – 4. – С. 48 – 50.

Mamayev, V.V., Dikenshteyn, I.F., Gurzhiy, V.V., Didenko, A.A. *O pozharoopasnosti shakhtnykh elektropodstantsiy* [On fire hazard of mine electric sub-stations]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2015, vol. 15, nos 3 – 4, pp. 48 – 50.

5. Назарычев, А.Н. Повышение пожарной безопасности высоковольтного маслonaполненного электрооборудования на основе выявления комбинированных дефектов / А.Н. Назарычев, С.Н. Животягина, И.Ю. Зеленцов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 8. – С. 69 – 74.

Nazarychev, A.N., Zhivotyagina S.N., Zelentsov, I.Yu. *Povysheniye pozharной bezopasnosti vysokovol'tnogo maslonapolnennogo elektrooborudovaniya na osnove vyyavleniya kombinirovannykh defektov* [Improvement of fire safety of the high-voltage oil-filled electric equipment on the basis of detection of combined defects]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21 no. 8, pp. 69 – 74.

6. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ / Б.А. Панин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 47 – 50.

Panin, B.A., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. et al. *O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniyem 110–500 kV* [On damages of power transformers by voltage of 110–500 kV]. *Elektricheskiye stantsii – Electric stations*, 2001, no. 9, pp. 47 – 50.

7. Рожков, А.В. Экспериментальное исследование тушения масляных силовых трансформаторов / А.В. Рожков, Д.А. Передня, О.А. Дюжаков // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – Вып. 2(84). – С. 27 – 34.

Rozhkov, A.V., Perednya, D.A., Dyuzhakov, O.A. *Eksperimental'noye issledovaniye tusheniya maslyanykh silovykh transformatorov* [Experimental investigation of extinguishing the oil-immersed power transformers]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti – Technologies of technogenic safety*, 2019, issue 2(84), pp. 27 – 34.

8. Горпинич, И.А. Методы оценки площади разлива горючей жидкости при аварии железнодорожной цистерны / И.А. Горпинич // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – № 32. – С. 44 – 47.

Gorpinich, I.A. *Metody otsenki ploshchadi razliva goryuchey zhidkosti pri avarii zheleznodorozhnoy tsisterny* [Methods of assessment of the flammable liquid spill area during a rail tank car accident]. *Problemy pozharной bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [Problems of fire safety: collection of scientific papers]. Kharkov, 2012, no. 32, pp. 44 – 47.

9. Горпинич, И.А. Моделирование горения жидкости, растекающейся по горизонтальной поверхности / И.А. Горпинич // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – № 33. – С. 45 – 48.

Gorpinich, I.A. *Modelirovaniye gorennya zhidkosti, rastekayushcheysya po gorizontāl'noy poverkhnosti* [Modeling of combustion of a liquid spreading over a horizontal surface]. *Problemy pozharной bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [Problems of fire safety: collection of scientific papers]. Kharkov, 2012, no. 33, pp. 45 – 48.

10. Думилин, А.И. Тушение пламени горючих жидкостей охлаждением их поверхности распыленной водой / А.И. Думилин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 8. – С. 81 – 84.

Dumilin, A.I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey okhlazhdeniyem ikh poverkhnosti raspylyennoy vodoy* [Extinguishing the flame of flammable liquids by cooling their surface with sprayed water]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 81 – 84.

11. Думилин, А.И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой / А.И. Думилин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 4. – С. 85 – 90.

Dumilin, A.I. *Parametry tusheniya plameni goryuchikh zhidkostey raspylyennoy vodoy* [Parameters of extinguishing the flame of flammable liquids by sprayed water]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 85 – 90.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 18.06.2020

Andrey Yuryevich Kolyada, head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;
Andrey Vasilyevich Osadchiy, senior scientific associate; e-mail: osad4iy@mail.ru;
Dmitry Sergeyevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-41

FIGHTING THE FIRES AT INDUSTRIAL OBJECTS WITH OIL-FILLED ELECTRIC EQUIPMENT

Purpose. To analyze main causes of the fire outbreaks at industrial objects with the oil-filled equipment, to study fire spreading scenarios and to determine the fire-fighting means at the given objects on the basis of obtained analytical dependences.

Methodology. Analytical investigations and mathematical calculations of parameters of delivering the chosen fire-extinguishing means.

Results. The basic scenarios of the outbreak and spread of the fire in power oil-immersed transformers have been studied. Based on them the analytical dependences have been developed for determination of time of delivering the powder, its flow rate and inerting concentration depending on the volume of a seat of fire; dependences of the extinguishing time on the intensity of delivering the water mist and water spray with the allowance the water use ratio and the safety coefficient; specific costs of foam generation for extinguishing a unit of the burning area.

Scientific novelty. The methodology of calculation of fire parameters in a transformer room has been developed; the extra fire load has been taken into account. The model of flame volume calculation during a fire has been created.

Practical value. The obtained results may be applied in the new scientific and technical investigations of the fire-extinguishing at the industrial objects with the oil-filled equipment which will contribute to reduction of material losses caused by damage of the equipment and prevention of prolonged power supply interruptions.

Keywords: *oil-filled equipment; flammable liquids; combustion; electric power; short circuit.*

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;

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*

ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. Разработка полимерного вспучивающегося материала для огнезащиты строительных конструкций.

Методы. Аналитический обзор огнезащитных средств, повышающих предел огнестойкости строительных конструкций. Экспериментальное определение кратности термического расширения полимерной вспучивающейся композиции.

Результаты. Разработан рецептурный состав полимерного вспучивающегося материала для огнезащиты строительных конструкций. Подбор состава огнезащитного материала проводился по схеме полимерное связующее – вспучивающаяся добавка – минеральный наполнитель. В качестве связующего взяты резорциноформальдегидная и карбамидоформальдегидная смолы. Оптимальным агентом-газообразователем выбран карбамид – наиболее распространенное и относительно недорогое химическое соединение, которое дополнительно обладает свойствами антипирена. Показано, что аналогичным двойственным эффектом обладают фосфаты аммония – в качестве отвердителя полимерного связующего и антипирена. Определена кратность термического расширения полимерного вспучивающегося материала.

Научная новизна. Разработан негорючий вспучивающийся при термическом воздействии полифункциональный материал для предупреждения пожаров путем повышения огнестойкости, дымо- и газонепроницаемости строительных конструкций.

Практическая значимость. Разработанный огнезащитный полимерный материал способен вспучиваться в условиях пожара и образовывать прочный защитный слой с низкой теплопроводностью. Эффективность материала термически расширяющегося типа определяется тем, что для защиты от пожаров достаточно нанесения покрытия толщиной от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Применение огнезащитного полимерного материала позволит предотвратить или сократить распространение огня, дыма и тем самым повысить пожарную безопасность объектов.

Ключевые слова: *вспучивающийся полимерный материал; кратность термического расширения; огнезащита; огнезащитная эффективность; пенококс.*

Постановка проблемы. За последние годы наблюдается, к сожалению, устойчивая тенденция увеличения количества пожаров, которые причиняют человечеству огромный материальный ущерб, но гораздо более страшен ущерб, причиняемый жизни и здоровью людей. Наиболее сильное психологическое воздействие на людей во время пожара оказывает задымленность помещения, а токсичные компоненты пожарных газов, выделяющиеся в больших объемах при горении, представляют серьезную экологическую угрозу окружающей среде и могут привести к трагическим последствиям. Поэтому мероприятия по профилактике возникновения и развития пожаров всегда остаются актуальными. Один из эффективных способов пожарной защиты и повышения

экологической безопасности объектов заключается в применении специальных полимерных материалов полифункционального назначения (рис. 1).



Рис. 1. Схема применения полимерного материала

До недавнего времени основу огнезащитных материалов составляли самозатухающие составы, содержащие хлор, бром, их производные, тяжелые и переходные металлы как специальные добавки для снижения склонности материалов к горению. Характерная особенность горения подобных огнезащитных материалов заключается в образовании опасных токсичных продуктов [1]. По этой причине такие составы не нашли широкого практического применения. Один из наиболее перспективных путей решения проблемы – разработка огнезащитных материалов с минимальным негативным влиянием на людей и экологическую обстановку.

Анализ последних исследований. Большой вклад в изучение огнезащитных составов внесли Т.Ю. Еремина [2], О.А. Зыбина [3], Д.Е. Завьялов [4 – 5] и другие исследователи. Однако ряд задач (огнезащитная эффективность, адгезия, механическая прочность вспененного кокса, токсичность исходных компонентов и др.) остался нерешенным. Поэтому разработка эффективных огнезащитных покрытий остается актуальной задачей.

Цель работы – создание полимерного вспучивающегося материала для огнезащиты строительных конструкций.

Изложение основного материала. Основные задачи при ликвидации пожаров сводятся к ограничению доступа кислорода к очагу горения, его охлаждению, прекращению цепных процессов горения, защите от токсичных компонентов дыма и пожарных газов. Детально остановимся на разработке и применении полимерного вспучивающегося материала для профилактики пожаров и борьбы с ними. Основными составляющими такой композиции, по данным многочисленных литературных публикаций и результатов экспериментальных исследований, должны быть следующие функциональные составляющие: полимерное связующее, агент-газообразователь, антипирены, стабилизаторы вспененного слоя, красители, наполнители, отвердители и т.д. При обычных условиях эксплуатации вспучивающаяся полимерная композиция представляет собой тонкослойное полимерное покрытие, которое выполняет декоративно-защитную функцию. При повышении температуры полимерное связующее и вспенивающийся агент размягчаются. Одновременно происходит разложение газообразователя с генерированием большого количества газов. Толщина покрытия при этом увеличивается за счет образования слоя твердого прочного вспененного материала с низкой теплопроводностью (рис. 2).

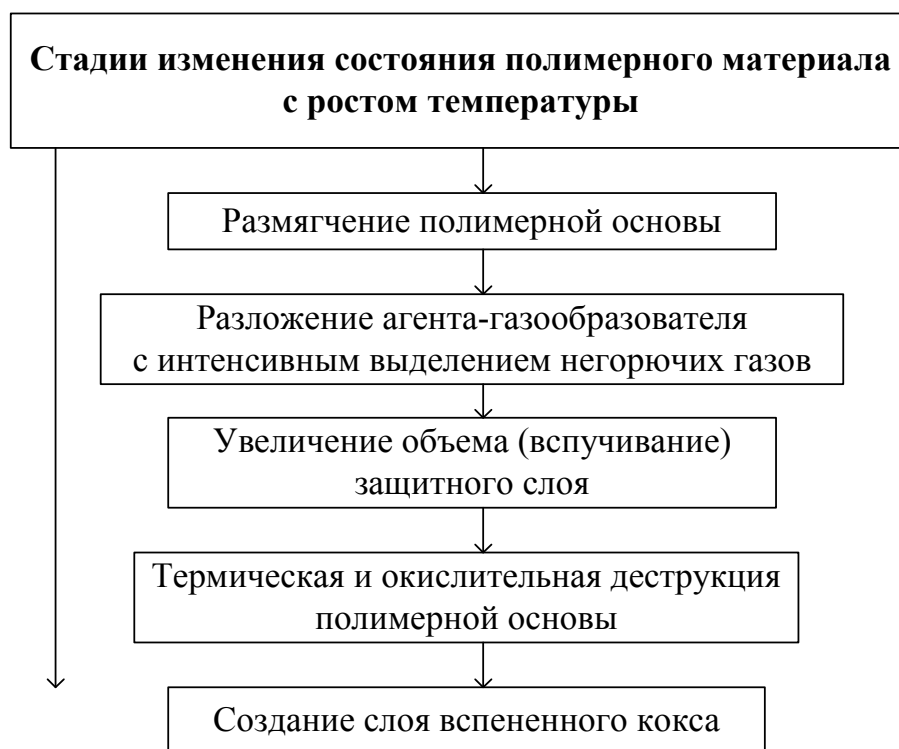


Рис. 2. Механизм действия полимерного вспучивающегося материала

Образующийся слой пены покрывает защищаемые поверхности, заполняет щели и отверстия, изолируя очаг пожара. Представленный механизм действия полимерного вспучивающегося материала предъявляет следующие требования к полимерному связующему:

- температура размягчения и вспенивания должна определяться свойствами защищаемой поверхности (металл, древесина, пластик и др.);
- удовлетворительная адгезия к защищаемой поверхности;

- пониженная горючесть;
- возможность использования доступного недефицитного сырья.

Технологические требования к самой полимерной вспучивающейся композиции предусматривают:

- возможность хранения исходных компонентов и готовой продукции;
- удобство нанесения;
- водостойкость;
- невысокую температуру пленкообразования;
- быстрый темп отверждения покрытия после нанесения (высыхание);
- отсутствие коррозии металлической поверхности.

Результаты экспериментов показали, что наиболее полно предъявляемым требованиям отвечает полимерное связующее, состоящее из карбонизирующихся смол – резорциноформальдегидной и карбамидоформальдегидной.

В этом случае размягчение полимерной составляющей происходит в температурном интервале 75...155 °С, что позволило оценить примерное значение температуры разложения агента-газообразователя, которая в соответствии с данными работы [6] должна быть несколько выше температуры размягчения полимерного связующего.

Химическое действие агентов-газообразователей основано на их разложении при определенной температуре и выделении негорючих, обладающих ингибирующими свойствами, газообразных продуктов разложения (см. таблицу).

Основные вспенивающие агенты

Соединение	Химическая формула	Газообразные продукты разложения	Температура начала термической деструкции, °С
Меламин	$C_3H_6N_6$	Аммиак (NH_3), диоксид углерода (CO_2), пары воды (H_2O)	300 (345)
Хлористые парафины	$C_nH_{2n+2-x}Cl_x$, где $n = 10...30$ (число атомов углерода), $x = 18...23$ (число атомов хлора)	Хлористый водород (HCl), диоксид углерода, пары воды	160...350
Глицин	$C_2H_5NO_2$	Аммиак, диоксид углерода, пары воды	233
Гуанидин	CH_5N_3	Аммиак, диоксид углерода, пары воды	160
Карбамид	$(NH_2)_2CO$	Аммиак, диоксид углерода, пары воды	130

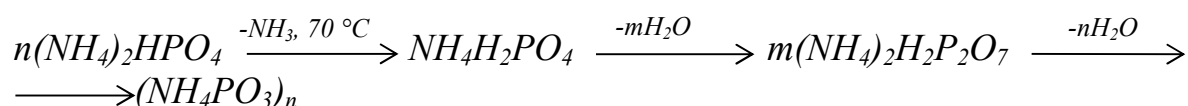
Для разработки полимерного вспучивающегося материала оптимальным агентом-газообразователем выбран карбамид (мочевина) – наиболее

распространенное и относительно недорогое химическое соединение. Выбор специальной добавки обусловлен тем, что карбамид дополнительно обладает свойствами антипирена, что позволило решить следующие задачи:

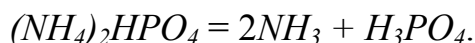
- ингибировать реакцию горения;
- уменьшить долю возвращенной теплоты горения;
- достичь образования менее горючих и токсичных продуктов пиролиза;
- снизить скорость диффузии горючих продуктов пиролиза к фронту пламени.

В условиях пожара опасность представляют не только горючие материалы (древесина, пластик, ткани и др.), но и металлические конструкции. Под действием высоких температур пламени или интенсивных тепловых потоков металл нагревается и теряет прочностные свойства при превышении определенных температур. Сочетание тепловых и механических нагрузок приводит к деформации и разрушению металлических конструкций, что способствует распространению пожара. Поэтому нанесение на поверхность металлических конструкций огнестойких вспучивающихся покрытий позволяет сохранить прочностные свойства защищаемого материала на период тушения пожара.

При разработке полимерного вспучивающегося материала для снижения затрат использованы ингредиенты, которые обладают полифункциональными свойствами. Так, карбамид выступает в роли химического агента-газообразователя и одновременно антипирена. В результате реакции термического разложения образуются молекулы диоксида углерода и аммиака – негорючих соединений. Аналогичным двойственным эффектом обладают в качестве отвердителя полимерного связующего фосфаты аммония, разложение которых под воздействием теплоты происходит по следующей схеме [1]:



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



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

Для оценки оптимального рецептурного состава полимерного вспучивающегося материала использовали кратность термического расширения $K_{\text{тр}}$, которую рассчитывали по формуле

$$K_{\text{тр}} = h_k / h_0,$$

где h_0 и h_k – высота защитного слоя полимерного материала до и после термического расширения при определенной температуре соответственно, мм.

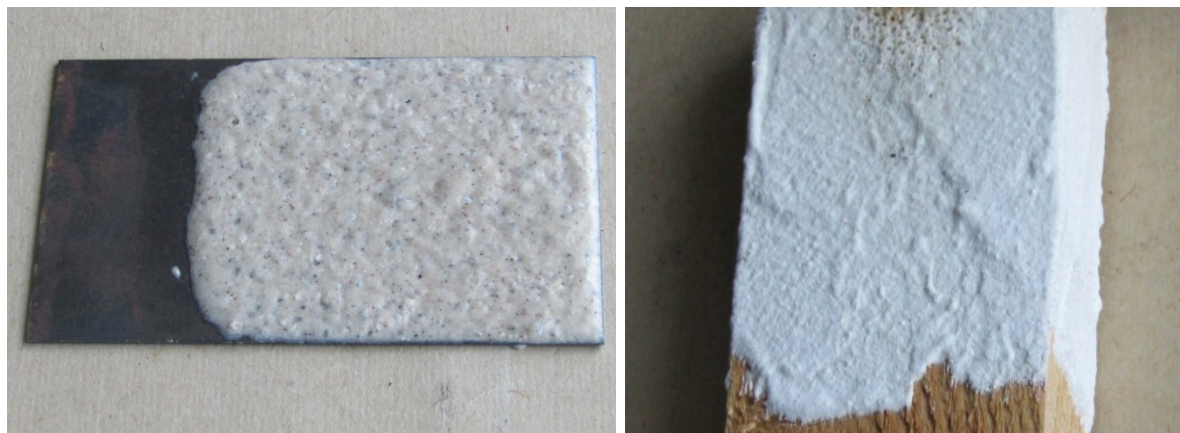
Кратность термического расширения при увеличении температуры от 100 до 300 °С возрастает в 10 раз. Такое количество полученного защитного слоя вспененного кокса может создать эффективную преграду на пути развития процесса горения.

Разработанный полимерный материал готовят из двух составляющих:

- составляющая А – полимерное связующее и агент-газообразователь;
- составляющая Б – водный раствор отвердителя (аммонийные соли фосфорной кислоты).

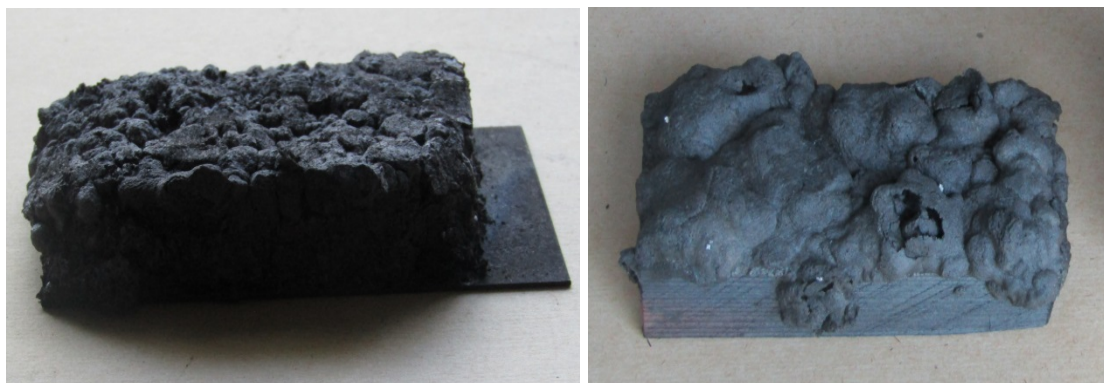
Причем выбор рабочей концентрации отвердителя прямо связан со временем живучести (временем отверждения) и соответственно временем высыхания огнезащитного материала. После смешивания составляющих А и Б и тщательного их перемешивания полимерный материал готов к применению. Для повышения огнестойкости строительной конструкции полимерный материал наносится на защищаемую поверхность в виде тонкого слоя (до 1,5 мм).

После высыхания слоя можно повторно нанести огнезащитный материал на защищаемую поверхность. В обычных условиях эксплуатации полимерный вспучивающийся материал находится в состоянии ожидания (рис. 3).



а
б
Рис. 3. Защитный слой полимерного материала на металле (а)
и древесине (б) до термического воздействия

Под действием тепловых потоков полимерный материал начинает выполнять защитные функции по вышепоказанному механизму (см. рис. 2), что позволяет применять его для повышения огнестойкости и обеспечения дымо- и газонепроницаемости металлических и деревянных строительных конструкций (рис. 4).



а

б

Рис. 4. Защитный слой полимерного материала на металле (а) и древесине (б) после термического воздействия

Вывод. Разработан полимерный полифункциональный материал, с помощью которого возможно повышение пожарной безопасности объектов, профилактика пожаров и снижение риска их возникновения за счет повышения огнестойкости, обеспечения дымо- и газонепроницаемости деревянных и металлических строительных конструкций.

Список литературы / References

1. Ненахов, С.А. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония: литературный обзор / С.А. Ненахов, В.П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 8. – С. 11 – 58.

Nenakhov, S.A., Pimenova, V.P. *Fiziko-khimiya vspenivayushchikhsya ognezashitnykh pokrytiy na osnove polifosfata ammoniya: literaturnyy obzor* [Physical chemistry of foaming fire-retardant coats, ammonium polyphosphate based: literature survey]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2010, no. 8, pp. 11 – 58.

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

Yeryomina, T.Yu., Bessonov, N.M. *Model' otsenki ognezashchitnoy effektivnosti vspuchivayushchikhsya vodosoderzhashchikh sostavov* [Model of evaluation of the fire-retardant effectiveness of blowing aqueous compositions]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2000, no. 3, pp. 17 – 20.

3. Зыбина, О.А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.06 / Ольга Александровна Зыбина. – Санкт-Петербург, 2015. – 260 с.

Zybina, O.A. *Teoreticheskiye printsipy i tekhnologiya ognezashchitnykh vspuchivayushchikhsya materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.17.06* / [Theoretical principles and technology of blowing fire-retardant materials: Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2015, 260 p.

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.Ye., Zybina, O.A., Mitrofanov, V.V., Mnatsakanov, S.S. *Sravnitel'noye izucheniye povedeniya fosfatov ammoniya v ogneshchitnykh vspuchivayushchikhsya kompozitsiyakh* [The comparative study of behavior of ammonium phosphates in blowing fire-retardant compositions]. *Zhurnal prikladnoy khimii – Journal of applied chemistry*, 2012, vol. 85, no. 1, pp. 157 – 159.

5. Завьялов, Д.Е. Возможность применения интеркалированного графита в огнезащитных интумесцентных композициях / Д.Е. Завьялов, О.А. Зыбина, С.С. Мнацаканов // Тезисы докладов XIV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие химические технологии – 2012». – М.: Изд-во МИТХТ, 2012. – 418 с.

Zav'yalov, D.Ye., Zybina, O.A., Mnatsakanov, S.S. *Vozmozhnost' primeneniya interkalirovannogo grafita v ogneshchitnykh intumestsentnykh kompozitsiyakh* [Possibility of application of the intercalated graphite in intumescent fire-retardant compositions]. *Tezisy dokladov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Naukoyemkiye khimicheskiye tekhnologii – 2012"* [Theses of reports of the 14th International scientific and technological conference "Knowledge-intensive chemical technologies – 2012"]. Moscow, Izd-vo MITKhT Press, 2012, 418 p.

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

Kropachev, R.V., Novokshonov, V.V., Vol'fson, S.I., Mikhaylova, S.N. *Termorasshiryayushchiyesya polimernyye kompozitsionnyye materialy* [Intumescent polymer composites]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological university]. 2015, vol. 18, no. 5, pp. 60 – 63.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 10.07.2020

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

POLYMERIC MATERIAL FOR FIRE RETARDATION OF BUILDING STRUCTURES

Purpose. Development of a polymeric blowing material for fire retardation of the building structures.

Methods. Analytical review of flame-retardant means elevating the degree of fire resistance of the building structures. Experimental determination of the thermal expansion ratio of the blowing polymeric composition.

Results. The composition formula of the blowing polymeric material for fire retardation of the building structures has been developed. The proportioning of the fire-retardant material composition has been conducted according to the polymeric binder – blowing additive – mineral filler scheme. Resorcinol-formaldehyde and urea formaldehyde resins have been taken as a binder. The urea has been chosen as an optimal blowing agent, i.e. the most widespread and relatively inexpensive chemical compound that additionally possesses fire-retardant properties. It has been shown that ammonium phosphates possess the same dual effect, i.e. as a hardening agent of a polymeric binder and antipyrène. The thermal expansion ratio of the polymeric blowing agent has been determined.

Scientific novelty. The nonflammable polyfunctional material blowing under thermal influence has been developed for prevention of fires by increasing the fire resistance, smoke-and-gas impermeability of the building structures.

Practical value. The designed fire-retardant polymeric material has an ability to blow in conditions of a fire and to form the hard protective layer of low heat conductivity. The effectiveness of the material of the thermal expansive type is determined by the fact that the covering with the width from several tenths of millimeter to several millimeters is enough for fire protection. The application of the fire-retardant polymeric material will make it possible to prevent or reduce the spread of the flame and smoke and therefore to improve the fire safety of the objects.

Keywords: *blowing polymeric material; thermal expansion ratio; fire retardation; fire-retardant effectiveness; coked cellular material.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 622.411.33:552.574

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: niigd@mail.ru;
Александр Александрович Всякий, науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФфуЗИИ МЕТАНА В УГЛЯХ РАЗНЫХ СТЕПЕНЕЙ МЕТАМОРФИЗМА

Цель. Определение коэффициентов диффузии метана в углях различных степеней метаморфизма по скорости истечения метана из них.

Методы. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях и обработка результатов теоретических исследований.

Результаты. Получены аналитические зависимости, описывающие динамику скорости истечения метана и значений коэффициентов диффузии.

Научная новизна. Предложены расчетные зависимости для определения коэффициентов диффузии метана в углях в рамках математических моделей процессов диффузии веществ в твердых телах.

Практическая ценность. Полученные зависимости для определения коэффициентов диффузии используют при расчете инкубационного периода самовозгорания углей.

Ключевые слова: истечение метана; диффузия; фильтрация; десорбция; пористость; метаморфизм.

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований.

Согласно существующим представлениям [1] каменный уголь – это твердая среда, неоднородная по химическому составу, плотности, трещиноватости. Каждая гранула угля состоит из более мелких образований – микроблоков, объем между которыми – это объем трещин и открытых пор. Таким образом микроблок рассматривают как часть угля без трещин и открытых пор, а площадь поверхности всех микроблоков в грануле угля равна поверхности всех открытых фильтрационных каналов. Указанные образования очень малы, радиус микроблоков гораздо меньше радиуса гранулы, распределены по всему объему гранул и через систему трещин и открытых пор сообщаются с поверхностью угля.

Выполненные авторами статьи [2] экспериментальные исследования десорбции метана из каменного угля разных марок показывают, что ее кинетику нельзя объяснить в предположении об одном механизме выхода метана – диффузии или фильтрации открытыми порами. Кинетика десорбции метана может быть объяснена в рамках представлений о гибридном механизме эмиссии, который является определенным видом суперпозиции процессов диффузии и фильтрации. При этом в ряду метаморфизма углей от Д к Т влияние диффузии снижается, а десорбция и фильтрация возрастают. Для описания этого процесса

авторы используют экспериментальное уравнение из двух экспонент, одна из которых отражает выход метана из приповерхностного слоя гранул угля, а другая – из более удаленных от него.

В статье [3] использована разработанная проф. А.А. Березовским математическая модель процесса диффузии метана из частиц угля и для случая его истечения из частиц малых фракций, ограничившись рассмотрением средних по объему угля Ω концентраций свободного для диффузии газа $\bar{C}(\tau)$ и связанной $\bar{S}(\tau)$, сформулирована и решена аналитическая задача динамики метановыделения. Проанализированы существующие и выполнены новые экспериментальные исследования, обоснованы данные о значениях коэффициентов диффузии на разных стадиях десорбции метана. В использованной модели полагалось, что в произвольном куске угля первоначально содержится адсорбированный метан. При отторжении угля от массива происходит интенсивное его выделение, когда связанный метан переходит в свободное для диффузии состояние и по системе пор освобождается из частиц угля. Выполненный анализ решения и эксперименты для угля пласта k_2 шахты «Коммунарская» позволили получить выражения для скорости выделения метана μ , с^{-1} , и диффузии D , $\text{м}^2/\text{с}$, в зависимости от времени сброса давления.

Найденные коэффициенты диффузии следует считать эффективными, обусловленными совместными действиями фильтрации метана в угле и его диффузии.

В настоящей работе в рамках предложенной модели истечения метана из углей приведены результаты исследований с углями разных марок.

Цель работы – определение коэффициентов диффузии метана для углей различной степени метаморфизма в различные периоды истечения из них метана и обобщения представленных результатов.

Результаты исследования. Эксперименты по истечению из углей метана для дальнейшего вычисления коэффициентов диффузии выполняли с углями различных марок дробимостью D_r от 6 до 30, в которых содержалось горючих I^r от 6 до 40 %. Всего было выполнено семь экспериментов. Характеристика углей приведена в работе [4]. Как и в предыдущей работе [3], для вычисления коэффициентов диффузии использовано теоретическое выражение

$$D = \mu R^2 / \left\{ 3 \left[1 - e^{-\mu\tau} / \left(1 - \frac{Q(\tau)}{Q_0} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где μ – скорость выделения метана, с^{-1} ;

R – радиус гранул угля, м;

τ – время от начала истечения метана из угля, с;

Q_0 и $Q(\tau)$ – начальная и текущая концентрация метана, моль/ м^3 .

Размер частиц во всех экспериментах был одинаков и в среднем равен $R = 0,001875$ м. Скорость выделения метана μ по мере его истечения из углей менялась и для разных периодов изображена графически на рис. 1.

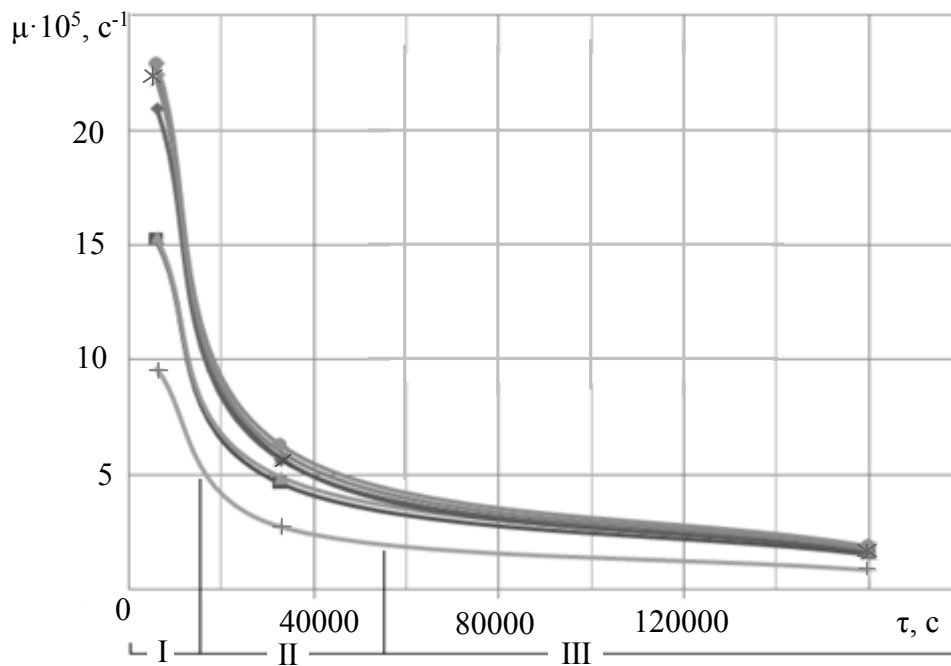


Рис. 1. Изменение скорости истечения метана из предварительно насыщенных углей разной степени метаморфизма:

—♦— «Щегловская Глубокая», пл. l_1^H ; —■— «Никанор-Новая», пл. k_5 ;
 —▲— «Коммунарская», пл. k_5 ; —×— «Белореченская», пл. l_6 ; —*— «Щегловская Глубокая», пл. l_1^B ; —◆— «Горняк», пл. k_5^H ; —+— им. XIX съезда КПСС, пл. l_1

Как следует из представленных на рис. 1 данных, наиболее значимые различия в μ наблюдаются в первый период истечения из углей метана. В дальнейшем разница в скоростях истечения метана из углей разных марок не столь велика (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость динамики скоростей истечения метана из углей разных степеней метаморфизма

Шахта, пласт	V^r , %	Зависимость μ от τ
«Щегловская Глубокая», l_1^H	19	$\mu = 0,17(\tau + 1)^{-0,77}$
«Никанор-Новая», k_5^I	4	$\mu = 0,067(\tau + 1)^{-0,7}$
«Коммунарская», k_5	6	$\mu = 0,052(\tau + 1)^{-0,67}$
«Белореченская», l_6	40	$\mu = 0,26(\tau + 1)^{-0,81}$
«Щегловская Глубокая», l_1^B	25	$\mu = 0,18(\tau + 1)^{-0,77}$
«Горняк», k_5^H	19	$\mu = 0,17(\tau + 1)^{-0,76}$
Им. XIX съезда КПСС, l_1	39,9	$\mu = 0,06(\tau + 1)^{-0,74}$

Кривые, представленные на рис. 1, могут быть описаны формулой

$$\mu = a(\tau_n + 1)^n, \quad (2)$$

где τ_n – время напорного выделения метана с начала сброса давления, с.

Анализ значений a и n в формуле (2) показал, что для углей разных шахт a и n зависят от доли горючих в углях V^r . Аппроксимируя a и n указанной характеристикой, имеем

$$a = 0,0135(V^r)^{0,81}, \quad (3)$$

где n определяет зависимость

$$n = 0,0001(V^r)^2 - 0,0081V^r - 0,6504. \quad (4)$$

Экспериментальные данные относительных значений выделившегося из углей метана различных марок в разные моменты времени его истечения от сброса давления метана представлены графически на рис. 2.

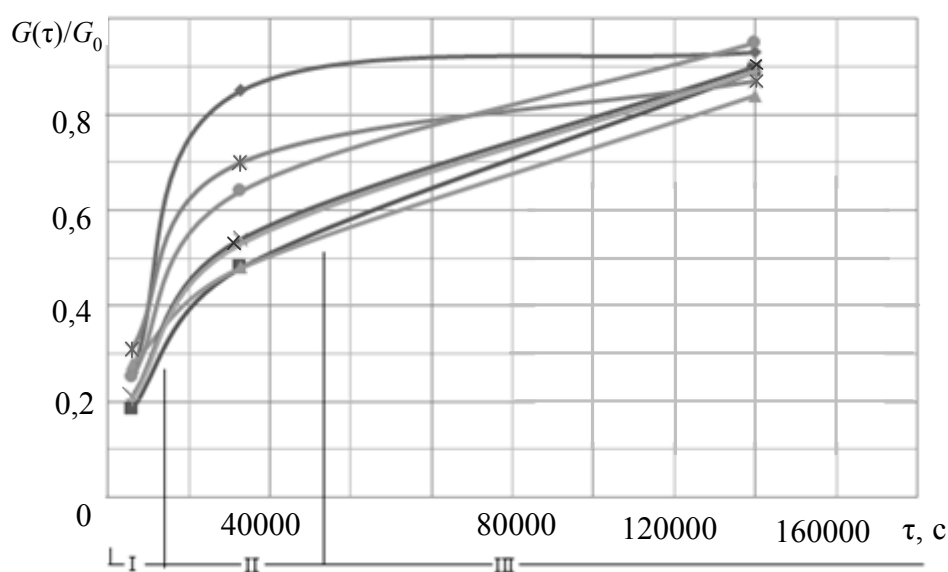


Рис. 2. Экспериментальные кривые истечения метана из частиц угля различных марок:

—♦— «Щегловская Глубокая», пл. l_1^H ; —■— «Никанор-Новая», пл. k_5 ;
 —▲— «Коммунарская», пл. k_5 ; —×— «Белореченская», пл. l_6 ; —*— «Щегловская Глубокая», пл. l_1^B ; —●— «Горняк», пл. k_5^H ; —+— им. XIX съезда КПСС, пл. l_1

С использованием значений $G(\tau)/G_0$ для исследованных углей в каждом периоде истечения из них метана по формуле (1) рассчитаны коэффициенты диффузии метана, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные и расчетные зависимости коэффициентов диффузии метана в углях

Шахта, пласт	Периоды истечения метана									
	Нулевой $\tau_0=0 \dots 600, \text{с}$	I $\tau_{1\text{ср}}=6000 \text{ с};$ $\ln \tau_{1\text{ср}}=8,7$			II $\tau_{2\text{ср}}=33000 \text{ с};$ $\ln \tau_{2\text{ср}}=10,4$			III $\tau_{3\text{ср}}=160000 \text{ с};$ $\ln \tau_{3\text{ср}}=11,9$		
	$\frac{D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}}{\ln D}$	$\frac{G(\tau)}{G_0}$	$\mu 10^5, \text{ с}^{-1}$	$\frac{D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}}{\ln D}$	$\frac{G(\tau)}{G_0}$	$\mu 10^5, \text{ с}^{-1}$	$\frac{D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}}{\ln D}$	$\frac{G(\tau)}{G_0}$	$\mu 10^5, \text{ с}^{-1}$	$\frac{D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}}{\ln D}$
«Щегловская Глубокая», I_1^H	$\frac{2900}{-15,05}$	0,26	11,6	$\frac{4,4}{-21,54}$	0,85	2,3	$\frac{0,27}{-24,34}$	0,93	2	$\frac{0,5}{-23,7}$
«Никанор-Новая», k_5	$\frac{2900}{-15,05}$	0,185	6,6	$\frac{4,9}{-21,4}$	0,48	2	$\frac{0,23}{-24,5}$	0,89	1,25	$\frac{0,21}{-24,5}$
«Коммунарская», k_5	$\frac{2505}{-15,2}$	0,28	5,8	$\frac{4,36}{-21,5}$	0,48	2,8	$\frac{1,52}{-22,6}$	0,84	1,65	$\frac{0,5}{-23,7}$
«Белореченская», I_6	$\frac{2505}{-15,2}$	0,21	1,1	$\frac{0,3}{-24,2}$	0,54	2,3	$\frac{0,05}{-26}$	0,9	1,5	$\frac{0,19}{-24,6}$
«Щегловская Глубокая», I_1^B	$\frac{8115}{-15,05}$	0,31	9,7	$\frac{10}{-20,7}$	0,7	2,4	$\frac{3}{-21,9}$	0,87	1,7	$\frac{0,39}{-24}$
«Горняк», k_5^H	$\frac{2900}{-15,05}$	0,25	10,3	$\frac{4,5}{-23}$	0,64	2,1	$\frac{0,35}{-24,4}$	0,95	1,9	$\frac{0,27}{-24,34}$
Им. XIX съезда КПСС, I_1	$\frac{2289}{-15,29}$	0,205	8,04	$\frac{5,8}{-21,25}$	0,53	2,13	$\frac{0,25}{-24,44}$	0,89	0,33	$\frac{0,038}{-26,3}$
										$\ln D = -15,15 - 0,71(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,42 - 0,76(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,3 - 0,7(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,2 - 0,79(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,15 - 0,74(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,05 - 0,79(\ln(\tau+1))$
										$\ln D = -15,29 - 0,92(\ln(\tau+1))$

Анализ представленных данных показал, что коэффициенты диффузии D , выраженные в логарифмическом виде, линейно зависят от логарифма времени τ , с момента истечения метана по зависимости

$$\ln D = \bar{a} + \bar{b} \ln(\tau + 1), \quad (5)$$

где $\bar{a}$ получено по данным работы [5], имеет вид

$$\bar{a} = -0,0007(V^r)^2 + 0,035 V^r - 15,577, \quad (6)$$

а $\bar{b}$ в зависимости от V^r имеет вид

$$\bar{b} = -0,0002(V^r)^2 + 0,0033 V^r - 0,747. \quad (7)$$

Для наглядности зависимость $\ln D$ от V^r для различных углей с истечением метана из него в III периоде ($\tau = 160000$ с) представлены на рис. 3.

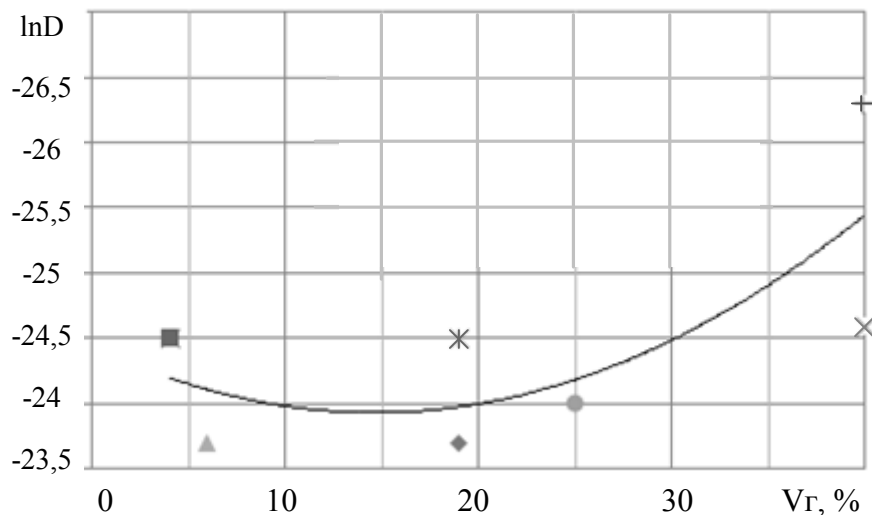


Рис. 3. Изменение коэффициентов диффузии при истечении метана в III периоде из углей разных степеней метаморфизма:

— — «Щегловская Глубокая», пл. l_1^H ; — — «Никанор-Новая», пл. k_5 ;
 — — «Коммунарская», пл. k_5 ; — — «Белореченская», пл. l_6 ; — — «Щегловская Глубокая», пл. l_1^B ; — — «Горняк», пл. k_5^H ; — — им. XIX съезда КПСС, пл. l_1

Результаты, представленные на рис. 3, описывает зависимость

$$\ln D = -0,0024(V^r)^2 + 0,0693 V^r - 24,435. \quad (8)$$

Выводы. Предложены аналитические зависимости для вычисления динамики скорости истечения метана из углей и коэффициентов его диффузии

для марок от Д до Т в диапазоне времени от начала его истечения до шести суток. Результаты могут быть использованы при расчете склонности углей к самовозгоранию.

Список литературы / References

1. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев // НАН Украины, Ин-т физики горн. процессов. – Киев: Наук. думка, 2010. – 317 с.
Alekseyev, A.D. *Fizika uglya i gornyykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. NAN Ukrainy, Institut fiziki gornyykh protsessov [The National Academy of Sciences of Ukraine, Institute for physics of mining processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2010, 317 p.
2. Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта / А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко [и др.] // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 4. – С. 65 – 74.
Alekseyev, A.D., Fel'dman, E.P., Vasilenko, T.A. et al. *Diffuzionno-fil'tratsionnaya model' vykhoda metana iz ugol'nogo plasta* [Diffusion and filtration model of methane release from a coal seam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of applied physics*, 2007, vol. 77, issue 4, pp. 65 – 74.
3. Греков, С.П. Экспериментально-аналитическое определение коэффициентов диффузии в углях по темпу истечения метана / С.П. Греков, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 1(57). – С. 25 – 32.
Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A. *Eksperimental'no-analiticheskoye opredeleniye koeffitsiyentov diffuzii v uglyakh po tempu istecheniya metana* [Experimental and analytical determination of diffusion coefficients in coal by methane release rate]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 1(57), pp. 25 – 32.
4. Греков, С.П. Тепловой эффект дросселирования метана из отторгнутого от массива угля / С.П. Греков, А.А. Всякий, И.Г. Старикова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 2(56). – С. 88 – 94.
Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Starikova, I.G. *Teplovoy effekt drosselirovaniya metana iz ottorgnutogo ot massiva uglya* [Thermal effect of the methane throttling from coal separated from the massif]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 2(56), pp. 88 – 94.
5. Пашковский, П.С. Расчет коэффициентов диффузии в углях с использованием хроматографического метода / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Т.Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк, 2014. – Вып. 51. – С. 78 – 87.
Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Salakhutdinov, T.G. *Raschyet koeffitsiyentov diffuzii v ugle s ispol'zovaniyem khromatograficheskogo metoda* [Calculation

of the diffusion coefficient in coal with the use of the chromatographic method]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2014, issue 51, pp. 78 – 87.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 23.01.2020

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: niigd@mail.ru;
Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81

METHANE DIFFUSION COEFFICIENTS IN COAL OF DIFFERENT METAMORPHIC GRADES

Purpose. Determination of the methane diffusion coefficients in coal of different metamorphic grades by the rate of the methane release from it.

Methods. Experimental investigations in the laboratory conditions and processing of results of theoretical investigations.

Results. The analytical dependences have been obtained that describe the dynamics of the methane release rate and that one of the values of the diffusion coefficients.

Scientific novelty. The calculation dependences have been proposed for determination of the methane diffusion coefficients in coal within the framework of the mathematical models of the diffusion processes of substances in solid bodies.

Practical value. The obtained dependences for determination of the diffusion coefficients are being used for calculation of the incubation period of the coal spontaneous combustion.

Keywords: methane release; diffusion; filtration; desorption; porosity; metamorphism.

УДК 621.565.5:622.867.3

Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;

Ольга Владимировна Папазова, ст. науч. сотр.; e-mail: papazova.olya@yandex.ru;

Николай Николаевич Попов, науч. сотр.; e-mail: popov.nikn@yandex.ru;

Владислав Вячеславович Шлома, инж. I категории; e-mail: ilsin1995@gmail.com

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-51*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРАНЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель. Совершенствование средств транспортирования и хранения охлаждающих элементов в горных выработках шахт.

Метод исследования. Информационно-аналитический и экспериментальный. Изучены информационные, патентные источники, проведен анализа результатов исследования макетного образца контейнера для транспортирования и хранения охлаждающих элементов. Исследован макетный образец контейнера для охлаждающих элементов ОЭ-2, изготовленный из технополистирола XPS Техноплекс с использованием слоя фольги.

Научная новизна. Впервые применен слой фольги в конструкции теплоизолирующего контейнера для увеличения срока хранения охлаждающих элементов ОЭ-2.

Область применения. Результаты работы могут быть использованы при создании нового теплоизолирующего контейнера для транспортирования и хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 в горных выработках шахт. Предложения по результатам исследования макетного образца теплоизолирующего контейнера использованы при совершенствовании средств транспортирования и хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 в горных выработках шахт.

Практическая значимость. Улучшение технико-эксплуатационных параметров теплоизолирующего контейнера и повышение эффективности транспортирования и хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 при эксплуатации средств противотепловой защиты. Прогнозы развития объекта исследования – средств транспортирования и хранения охлаждающих элементов целесообразно проводить в направлении применения новых технологий при изготовлении теплоизолирующего контейнера и композитных материалов.

Ключевые слова: охлаждающие элементы; теплоизолирующий контейнер; термосумка; теплоизолирующий материал; теплопроводность.

Постановка проблемы. Для хранения и транспортирования охлажденных или замороженных веществ применяют различные типы контейнеров. Основные тенденции при разработке контейнеров: применение конструкций мягкого типа (термосумки) и жесткого, использование модульной системы теплоизоляции, улучшение системы герметизации.

Контейнеры, включающие пенополистирол, имеют модульное строение.

Для транспортирования хрупких изделий обычно используют жесткие полиуретановые контейнеры. Полиуретан превосходит пенополистирол по теплоизолирующим и прочностным характеристикам.

Рассмотренные варианты технических решений контейнеров имеют общие недостатки, частично устраняемые внедрением дополнительных конструктивных элементов или технологических изменений:

- контейнеры, особенно с модульной системой построения, имеют большое количество швов в изоляционном материале, через которые воздух проникает в полость контейнера. Кроме того, полость часто имеет воздушные пространства вокруг изделия, помещенного в него, которые способствуют конвекции;

- крышки контейнеров изготавливают (для упрощения конструкции) из материалов, имеющих худшие теплоизолирующие характеристики, чем корпус;

- панели из некоторых вспененных материалов при многократном использовании имеют низкие прочностные характеристики;

- большинство теплоизолирующих сумок и контейнеров рассчитано на обеспечение температурного режима в диапазоне от 0 до плюс 12 °С;

- полиуретан в качестве теплоизолирующего материала контейнера имеет высокие прочностные характеристики, однако для изготовления корпуса контейнера необходимо специальное оборудование и условия для его утилизации.

Анализ последних исследований. Ранее для доставки охлаждающих элементов ОЭ-2, применяемых в средствах противотепловой защиты, к месту ведения аварийно-спасательных работ в шахтах использовали контейнеры К-1. Контейнеры К-1 выполнены из стеклопластика и пенополистирола. Контейнер К-1 имел массу 20 кг, жесткую прямоугольную форму и был предназначен для переноски в руке или на спине. Технология его изготовления сложна и дорогостояща. Кроме того, стеклопластик – вредное химическое вещество. Из-за приведенных эксплуатационных и технологических недостатков контейнер К-1 не нашел широкого применения [1].

Вместо контейнера К-1 разработан теплоизолирующий контейнер К-2 мягкого типа, который находится на оснащении подразделений Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики.

Теплоизолирующие контейнеры К-2 предназначены для доставки в шахту и хранения в замороженном состоянии охлаждающих элементов ОЭ-2 противотепловой куртки ТК-50 в среде с температурой, не превышающей плюс 40 °С.

В результате анализа информации, представленной в опросных листах подразделений Государственной военизированной горноспасательной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, получены сведения об условиях эксплуатации теплоизолирующих контейнеров К-2 и их техническом состоянии.

Во время проведения аварийно-спасательных работ в горных выработках шахт применяют теплоизолирующие контейнеры К-2 при температуре окружающей среды от плюс 30 до плюс 35 °С и относительной влажности до 100 %, в неблагоприятных условиях температура окружающей среды превышает плюс 40 °С, физическая нагрузка – выше средней.

Для осуществления аварийно-спасательных работ в указанных микроклиматических условиях и при физической нагрузке необходимо три теплоизолирующих контейнера К-2 на одно отделение для использования противотепловых курток ТК-50; четыре для использования костюмов ТК-60. Переснаряжают средства противотепловой защиты в процессе эксплуатации через каждые 60 мин.

Выявлены следующие конструктивные и эксплуатационные изъяны теплоизолирующих контейнеров К-2: недостаточная прочность теплоизоляции и материала чехла (при ударах и порезах); ненадежность ручек и неудобство плечевых ремней.

Анализ данной информации позволил осуществить выбор материалов для исследования их теплоизолирующих и прочностных свойств макетного образца контейнера.

В связи с тем, что в теплоизолирующем контейнере К-2 использован пенополиэтилен с теплопроводностью более $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, а применение полиуретана требует специального оборудования, для изготовления макета контейнера выбран технополистирол XPS Техноплекс с теплопроводностью $0,032 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ и плотностью 26 кг/м^3 .

Материалы исследования. Макетный образец контейнера предназначен для исследования возможности транспортирования и хранения охлаждающих элементов ОЭ-2, применяемых при эксплуатации средств противотепловой защиты.

Макетный образец контейнера изготовлен из экструзионного технополистирола XPS Техноплекс плотностью 26 кг/м^3 (см. таблицу).

Технические характеристики технополистирола XPS Техноплекс

Характеристика	Значение
Ширина, см	55
Длина, см	110
Толщина, мм	20; 30; 40
Прочность на сжатие при 10 % деформации, кПа	150...250
Плотность, кг/м^3	26...35
Теплопроводность при $(25\pm 5) ^{\circ}\text{C}$, $\text{Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$	0,032
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	0,30
Объемная доля водопоглощения, %, не более	0,2
Категория стойкости к огню	Г4
Температура при эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$	От минус 70 до плюс 75
Площадь листа, м^2	0,6844

В некоторых конструктивных решениях используют алюминиевую фольгу для улучшения теплоизолирующих характеристик изделия [2].

Один вариант макетного образца контейнера был изготовлен из листа технополистирола XPS Техноплекс толщиной 20 мм, уложенного в два слоя

(рис. 1). Во втором варианте макетного образца контейнера между слоями технополистирола XPS Техноплекс и на внутренней поверхности проклеена алюминиевая фольга М-50.

Масса макетного образца контейнера 0,66 кг. Макетный образец контейнера состоит из корпуса и крышки. Объем внутренней полости корпуса 0,015 м³ и рассчитан на 50 охлаждающих элементов ОЭ-2.



Рис. 1. Внешний вид макетного образца контейнера

Габариты макетного образца контейнера: длина 0,51 м; высота 0,34 м; ширина 0,20 м. Размеры внутренней полости макетного образца контейнера: длина 0,43 м; высота 0,29 м; ширина 0,12 м.

При проведении испытаний макетного образца контейнера определены следующие технические данные: объем внутренней полости, объем, занимаемый охлаждающими элементами ОЭ-2 в замороженном состоянии, объем воздуха во внутренней полости (при нахождении в ней охлаждающих элементов ОЭ-2), время хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 в замороженном состоянии при температуре окружающей среды плюс 20 °С и это же время хранения с применением алюминиевой фольги.

Определение объема внутренней полости проведено измерением с помощью металлической рулетки:

$$V_{\text{в.п}} = l b h, \quad (1)$$

где l – длина внутренней полости, м;
 b – ширина внутренней полости, м;
 h – высота внутренней полости, м.

$$V_{\text{в.п}} = 0,015 \text{ м}^3.$$

Принимая во внимание, что охлаждающие элементы ОЭ-2, особенно в замороженном состоянии, имеют различную конфигурацию, объем их рассчитан экспериментально.

Определение объема 50 охлаждающих элементов ОЭ-2, находящихся во внутренней полости макетного образца контейнера, осуществлено с помощью измерения мерным цилиндром объема вытесненной воды. Объем охлаждающих элементов ОЭ-2 равен $0,007 \text{ м}^3$.

Таким образом, воздушная прослойка между массивом охлаждающих элементов ОЭ-2 и внутренней поверхностью макетного образца контейнера равна $0,008 \text{ м}^3$.

В предыдущих исследованиях [3] разработана математическая модель теплообменных процессов в системе «охлаждающие элементы ОЭ-2 – теплоизолирующий контейнер – окружающая среда» и показано, что наиболее интенсивный теплообмен происходит в угловых точках массива охлаждающих элементов ОЭ-2.

Расчет воздушной прослойки внутри макетного образца контейнера показал, что ее объем составляет более 50 % объема внутренней полости. В процессе эксплуатации контейнера воздух внутри нагревается и концентрируется в верхней части контейнера, под крышкой. Таким образом, повышение температуры под крышкой теплоизолирующих контейнеров, вызванное конструктивными недостатками, не всегда можно считать обоснованным. Устранение данного недостатка возможно при использовании дополнительных аккумуляторов холода в верхней части теплоизолирующих контейнеров.

Для анализа экспериментальных данных измерена температура внутри макетного образца контейнера в трех точках: в верхней части $t_{\text{в}}$, в средней $t_{\text{с}}$ и в нижней $t_{\text{н}}$.

Цель испытаний – определение длительности размораживания охлаждающих элементов ОЭ-2 в макетном образце контейнера до температуры минус 3°C при температуре окружающей среды плюс 20°C .

При каждом значении температуры окружающей среды было проведено по пять экспериментов. Данные, полученные при исследовании, математически обработаны в программе Excel с дальнейшей графической визуализацией (рис. 2).

Для реализации поставленной цели исследован процесс хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 в замороженном состоянии при температуре плюс 20°C и влияние теплоотражающего слоя в его конструкции. Начальная температура охлаждающих элементов ОЭ-2 была от минус 18 до минус 22°C . Контроль температуры во внутренней полости проводили с интервалом в 1 ч до достижения температуры минус 3°C .

Для исследования влияния слоя фольги конструкция макетного образца контейнера усовершенствована – слой фольги М50 расположен между листами технополистирола XPS Техноплекс при изготовлении корпуса и крышки, а также на поверхности внутренней полости.

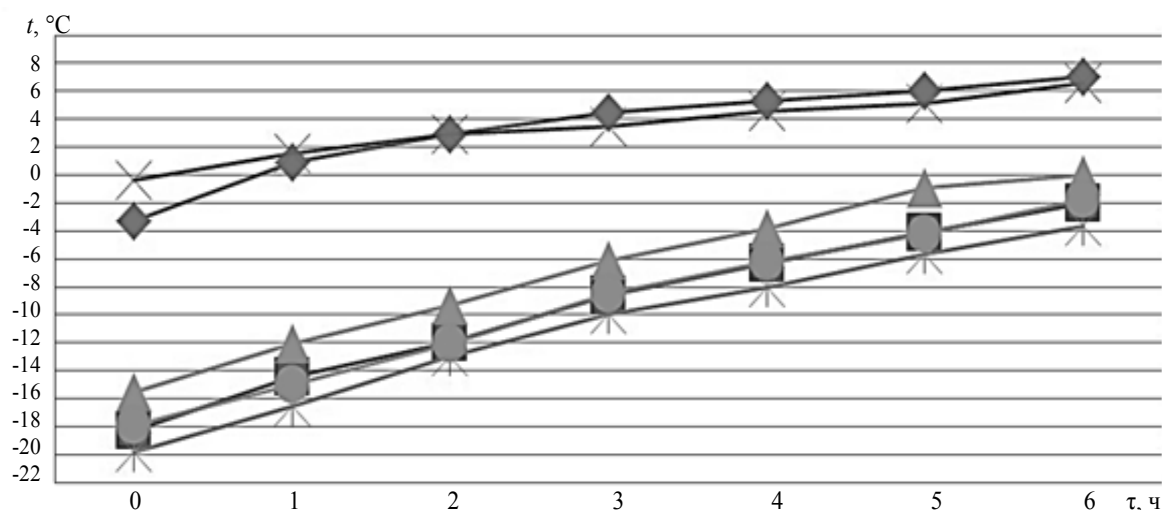


Рис. 2. Зависимость температуры внутри макетного образца контейнера от времени при температуре окружающей среды плюс 20 °С:

× – t_v без фольги; ♦ – t_v с фольгой; ▲ – t_n без фольги;
 ■ – t_c без фольги; ● – t_n с фольгой; ж – t_c с фольгой

Температура в верхней части макетного образца контейнера с применением слоя фольги и без него в течение первого часа достигает положительных значений, что подтверждает концентрацию теплого воздуха в верхней части макетного образца контейнера. При использовании дополнительного слоя фольги температура минус 3 °С достигается более чем через 6 ч в нижней и средней части макетного образца контейнера, при отсутствии слоя фольги – через 5,5 ч. Таким образом, при использовании слоя фольги время хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 увеличивается более чем на 10 %.

Выводы. При проведении исследований установлено, что равномерность температуры во внутренней полости макетного образца контейнера может быть обеспечена при использовании автономных аккумуляторов холода в верхней его части. Использование слоя фольги в конструкции макетного образца контейнера может увеличить время хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 на 10 %. Время хранения охлаждающих элементов ОЭ-2 при температуре окружающей среды плюс 20 °С – не менее 6 ч.

Список литературы / References

1. Воронов, П.С. Повышение эффективности средств противотепловой защиты горноспасателей / П.С. Воронов // Уголь Украины. – 2004. – № 6. – С. 42 – 44.

Voronov, P.S. *Povysheniye effektivnosti sredstv protivoteplovoy zashchity gornospasateley* [Efficiency improvement of heat protection means of mine-rescuers]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2004, no. 6, pp. 42 – 44.

2. Совершенствование изоляционных свойств противотепловой одежды / В.Ф. Клепиков, Е.М. Прохоренко, В.В. Колесникова, Е.Л. Завьялова //

Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 127 – 132.

Klepikov, V.F., Prokhorenko, Ye.M., Kolesnikova, V.V., Zav'yalova, Ye.L. *Sovershenstvovaniye izolyatsionnykh svoystv protivoteplovoy odezhdy* [Improvement of insulation properties of heat protection clothing]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2010, issue 47, pp. 127 – 132.

3. Положий, В.О. Моделирование теплообменных процессов в контейнере с водоледяными аккумуляторами холода / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 147 – 158.

Polozhiy, V.O., Mariychuk, I.F. *Modelirovaniye teploobmennyykh protsessov v konteynere s vodoledyanymi akkumulyatorami kholoda* [Modeling of heat exchange processes in a container with water-ice cold accumulators]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2018, issue 45, pp. 147 – 158.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Ю.Ф. Булгаковым
Дата поступления рукописи 04.06.2020

Vladimir Mikhaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;

Olga Vladimirovna Papazova, senior scientific associate; e-mail: papazova.olya@yandex.ru;

Nikolay Nikolayevich Popov, scientific associate; e-mail: popov.nikn@yandex.ru;

Vladislav Vyacheslavovich Shloma, engineer of the 1st category; e-mail: ilsin1995@gmail.com

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-51

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF STORAGE OF COOLING ELEMENTS

Purpose. Efficiency improvement of equipment for transportation and storage of cooling elements in mine workings of coal mines.

Method of investigation. Informational and analytical and experimental methods. Informational and patent sources have been studied, the analysis of investigation results of a brassboard container for transportation and storage of cooling elements has been conducted. The brassboard container made of Техноплекс XPS technopolystyrene with a foil layer for the ОЭ-2 cooling elements has been investigated.

Scientific novelty. The foil layer has been used in the construction of the heat-insulating container for the first time with the purpose to increase the storage time of the ОЭ-2 cooling elements.

Application area. The results of the work may be used in creation of the new heat-insulating container for transportation and storage of the ОЭ-2 cooling elements in the mine workings of the coal mines. The propositions following the results of investigation of the brassboard heat-insulating container have been applied in improvement of the equipment for transportation and storage of the ОЭ-2 cooling elements in the mine workings of the coal mines.

Practical value. Enhancement of operating parameters of the heat-insulating container and efficiency improvement of transportation and storage of the ОЭ-2 cooling elements during the operation of heat protection means. The predictions regarding the development of the object of investigation, i.e. equipment for transportation and storage of the cooling elements, should be conducted in the line of application of new technologies in manufacturing the heat-insulating container and composite materials.

Keywords: *cooling elements; heat-insulating container; thermal bag; heat-insulating material; thermal conductivity.*

УДК [614.894.7:620.1.05]:612.2

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

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: oszd_niigd_1@mail.ru;

Виктор Иванович Францев, ведущий 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

ИМИТАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Цель. Исследовать параметры потребления кислорода для определения режимов испытания дыхательных аппаратов, наиболее точно соответствующих метаболическим процессам человека.

Методика. Теоретические методы исследований.

Результаты. Проведенные исследования позволили определить режимы испытания дыхательных аппаратов, наиболее точно соответствующие метаболическим процессам человека.

Научная новизна. Определены параметры системы потребления кислорода, обеспечивающие имитацию метаболических процессов человеческого организма при дыхании.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволили сформулировать требования к имитации потребления кислорода при испытании дыхательных аппаратов на динамической установке с искусственными легкими.

Ключевые слова: дыхательный аппарат; динамическая установка; искусственные легкие; потребление кислорода; выделение диоксида углерода; дыхательный коэффициент; дыхательный режим.

Постановка проблемы. Разрабатываемые и сертифицируемые дыхательные аппараты должны проходить проверку на соответствие требованиям стандартов, в том числе посредством испытаний на динамической установке с искусственными легкими. Каждое такое испытание характеризуется дыхательным режимом – совокупностью параметров настройки динамической установки, которые задает и контролирует испытатель.

Дыхательные режимы, соответствующие одинаковой физической нагрузке, в разных стандартах (табл. 1) обусловлены подходом их разработчиков к моделированию процессов дыхания и производственной деятельности. Единственным критерием правильности выбора модели потребления кислорода организмом должно быть наиболее полное соответствие физиологическим процессам, протекающим в организме человека.

Таблица 1
Параметры дыхательных режимов при работе средней тяжести

Параметр	НПБ 164-2001	ГОСТ 12.4.292-2015	ДСТУ EN 13794:2005
Выделение CO ₂ , дм ³ /мин	1,0	1,4	1,575
Легочная вентиляция, дм ³ /мин	30,0	35,0	35,0
Дыхательный объем, дм ³	1,50	1,75	1,75
Частота дыхания, мин ⁻¹	20	20	20

Анализ последних исследований. Регламентация разного объема легочной вентиляции в различных стандартах на дыхательную аппаратуру объясняется уровнем физической нагрузки, которую приходится выполнять работнику. Но количество выделяемого диоксида углерода при одной и той же интенсивности легочной вентиляции должно быть одинаковым, поскольку поддержание постоянного парциального давления диоксида углерода в альвеолярном воздухе – одна из основ регуляции интенсивности внешнего дыхания человека. В выдыхаемом воздухе парциальное давление диоксида углерода также постоянно (но меньше, чем в альвеолярном воздухе) для каждого значения легочной вентиляции и зависит от дыхательного объема и физиологически вредного пространства. Парциальное давление диоксида углерода в выдыхаемом воздухе определяется формулой

$$P_n = \frac{W_{к.с}}{W_2} \frac{P_c T}{T_c}, \quad (1)$$

где P_n – парциальное давление диоксида углерода, Па; $P_n = 3831,4$ Па;

$W_{к.с}$ – выделение CO_2 при стандартных условиях ($1,0 \text{ дм}^3/\text{мин}$), $\text{дм}^3/\text{мин}$;

W_2 – легочная вентиляция ($30 \text{ дм}^3/\text{мин}$), $\text{дм}^3/\text{мин}$;

T_c – температура диоксида углерода при стандартных условиях, К;
 $T_c = 273$ К;

P_c – давление диоксида углерода при стандартных условиях, Па;
 $P_c = 101325$ Па;

T – температура выдыхаемой газовой смеси, К; $T = 310$ К.

Полученное значение равно объемной доле 4 % от легочной вентиляции, что соответствует требованиям большинства стандартов. Принимаемое в некоторых стандартах значение выделения диоксида углерода, равное 4,5 %, обусловлено желанием создать более жесткие условия применения дыхательного аппарата и направлено на повышение безопасности его эксплуатации.

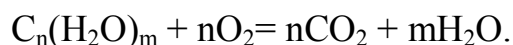
В стандартах отличается также и значение потребления кислорода, имитируемое откачиванием газовой смеси или сжиганием органического вещества (метанола). В различных стандартах откачивание газовой смеси отличается, что требует исследования и обоснования.

Результаты исследований. Потребление кислорода – часть тех же метаболических процессов, в которых выделяется диоксид углерода. Зависимость между потреблением кислорода и образованием диоксида углерода, которые на клеточном уровне представляют собой тесно связанные переменные величины, выражается при помощи дыхательного коэффициента (ДК):

$$\text{ДК} = \text{Выделение } \text{CO}_2 / \text{Потребление } \text{O}_2.$$

У человека и животных дыхательный коэффициент обусловлен диетой и обычно колеблется от 0,7 до 1,0. При окислении углеводов на 1 моль

потребляемого кислорода в организме образуется 1 моль диоксида углерода, так как весь потребляемый из вдыхаемого воздуха кислород в конечном счете расходуется только на окисление углерода углеводов, а окисление находящегося в составе углеводов водорода до воды обеспечивается заключенным в молекуле углевода кислородом:



Грамм-молекулы различных газов (в данном случае кислорода и диоксида углерода) занимают при одинаковых давлении и температуре равные объемы (закон Авогадро – Жерара), поэтому при окислении углеводов дыхательный коэффициент равен 1. При окислении жиров, в молекуле которых содержится много атомов водорода и мало атомов кислорода, потребление кислорода количественно связано также и с образованием воды из содержащегося в жирах водорода. В результате объем образующегося в организме (и выделяющегося) углекислого газа при диссимиляции жиров меньше объема потребляемого кислорода. При окислении жиров дыхательный коэффициент равен 0,70...0,72, например при окислении трипальмитина:



Отношение между объемами углекислого газа и кислорода равно в данном случае

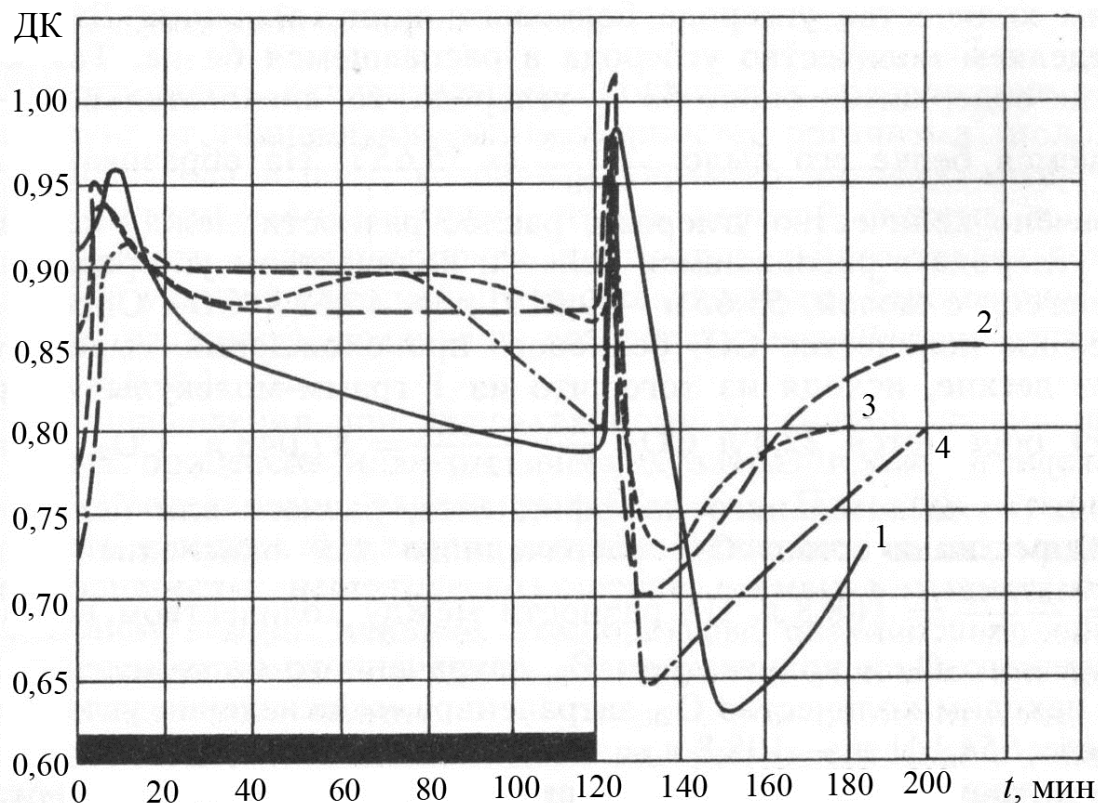
$$102 CO_2 / 145 O_2 = 0,703.$$

Окислению белков, в результате которого образуются, кроме воды и диоксида углерода, азотсодержащие соединения, выделяющиеся главным образом с мочой, соответствует дыхательный коэффициент, равный 0,80...0,82 [1].

При обычном питании, если в рацион входят углеводы, жиры и белки, дыхательный коэффициент колеблется в пределах 0,8...0,9 [2]. При мышечной работе умеренной мощности, во время так называемого устойчивого состояния, когда потребление кислорода соответствует потребности в нем организма, дыхательный коэффициент в связи с усиленной диссимиляцией преимущественно углеводов обычно выше данных пределов и равен 0,9...1,0 (см. рисунок) [3]. Однако при очень длительной работе, связанной с уменьшением запасов углеводов в организме, дыхательный коэффициент начинает понижаться, что свидетельствует о постепенно увеличивающемся использовании жиров.

Небольшое превышение дыхательным коэффициентом значения, равного 1, может наблюдаться у людей, восстанавливающих свою нормальную массу после частичного или полного голодания, что – исключительный случай и не может быть применимо при моделировании использования дыхательных аппаратов спасателями. Также кратковременное повышение дыхательного коэффициента наблюдается при переходе из зоны аэробного обеспечения энергией

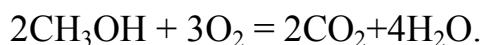
в анаэробную зону [4], при котором происходит накопление кислородного долга. Однако в последующем достигается ликвидация кислородного долга и дыхательный коэффициент пропорционально уменьшается.



Кривые четырех наблюдений (1 – 4) изменения дыхательного коэффициента во время и после двухчасовой интенсивной работы (по Талботу, Гендерсону, Диллу и др. [1])

Таким образом, исходя из физиологических процессов, протекающих в человеческом организме, объем потребленного кислорода больше объема выделившегося диоксида углерода, что в среднем соответствует дыхательному коэффициенту 0,8...0,9 [5].

Как указано выше, в существующих динамических установках применяют два подхода к имитации потребления кислорода. Метод сжигания метанола имеет свои преимущества перед откачиванием газовой смеси: удаляют только кислород из данной смеси, при этом не оказывают влияния на диоксид углерода и азот (в случае наличия его остаточных количеств в воздухопроводной системе дыхательного аппарата). Горение метанола описывается следующей реакцией:



Согласно данному уравнению при сгорании метанола на 3 моль потребленного кислорода выделяется 2 моль диоксида углерода, т.е.

дыхательный коэффициент равен 0,67. Такой подход позволяет симитировать уменьшение объема циркулирующей газовой смеси в динамической установке в процессе дыхания, как это и происходит в реальности, однако дыхательный коэффициент определяет более жесткие условия испытания.

Имитация потребления кислорода при помощи метода откачивания газовой смеси не позволяет добиться точного соответствия настроек динамической установки метаболическим процессам, так как откачивается смесь газов, а не только кислород.

Действующие в настоящее время стандарты, определяющие требования к самоспасателям для эвакуации людей из задымленных помещений во время пожара (табл. 2), регламентируют равенство объемов выделившегося диоксида углерода и потребленного кислорода. Подобные требования не могут быть признаны правильными, поскольку не только не учтено, что откачивается газовой смесь вместо кислорода (т.е. искажается соотношение газов), но и соотношение объемов выделившегося и удаленного (потребленного) газов не соответствует физиологическому диапазону дыхательного коэффициента.

Таблица 2

Параметры дыхательных режимов согласно ГОСТ Р 53260-2009

Показатель	Работа	
	средней тяжести	тяжелая
Выделение CO ₂ , дм ³ /мин	1,4	2,8
Потребление O ₂ , дм ³ /мин	1,4	2,8
Объемная доля CO ₂ на выдохе, %	4	4
Легочная вентиляция, дм ³ /мин	35	70
Дыхательный объем, дм ³	1,75	2,33
Частота дыхания, мин ⁻¹	20	30

В ГОСТ 12.4.292-2015, определяющем требования к изолирующим самоспасателям с химически связанным или сжатым кислородом, приведена формула расчета удаляемого объема газовой смеси для имитации потребления кислорода:

$$Q_{ГДС} = \frac{Q_{CO_2}}{C_{O_2}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $Q_{ГДС}$ – среднее значение минутного объемного расхода отбираемой газовой дыхательной смеси, дм³/мин;

Q_{CO_2} – среднее значение минутного объемного расхода подаваемого в динамическую установку диоксида углерода, дм³/мин;

C_{O_2} – объемная доля кислорода в пробе газовой дыхательной смеси, %.

Для компенсации разности объемов проб газовой дыхательной смеси и подаваемого диоксида углерода в динамическую установку подают азот. Имитация потребления кислорода данным стандартом позволяет в определенной мере обеспечить адекватную оценку объемной доли кислорода во вдыхаемом воздухе, поскольку при ее увеличении (которое может достигать 95...98 % при испытании аппаратов с химически связанным кислородом) пропорционально уменьшается объем отбираемой газовой дыхательной смеси. Однако определяемое данным стандартом условие равенства объемного расхода кислорода в минуту, с учетом его объемной доли в отбираемой газовой дыхательной смеси, минутному объемному расходу диоксида углерода, подаваемого в динамическую установку, не соответствует действительным метаболическим процессам и реальному дыхательному коэффициенту человека.

Практика испытаний респираторов с химически связанным кислородом на динамической установке показывает неправильность и опасность подобного подхода. После настройки дыхательных объемов динамической установки согласно метаболическим процессам при испытании регенеративного патрона после перерыва в работе часто происходило «слипание» дыхательного мешка, вызванное уменьшением коэффициента регенерации меньше дыхательного коэффициента. Подобный негативный результат обуславливал необходимость переработки конструкции регенеративного патрона с целью увеличения коэффициента регенерации. В случае же испытания респиратора в режимах с дыхательным коэффициентом, равным 1, дыхательный аппарат успешно прошел бы испытания на динамической установке, но представлял угрозу жизни человека в реальных условиях.

Поэтому, для правильной имитации метаболических процессов потребления кислорода и выделения диоксида углерода, при применении ГОСТ 12.4.292-2015 целесообразно вычислять объем отбираемой газовой дыхательной смеси по формуле (2), однако объемный расход подаваемого азота должен быть меньше объема отбираемой газовой дыхательной смеси на значение, определяемое дыхательным коэффициентом, и должен вычисляться по формуле

$$Q_{N_2} = Q_{ГДС} - \left(\frac{Q_{CO_2}}{ДК} - Q_{CO_2} \right). \quad (3)$$

Применение формул (2) и (3) позволит обеспечить отбор газовой дыхательной смеси в объеме, пропорциональном объемной доле кислорода в воздухопроводной системе аппарата, и в то же время соотношение объемов отбираемой газовой дыхательной смеси и поданного азота будет имитировать уменьшение объема газовой дыхательной смеси (дыхательный коэффициент), происходящее при дыхании человека.

Однако и этот подход не позволяет ликвидировать еще один (наиболее серьезный) недостаток данной методики – искажение объемной доли диоксида

углерода во вдыхаемом воздухе, поскольку при увеличении объема удаляемой газовой смеси все большая часть диоксида углерода замещается азотом.

Отдельные стандарты (российский ГОСТ Р 12.4.253-2011, украинский ДСТУ 3856-99, советский ОСТ 12.43.247-83) регламентируют отбор газовой дыхательной смеси в большем объеме, чем подача диоксида углерода (табл. 3).

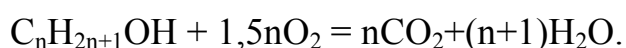
Таблица 3

Параметры дыхательных режимов согласно ГОСТ Р 12.4.253-2011

Режим испытаний	Состояние покоя	Работа средней тяжести	Тяжелая работа	Очень тяжелая работа
Выделение CO ₂ , дм ³ /мин	0,4	1,0	2,0	3,0
Потребление O ₂ , дм ³ /мин	0,47	1,14	2,22	3,16
Дыхательный коэффициент	0,85	0,88	0,90	0,95
Легочная вентиляция, дм ³ /мин	12,5	30,0	60,0	85,0
Дыхательный объем, дм ³	0,83	1,50	2,40	2,83
Частота дыхания, мин ⁻¹	15	20	25	30

Такой подход позволяет симитировать при испытаниях дыхательный коэффициент, но искажает объемную долю кислорода и диоксида углерода в газовой дыхательной смеси. Относительно кислорода указано в самом стандарте, что фиксируемое значение объемной доли кислорода – не истинная величина и может служить только в качестве параметра, позволяющего судить о герметичности испытуемого аппарата, динамической установки, присоединения аппарата к динамической установке.

Таким образом, проанализировав существующие подходы к имитации потребления кислорода, можно сделать вывод, что наибольшее соответствие протекающим в организме человека метаболическим процессам наблюдается при сжигании спиртов, которое описывается в общем случае химической реакцией



Подбирая необходимое количество подаваемого в горелку спирта, можно обеспечить требуемое образование диоксида углерода и практически соответствующее физиологическим нормам потребление кислорода.

Выводы. Рассмотрены существующие подходы к имитации физиологических процессов потребления кислорода и выделения диоксида углерода при работе динамических установок с искусственными легкими, определены их достоинства и недостатки, предложена формула, позволяющая имитировать потребление организмом кислорода и выделение диоксида углерода в соответствии с дыхательным коэффициентом наиболее адекватно метаболическим процессам, протекающим в человеческом организме.

Список литературы / References

1. Физиология человека / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2007. – 656 с.

Pokrovskiy, V.M., Korot'ko, G.F. eds. *Fiziologiya cheloveka. 2-ye izd., pererab. i dop.* [Human physiology. 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow, Meditsina Publ., 2007, 656 p.

2. Сергеева, М.А. Исследование регрессионной модели влияния индекса массы тела на дыхательный коэффициент / М.А. Сергеева, С.В. Жернаков // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2019. – С. 58 – 69.

Sergeyeva, M.A., Zhernakov, S.V. *Issledovaniye regressionnoy modeli vliyaniya indeksa massy tela na dykhatel'nyy koeffitsiyent* [Regression model investigation of body mass ratio influencing the respiratory quotient]. *Perspektivnyye nauchnyye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sbornik statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Advanced scientific research: experience, problems and prospects of development: collection of articles following the materials of the International scientific and practical conference]. Ufa, 2019, pp. 58 – 69.

3. Романов, Ю.Н. Физиологическое обоснование интегральной подготовки в кикбоксинге / Ю.Н. Романов, А.П. Исаев // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. – 2013. – № 2(96). – С. 144 – 149.

Romanov, Yu.N., Isayev, A.P. *Fiziologicheskoye obosnovaniye integral'noy podgotovki v kikboksinge* [Physiological rationale of integral training in kickboxing]. *Uchenyye zapiski universiteta imeni P.F. Lesgafta – Proceedings of the Lesgaft National State University of Physical Education, Sports and Health*, 2013, no. 2(96), pp. 144 – 149.

4. Корнеева, И.Т. Функциональное состояние подростков, занимающихся спортом, по данным сердечно-легочного теста // Материалы I Всероссийского конгресса «Медицина для спорта» – 2011 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sportmedicine.ru/medforsport-2011-papers/korneeva2.php> (дата обращения: 10.05.2020).

Korneyeva, I.T. *Funktsional'noye sostoyaniye podrostkov, zanimayushchikhsya sportom, po dannym serdechno-lyegochnogo testa* [Functional state of teenagers going in for sports according to cardiopulmonary test data]. *Materialy I Vserossiyskogo kongressa "Meditsina dlya sporta" – 2011* [Materials of the 1st All-Russian congress "Medicine for Sports" – 2011] [*Elektronnyy resurs*] (Electronic resource). Available at: <http://www.sportmedicine.ru/medforsport-2011-papers/korneeva2.php> (accessed: 10.05.2020).

5. Эрлих, В.В. Сезонные биоритмы кардиопульмональной системы бегуний на средние дистанции в условиях концентрированного развития локально-региональной мышечной выносливости на территории среднегорья

в макроцикле подготовки // Вестник Южноуральского государственного университета. Серия: Образование, здравоохранение, физическая культура. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 42 – 47.

Erlikh, V.V. *Sezonnyye bioritmy kardiopul'monal'noy sistemy beguniy na sredniye distantsii v usloviyakh kontsentririrovannogo razvitiya lokal'no-regional'noy myshechnoy vynoslivosti na territorii srednegor'ya v makrotsikle podgotovki* [Seasonal biorhythms of the cardiopulmonary system of female middle-distance runners in conditions of concentrated development of local and peripheral muscle endurance in a middle-altitude territory during the preparation macrocycle]. *Vestnik Yuzhnoural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Obrazovaniye, zdravookhraneniye, fizicheskaya kul'tura* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Education, health care, physical education]. 2013, vol. 13, no. 2, pp. 42 – 47.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 28.05.2020

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;
Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: oszd_niigd_1@mail.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

SIMULATION OF OXYGEN CONSUMPTION DURING TESTINGS OF BREATHING APPARATUSES

Purpose. To investigate the oxygen consumption parameters for specifying the breathing apparatus test modes that most closely correspond to human metabolic processes.

Methodology. Theoretical methods of investigations.

Results. The conducted investigations have made it possible to determine the breathing apparatuses test modes most closely corresponding to the human metabolic processes.

Scientific novelty. The parameters of the oxygen consumption system have been determined ensuring the simulation of the human metabolic processes during respiration.

Practical value. The obtained results of investigations have enabled formulating the requirements for the oxygen consumption simulation during testing the breathing apparatuses on a dynamic installation with respiratory simulation system.

Keywords: *breathing apparatus; dynamic installation; respiratory simulation system; oxygen consumption; carbon dioxide release; respiratory quotient; respiratory mode.*

УДК 621.311.1.019.3

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

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,

пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-46

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Цель. Разработать метод оценки надежности структурно-сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, используя способ разложения схемы замещения по базовой группе.

Методика. Применен способ разложения схемы замещения невосстанавливаемой сложной системы по базовому элементу, основанный на использовании теоремы о сумме вероятностей несовместных событий.

Результаты. Разработан новый метод оценки надежности структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, отказ типа «обрыв цепи», отказ типа «короткое замыкание».

Научная новизна. Получены новые аналитические зависимости, которые позволяют определить вероятность того, что в течение конкретного времени в исследуемой системе не произойдет такое событие, в результате которого случится разрыв связи или пройдет не отключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток короткого замыкания между входным и выходными узлами ее схемы замещения при условии, что в начальный момент времени все элементы системы находились в работоспособном состоянии.

Практическая значимость. Разработанный метод оценки надежности сложных по структуре схем позволяет упростить расчетные схемы замещения системы, сократить трудоемкость и время расчетов. Точность расчетов надежности невосстанавливаемой системы не уступает существующим апробированным методам.

Ключевые слова: сложная по структуре схема замещения; надежность; группа базовых элементов; обрыв цепи; короткое замыкание.

Актуальность. Под системой в данном случае будем понимать совокупность взаимосвязанных конструктивно независимых изделий, которые обладают свойством перестраивать свою структуру в результате случайного повреждения некоторых ее элементов, не нарушая выполнения поставленной перед ней задачи [1].

Под невосстанавливаемой системой будем понимать такую восстанавливаемую, элементы которой при их повреждении не могут быть отремонтированы (заменены) за рассматриваемый интервал времени.

К невосстанавливаемым системам следует относить, например, трансформаторные подстанции без постоянно присутствующего персонала, системы энергоснабжения беспилотных подводных и надводных аппаратов и т.д.

Если необходимо повысить надежность проектируемой системы без изменения надежности комплектующих ее элементов, обычно вводят избыточные (резервные) элементы либо изменяют структурную схему сети.

Для систем, состоящих из элементов, которые могут находиться в трех несовместных состояниях (работоспособное, неработоспособное – отказ типа «обрыв цепи», неработоспособное – отказ типа «короткое замыкание»), введение избыточных элементов или изменение структурной схемы сети может не только не увеличить надежность, но даже значительно ее снизить. Все будет зависеть от соотношения между различными видами отказов элемента схемы, ее конфигурации, количества резервных элементов или их групп.

Поэтому разработка новых и усовершенствование существующих методов оценки надежности невосстанавливаемых структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, – актуальная задача.

Анализ последних исследований и публикаций. Для расчетной схемы замещения, которая состоит из i ($i = \overline{1, n}$) логически последовательно соединенных элементов, аварийное отключение (обрыв цепи) любого из i элементов приводит к разрыву связи между точками «вход» и «выход».

В том случае, когда у каждого из i логически последовательно соединенных элементов произойдет отказ типа «короткое замыкание», то это приведет к тому, что между точками «вход» и «выход» схемы замещения пройдет неотключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток короткого замыкания (КЗ). Существовать такой режим в сети будет до тех пор, пока не выгорят силовые проводники в месте КЗ.

Вероятность R_n того, что не произойдет разрыв связи и не пройдет неотключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток КЗ между точками «вход» и «выход» схемы замещения системы, которая состоит из i логически последовательно соединенных элементов, находим с помощью формулы

$$R_n = \prod_{i=1}^n (1 - q_{oi}) - \prod_{i=1}^n q_{si}, \quad (1)$$

где q_{oi} – вероятность того, что в i -м элементе произойдет отказ типа «обрыв цепи»;

q_{si} – вероятность того, что в i -м элементе произойдет отказ типа «короткое замыкание».

Индексы « o » и « s » в формуле (1) указывают на то, что учитывают отказы элемента схемы замещения типа «обрыв цепи» и типа «короткое замыкание» соответственно.

Для расчетной схемы замещения системы, которая состоит из j ($j = \overline{1, m}$) логически параллельно соединенных элементов, аварийное отключение (обрыв цепи) каждого из j элементов приведет к обрыву связи между точками «вход» и «выход».

Если у любого из j логически параллельно соединенных элементов произойдет отказ типа «короткое замыкание», то это приведет к тому, что

между точками «вход» и «выход» расчетной схемы замещения системы пройдет сквозной не отключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ.

Вероятность R_m для j логически параллельно соединенных элементов определяют с помощью формулы

$$R_m = \prod_{j=1}^m (1 - q_{sj}) - \prod_{j=1}^m q_{oj}, \quad (2)$$

где q_{oi} – вероятность того, что в i -м элементе произойдет отказ типа «обрыв цепи»;

q_{si} – вероятность того, что в i -м элементе произойдет отказ типа «короткое замыкание».

Формулы (1) и (2) справедливы при выполнении условия: $q_{oi} + q_{si} < 1$, $q_{oj} + q_{sj} < 1$ и получены в работе [2].

Оценить надежность сложной по структуре схемы замещения невосстанавливаемой системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, можно, используя: логико-вероятностный метод и алгебру кортежей [3]; логико-вероятностный метод и трехзначную логику [4]; метод разложения сложных структур по базовому элементу [1].

Применение методов из работ [3, 4] для оценки надежности невосстанавливаемых структурно-сложных систем вызывает определенные трудности, так как в своей основе они используют достаточно сложные понятия – такие, как алгебра кортежей и трехзначная логика.

Для инженеров более понятны методы оценки надежности сложных невосстанавливаемых систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, если задана схема замещения реальной системы и разработаны четкие правила, которые позволяют сложную схему замещения преобразовать в простую, а затем, используя формулы (1) и (2), получить эквивалентные параметры ее надежности.

Цель исследования. Разработать новый, простой в использовании метод оценки надежности структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, используя способ разложения схемы замещения по базовой группе.

Основной материал исследования. Под методикой расчета надежности невосстанавливаемой структурно-сложной системы, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, будем понимать существование метода, в состав которого входит: правило построения расчетной схемы замещения системы; план наблюдения за эксплуатацией ее оборудования; математическая модель, которая используется для оценки надежности сети; алгоритм решения поставленной задачи за конечное время.

Если известна (составлена) схема замещения системы и получены характеристики надежности ее элементов: q_{oi} и q_{si} , тогда, используя один или

несколько раз разложения ее по i -му базовому элементу, в результате чего сложная схема замещения преобразуется в ряд простых. Используя полученные простые схемы замещения системы, формулы (1) и (2), определяем ее надежность [1].

$$R = p_{oi}R_{01} + q_{oi}R_{02} - (q_{si}Q_{s1} + p_{si}Q_{s2}), \quad (3)$$

где R – вероятность того, что не произойдет разрыв связи и не пройдет не отключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток КЗ между узлами «вход» и «выход» схемы замещения, если в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

p_{oi} – вероятность того, что в i -м базовом элементе схемы замещения системы не произойдет обрыв цепи;

R_{01} – вероятность того, что не произойдет разрыв связи между узлами «вход» и «выход» схемы замещения исходной системы, у которой вместо i -го элемента стоит абсолютно надежная линия с неограниченной пропускной способностью;

q_{oi} – вероятность того, что в i -м базовом элементе схемы замещения системы произойдет обрыв цепи;

R_{02} – вероятность того, что не произойдет разрыв связи между узлами «вход» и «выход» схемы замещения системы, у которой вместо i -го элемента разорвана цепь;

q_{si} – вероятность того, что через i -й базовый элемент схемы замещения пройдет сквозной не отключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ;

Q_{s1} – вероятность того, что пройдет не отключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток КЗ между узлами «вход» и «выход» схемы замещения системы, у которой вместо i -го элемента стоит надежная линия с неограниченной пропускной способностью;

p_{si} – вероятность того, что через i -й базовый элемент схемы замещения системы не пройдет сквозной не отключаемый токовой защитой аварийный ток КЗ;

Q_{s2} – вероятность того, что пройдет сквозной аварийный ток между узлами «вход» и «выход» схемы замещения системы, у которой вместо i -го элемента разорвана цепь.

Используя аналогичные рассуждения, приведенные в работе [1], получили формулы разложения сложной по структуре схемы замещения системы по базовой группе:

- базовая группа состоит из двух элементов i и j

$$R = p_{oi}p_{oj}R_{01} + q_{oi}p_{oj}R_{02} + p_{oi}q_{oj}R_{03} + q_{oi}q_{oj}R_{04} - (q_{si}q_{sj}Q_{s1} + p_{si}q_{sj}Q_{s2} + q_{si}p_{sj}Q_{s3} + p_{si}p_{sj}Q_{s4}); \quad (4)$$

- базовая группа состоит из трех элементов i, j, k

$$R = p_{oi}p_{oj}p_{ok}R_{01} + q_{oi}p_{oj}p_{ok}R_{02} + p_{oi}q_{oj}p_{ok}R_{03} + p_{oi}p_{oj}q_{ok}R_{04} + q_{oi}p_{oj}q_{ok}R_{05} + p_{oi}q_{oj}q_{ok}R_{06} + \\ + q_{oi}q_{oj}p_{ok}R_{07} + q_{oi}q_{oj}q_{ok}R_{08} - (q_{si}q_{sj}q_{sk}Q_{s1} + p_{si}q_{sj}q_{sk}Q_{s2} + q_{si}p_{sj}q_{sk}Q_{s3} + q_{oi}q_{sj}p_{sk}Q_{s4} + \\ + p_{si}q_{sj}p_{sk}Q_{s5} + q_{si}p_{sj}p_{sk}Q_{s6} + p_{si}p_{sj}q_{sk}Q_{s7} + p_{si}p_{sj}p_{sk}Q_{s8}). \quad (5)$$

Аналогичным образом можно записать формулу для разложения сложной схемы замещения системы по базовой группе, которая состоит из конечного количества элементов.

Например, при разложении сложной по структуре схемы замещения системы по базовой группе, которая состоит из четырех элементов i, j, k, v , формула для определения R будет иметь вид

$$R = p_{oi}p_{oj}p_{ok}p_{ov}R_{01} + q_{oi}p_{oj}p_{ok}p_{ov}R_{02} + p_{oi}q_{oj}p_{ok}p_{ov}R_{03} + p_{oi}p_{oj}q_{ok}p_{ov}R_{04} + p_{oi}p_{oj}p_{ok}q_{ov}R_{05} + \\ + q_{oi}p_{oj}p_{ok}q_{ov}R_{06} + p_{oi}q_{oj}p_{ok}q_{ov}R_{07} + p_{oi}p_{oj}q_{ok}q_{ov}R_{08} + p_{oi}q_{oj}q_{ok}p_{ov}R_{09} + q_{oi}p_{oj}q_{ok}p_{ov}R_{010} + \\ + q_{oi}q_{oj}p_{ok}p_{ov}R_{011} + q_{oi}p_{oj}q_{ok}q_{ov}R_{012} + q_{oi}q_{oj}p_{ok}q_{ov}R_{013} + p_{oi}q_{oj}q_{ok}q_{ov}R_{014} + q_{oi}q_{oj}q_{ok}p_{ov}R_{015} + \\ + q_{oi}q_{oj}q_{ok}q_{ov}R_{016} - (q_{si}q_{sj}q_{sk}q_{sv}Q_{s1} + p_{si}q_{sj}q_{sk}q_{sv}Q_{s2} + q_{si}p_{sj}q_{sk}q_{sv}Q_{s3} + q_{si}q_{sj}p_{sk}q_{sv}Q_{s4} + \\ + q_{si}q_{sj}q_{sk}p_{sv}Q_{s5} + p_{si}q_{sj}q_{sk}p_{sv}Q_{s6} + q_{si}p_{sj}q_{sk}p_{sv}Q_{s7} + q_{si}q_{sj}p_{sk}p_{sv}Q_{s8} + q_{si}p_{sj}p_{sk}q_{sv}Q_{s9} + \\ + p_{si}q_{sj}p_{sk}q_{sv}Q_{s10} + p_{si}p_{sj}q_{sk}q_{sv}Q_{s11} + p_{si}q_{sj}p_{sk}p_{sv}Q_{s12} + p_{si}p_{sj}q_{sk}p_{sv}Q_{s13} + q_{si}p_{sj}p_{sk}p_{sv}Q_{s14} + \\ + p_{si}p_{sj}p_{sk}q_{sv}Q_{s15} + p_{si}p_{sj}p_{sk}p_{sv}Q_{s16}). \quad (6)$$

Обычно для преобразования сложных по структуре схем замещения технических систем достаточно использовать несколько раз разложение сложной структуры по одному базовому элементу. Однако для уменьшения времени расчетов и упрощения схем замещения в некоторых случаях целесообразно использовать разложение сложных технических структур по базовым группам, состоящим из двух элементов – формула (4) и соответственно трех базовых элементов – формула (5) либо четырех – (6).

Выбирают базовый элемент (группу базовых элементов), по которому следует разложить сложную по структуре расчетную схему замещения, по следующему общему правилу:

- в качестве базовых элементов в сложных по структуре схемах замещения системы могут быть выбраны любые элементы, которые соединяют между собой два соседних узла, кроме тех элементов, которые непосредственно соединяются с входными или выходными ее узлами;

- при разложении сложных по структуре схем замещения системы по базовой группе в нее нельзя включать элементы, которые образуют «сечение» или «минимальное сечение» [5];

- порядок выбора базовых элементов или их групп не влияет на точность результатов расчета надежности системы, а влияет только на время, затраченное на решение конкретной задачи.

Пример

Задана схема замещения системы (см. рисунок).

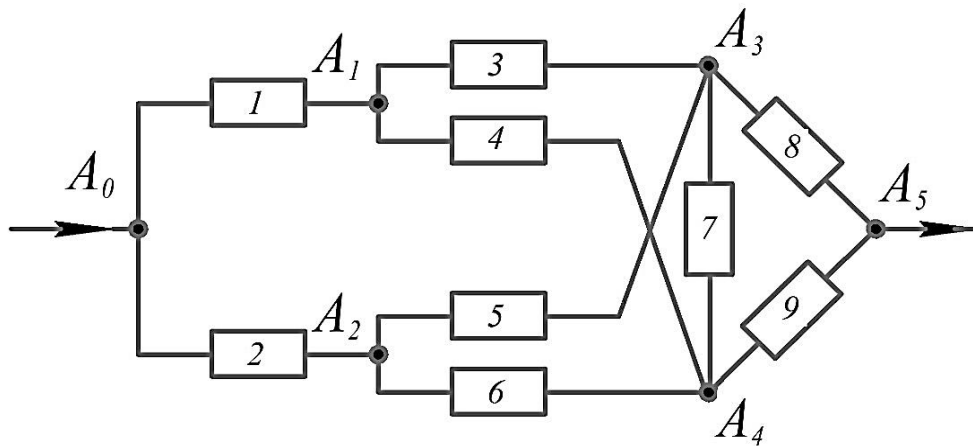


Схема замещения сложной по структуре системы

В процессе наблюдения $T = 8760$ ч за эксплуатацией элементов ($i = \overline{1,9}$) двенадцати однотипных систем ($N=12$) был выявлен ряд повреждений их элементов (таблица, столбцы 2 и 3), где n_{oi} , n_{si} – количество выявленных случаев повреждений i -х элементов системы, которые были отнесены к отказам типа «обрыв цепи» либо отказам типа «короткое замыкание» соответственно. В столбце 1 этой же таблицы указаны номера элементов схемы замещения (см. рисунок).

Параметры надежности схемы замещения системы

i	n_{oi}	n_{si}	$\lambda_{oi}, \text{ч}^{-1}$	$\lambda_{si}, \text{ч}^{-1}$	$q_{oi} = q_{oi}(2)$	$q_{si} = q_{si}(2)$
1	2	3	4	5	6	7
1	10	6	0,000095	0,000057	0,000190	0,000114
2	11	5	0,000105	0,000047	0,000021	0,000094
3	6	3	0,000057	0,000028	0,000114	0,000056
4	8	7	0,000076	0,000066	0,000152	0,000132
5	9	8	0,000086	0,000076	0,000172	0,000152
6	7	6	0,000067	0,000057	0,000134	0,000114
7	3	2	0,000028	0,000019	0,000056	0,000038
8	5	3	0,000047	0,000028	0,000094	0,000056
9	6	4	0,000057	0,000038	0,000114	0,000076

Определить $R = R(t)$, вероятность того, что в течение времени $t = 2$ ч не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или проходит не отключаемый токовой защитой сквозной аварийный ток КЗ между узлами A_0 и A_5 схемы замещения системы, если в начальный момент времени все элементы находились в работоспособном состоянии.

Решение примера

Используя исходные данные примера (таблица, столбцы 2 и 3), находим $\lambda_{oi}, \lambda_{si}$ [5]:

$$\lambda_{oi} = \frac{n_{oi}}{NT}; \quad (7)$$

$$\lambda_{si} = \frac{n_{si}}{NT}, \quad (8)$$

где $\lambda_{oi}, \lambda_{si}$ – интенсивность повреждений i -х элементов схемы замещения системы при учете отказа типа «обрыв цепи» и отказа типа «короткое замыкание» соответственно.

Результаты расчетов заносят в таблицу, столбцы 4 и 5.

Вероятности отказов $q_{oi}(t)$ и $q_{si}(t)$ i -х элементов схемы замещения системы при учете отказа типа «обрыв цепи» и отказа типа «короткое замыкание» соответственно определяют с помощью формул [2]

$$q_{oi} = q_{oi}(t) = \frac{\lambda_{oi}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} [1 - e^{-(\lambda_{oi} + \lambda_{si})t}]; \quad (9)$$

$$q_{si} = q_{si}(t) = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{oi} + \lambda_{si}} [1 - e^{-(\lambda_{oi} + \lambda_{si})t}]. \quad (10)$$

Используя формулы (7), (8), исходные данные примера (таблица, столбцы 4 и 5), для $t = 2$ ч находим $q_{oi} = q_{oi}(2)$, $q_{si} = q_{si}(2)$. Результаты расчетов заносим в столбцы 6 и 7 этой же таблицы.

Разложение сложной по структуре схемы замещения системы (см. рисунок) будем вести сначала по выбранному базовому элементу 7, используя формулу (3), а затем по базовой группе, которая состоит из элементов 3; 4; 5, используя формулу (5), а затем по базовому элементу 6. В результате применения перечисленных преобразований формула для нахождения R примет вид

$$\begin{aligned} R = & p_{07}R_{01} + p_{03}p_{04}p_{05}q_{07}R_{02} + p_{03}q_{04}p_{05}q_{07}R_{03} + p_{03}p_{04}q_{05}q_{07}R_{04} + q_{03}p_{04}q_{05}q_{07}R_{05} + \\ & + p_{03}q_{04}q_{05}q_{07}R_{06} + q_{03}q_{04}p_{05}q_{07}R_{07} + q_{03}q_{04}q_{05}q_{07}R_{08} + p_{06}q_{03}p_{04}p_{05}q_{07}R_{09} + \\ & + q_{06}q_{03}p_{04}p_{05}q_{07}R_{010} - (q_{s7}Q_{s1} + q_{s3}q_{s4}q_{s5}p_{s7}Q_{s2} + q_{s3}p_{s4}q_{s5}p_{s7}Q_{s3} + q_{s3}q_{s4}p_{s5}p_{s7}Q_{s4} + \\ & + p_{s3}q_{s4}p_{s5}p_{s7}Q_{s5} + q_{s3}p_{s4}p_{s5}p_{s7}Q_{s6} + p_{s3}p_{s4}q_{s5}p_{s7}Q_{s7} + p_{s3}p_{s4}p_{s5}p_{s7}Q_{s8} + \\ & + q_{s6}p_{s3}q_{s4}q_{s5}p_{s7}Q_{s9} + p_{s6}p_{s3}q_{s4}q_{s5}p_{s7}Q_{s10}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $R_{01} = (1 - q_{08}q_{09})\{1 - [1 - p_{01}(1 - q_{03}q_{04})][1 - p_{02}(1 - q_{05}q_{06})]\};$

$Q_{s1} = (1 - p_{s8}p_{s9})\{1 - [1 - q_{s1}(1 - p_{s3}p_{s4})][1 - q_{s2}(1 - p_{s5}p_{s6})]\};$

$R_{02} = (1 - q_{01}q_{02})(1 - q_{08}q_{09});$

$Q_{s2} = (1 - p_{s1}p_{s2})(1 - p_{s8}p_{s9});$

$R_{03} = (1 - q_{01}q_{02})[1 - q_{08}(1 - p_{06}p_{09})];$

$$\begin{aligned}
Q_{s3} &= (1 - p_{s1}p_{s2})[1 - p_{s8}(1 - q_{s6}q_{s9})]; \\
R_{04} &= [1 - q_{01}(1 - p_{02}p_{06})](1 - q_{08}q_{09}); \\
Q_{s4} &= [1 - p_{s1}(1 - q_{s2}q_{s6})](1 - p_{s8}p_{s9}); \\
R_{05} &= p_{09}[1 - q_{01}(1 - p_{02}p_{06})]; \\
Q_{s5} &= q_{s9}[1 - p_{s1}(1 - q_{s2}q_{s6})]; \\
R_{06} &= [1 - (1 - p_{01}p_{08})(1 - p_{02}p_{06}p_{09})]; \\
Q_{s6} &= [1 - (1 - q_{s1}q_{s8})(1 - q_{s2}q_{s6}q_{s9})]; \\
R_{07} &= p_{02}[1 - q_{08}(1 - p_{06}p_{09})]; \\
Q_{s7} &= q_{s2}[1 - p_{s8}(1 - q_{s6}q_{s9})]; \\
R_{08} &= p_{02}p_{06}p_{09}; \\
Q_{s8} &= q_{s2}q_{s6}q_{s9}; \\
R_{09} &= (1 - q_{01}q_{02})(1 - q_{08}q_{09}); \\
Q_{s9} &= (1 - p_{s1}p_{s2})(1 - p_{s8}p_{s9}); \\
R_{10} &= 1 - (1 - p_{01}p_{09})(1 - p_{02}p_{08}); \\
Q_{10} &= 1 - (1 - q_{s1}q_{s9})(1 - q_{s2}q_{s8}).
\end{aligned}$$

Подставим исходные данные примера (таблица, столбцы 6 и 7) в формулу (11) и учитывая, что $P_{oi} = P_{oi}(2) = 1 - q_{oi}(2)$; $P_{si} = P_{si}(2) = 1 - q_{si}(2)$, где $(i = \overline{1,9})$, находим: $R=0,999999949$.

Аналогичный результат получен, если разложение схемы замещения (см. рисунок) вести сначала по базовой группе, которая состоит из элементов 3, 4, 5, 7, а затем еще и по базовому элементу 6, используя формулы (6) и (3) соответственно.

Вывод. Разработан новый, простой в использовании метод оценки надежности структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, он отличается от известного тем, что разложение сложной схемы замещения ведется не по одному элементу, а сразу по целой группе, что значительно упрощает схему замещения и время расчетов.

Список литературы / References

1. Ковалев, А.П. Метод расчетов надежности невосстанавливаемых сложных по структуре систем, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях / А.П. Ковалев, И.И. Москвина, А.А. Павлович // Электричество. – 2019. – № 10. – С. 21 – 28.

Kovalyov, A.P., Moskvina, I.I., Pavlovich, A.A. *Metod raschyetov nadyezhnosti nevosstanavlivayemykh slozhnykh po strukture sistem, elementy kotorykh mogut nakhodit'sya v tryekh nesovmestnykh sostoyaniyakh* [Method of calculations of reliability of structurally complex non-restorable systems which elements may exist in three incompatible states]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2019, no. 10, pp. 21 – 28.

2. Ковалев, А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности структурно-сложных систем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // *Электричество*. – 2000. – № 9. – С. 66 – 70.

Kovalyov, A.P., Spivakovskiy, A.V. *Primeneniye logiko-veroyatnostnykh metodov dlya otsenki nadyezhnosti strukturno-slozhnykh sistem* [Application of logic-and-probabilistic methods for evaluation of reliability of structurally complex systems]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2000, no. 9, pp. 66 – 70.

3. Кулик, Б.А. Логико-вероятностные методы и алгебра кортежей // Теория, информационная техника моделирования безотказности сложных систем. – СПб.: ИПРАН, 1995. – Вып. 5. – С. 18 – 67.

Kulik, B.A. *Logiko-veroyatnostnyye metody i algebra kortezhey* [Logic-and-probabilistic methods and PI-algebra of finite sequences]. *Teoriya, informatsionnaya tekhnika modelirovaniya bezotkaznosti slozhnykh sistem* [Theory, information technology of modeling the reliability of complex systems]. St. Petersburg, IPRAN Publ., 1995, issue 5, pp. 18 – 67.

4. Смирнов, А.С. Анализ надежности структурно-сложных электрических схем с учетом двух типов отказов / А.С. Смирнов, Д.О. Гайдамович // *Электричество*. – 2001. – № 2. – С. 50 – 56.

Smirnov, A.S., Gaydamovich, D.O. *Analiz nadyezhnosti strukturno-slozhnykh elektricheskikh skhem s uchyetom dvukh tipov otkazov* [Analysis of reliability of structurally complex electric circuits with allowance for two types of failures]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2001, no. 2, pp. 50 – 56.

5. Ковалев, А.П. О расчете надежности невосстанавливаемых структурно-сложных систем, элементы которых могут находиться в трех несовместимых состояниях / А.П. Ковалев, И.И. Москвина, А.А. Павлович // *Промышленная энергетика*. – 2018. – № 12. – С. 9 – 15.

Kovalyov, A.P., Moskvina, I.I., Pavlovich, A.A. *O raschyete nadyezhnosti nevosstanavlivayemykh strukturno-slozhnykh sistem, elementy kotorykh mogut nakhodit'sya v tryekh nesovmestimyykh sostoyaniyakh* [On calculation of reliability of structurally complex non-restorable systems which elements may exist in three incompatible states]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2018, no. 12, pp. 9 – 15.

*Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: abrecap@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-46*

METHODOLOGY OF CALCULATING THE RELIABILITY OF COMPLEX NON-RESTORABLE SYSTEMS

Purpose. To develop a method of evaluation of reliability of structurally complex non-restorable systems which elements may exist in three incompatible states, using the method of expanding the equivalent circuit according to a base group.

Methodology. The method of expanding the equivalent circuit of the non-restorable complex system according to a base element has been applied which is based on using the theorem of the sum of probabilities of incompatible events.

Results. The new method for evaluation of reliability of the structurally complex non-restorable systems has been developed which elements may exist in three incompatible states, i.e. serviceable condition, “open-circuit” failure, “short-circuit” failure.

Scientific novelty. The new analytical dependences have been obtained which make it possible to determine the probability of the fact that such an event will not happen during the specific time in the investigated system that will result in a communication break or let-through fault current coming through between the input and output nodes of its equivalent circuit without being disconnected by the current protection provided that all elements of the system are in the operational condition at the zero time.

Practical value. The developed method of evaluation of reliability of structurally complex circuits permits to simplify design diagrams of the substitution system, to reduce labor intensity and calculation time. The precision of calculations of the non-restorable system reliability is equal to existing tested methods.

Keywords: *structurally complex equivalent circuit; reliability; base element group; open-circuit failure; short-circuit failure.*

Требования к оформлению 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 отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;
- 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;
- описание методики (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 9 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, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2020, № 3(57)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик Л.А. Ахундова

Верстальщик 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

Подписано к использованию 10.09.2020.
Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048
Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-64
Объем 4,88 Мб
E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 10 сентября 2020 г.