



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 4(56)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2019

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 4(56). – 114 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 № 6 от 23.09.2019).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD "RESPIRATOR"

Scientific-technical journal

No. 4(56)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2019

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2019. – No. 4(56). – 114 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. 6 from 23.09.2019).

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

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

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

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

- Агеев В.Г., Пефтибай Г.И.,
Галухин Н.А., Еремин А.В.**
Ультразвуковое пожаротушащее
устройство 7

- Греков С.П., Орликова В.П.,
Всякий А.А.**
Обоснование параметров склонности
углей к самовозгоранию 17

- Симонов А.М., Карнаух Н.В.,
Захлебин В.В., Агарков Ал.В.**
Использование метода графов при
проведении депрессионных съемок
в шахтах 25

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

- Долженков А.Ф., Янченко А.Н.**
Эффективность сорбентов на основе
природных пористых материалов 35

- Агарков Ан.В., Козлитин А.А.,
Лебедева В.В., Щербакова О.Н.**
Влияние фракционного состава
на сорбционные свойства углеродных
сорбентов 44

- Балта Д.Ф.**
Оптимальные условия тушения
склонных к тлению твердых материалов 54

- Дрипан П.С.**
Ударная нагрузка при установке
анкера в породный массив 65

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

- Ageyev V.G., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A., Yeryomin A.V.**
Ultrasonic fire-extinguishing device

- Grekov S.P., Orlikova V.P.,
Vsyakiy A.A.**
Substantiation of parameters of coal liability
to spontaneous combustion

- Simonov A.M., Karnaukh N.V.,
Zakhlebin V.V., Agarkov Al.V.**
Application of the graph method during
carrying out depression surveys in mines

II. Safety in emergencies

- Dolzhenkov A.F., Yanchenko A.N.**
Effectiveness of sorbents based
on natural porous materials

- Agarkov An.V., Kozlitin A.A.,
Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N.**
Influence of the fractional composition
on sorption properties of carbon sorbents

- Balta D.F.**
Optimal conditions of extinguishing
solid materials liable to smouldering

- Dripan P.S.**
Impact load during setting an anchor
into a rock massif

III. Охрана труда и экологическая безопасность

Мамаев В.В., Иваненко А.Ф.

Контроль функционального состояния
горноспасателя во время аварийно-
спасательных работ

72

**Зборщик Л.А., Плетенецкий Р.С.,
Чапкович А.В., Котляров В.Л.**

Эффективность фракционного анализа
при разделении твердых сыпучих
веществ

81

**Зинченко И.Н., Пашковский О.П.,
Волынец В.В.**

Связь между температурой породного
отвала и количеством выделяемых
вредных веществ

89

Попов В.Г.

Удельный расход жидкостей для
обеззараживания облаков аварийно
химически опасных веществ

95

**Соловьев Г.И., Касьяненко А.Л.,
Стариков Г.П., Петренко Ю.А.**

Обеспечение устойчивости пород почвы
путем использования несущей
способности прочного слоя

105

Требования к оформлению статьи

113

III. Labor protection and environmental safety

Mamayev V.V., Ivanenko A.F.

Monitoring of a functional state of a mine
rescuer during emergency-rescue operations

**Zborshchik L.A., Pletenetskiy P.S.,
Chapkovich A.V., Kotlyarov V.L.**

Effectiveness of the fractional analysis
during separation of solid granular
substances

**Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P.,
Volynets V.V.**

Relationship between a waste rock pile
temperature and amount of emitted
harmful substances

Popov V.G.

Specific discharge of liquids for
decontamination of clouds of chemically
hazardous substances conducive
to accidents

**Solovyov G.I., Kasyanenko A.L.,
Starikov G.P., Petrenko Yu.A.**

Ensuring of stability of bed floor rocks
by using the load-bearing ability
of a durable layer

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [614.844.2:62-181.4]:532.525.3

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

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

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

Антон Витальевич Еремин, инж.-конструктор I кат.; e-mail: a.v.eremin18@gmail.com

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОЖАРОТУШАЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Цель. Разработка устройства с ультразвуковым распылением воды для тушения пожаров в начальной стадии возгорания.

Методы. Информационно-аналитические исследования конструктивных схем устройств пожаротушения тонкораспыленной водой.

Результаты. Разработана конструктивная схема устройства для тушения пожаров с ультразвуковым газоструйным распылением воды.

Научная новизна. Предложена конструкция пожарного ствола, в ультразвуковую камеру которого пожаротушащая жидкость поступает с распылительного диска в виде элементарных щелевых или цилиндрических струек коаксиально продольной оси газокапельного сопла.

Практическая значимость. Разработанное пожаротушащее устройство с ультразвуковым газоструйным распылением воды позволяет получить высокоскоростной газокапельный поток с высокими показателями дисперсности, равномерности распределения и дальноточности, что позволяет повысить эффективность тушения пожара за счет сокращения расхода воды, исключения проливов и сокращения материального ущерба.

Ключевые слова: *пожаротушащее устройство; ультразвуковое распыление; генератор Гартмана; газокапельное сопло; ствол; резонатор.*

Постановка проблемы. Ранцевые установки пожаротушения предназначены для тушения локальных очагов пожара в начальной стадии возгорания. Поскольку ранцевые установки – переносные, они имеют ограниченную массу (не более 30 кг), позволяющую оператору свободно перемещаться и осуществлять действия, направленные на прекращение пожара. Ограниченный запас расходных веществ (пожаротушащей жидкости и сжатого воздуха) обуславливает необходимость разработки новых способов распыления и доставки пожаротушащей жидкости в зону пожара, которые обеспечивают при меньшем объеме затраченной жидкости более высокую эффективность по сравнению с традиционными устройствами пожаротушения аналогичного назначения, уменьшение или устранение вторичного ущерба от пролива пожаротушащей жидкости.

Анализ последних исследований. В настоящее время ранцевые установки пожаротушения, осуществляющие генерацию газокapельных струй повышенной дальнoбойности с малым импульсом отдачи, реализовываются на основе профилированных газокapельных сопел. Такие установки отличаются простым конструктивным исполнением, отсутствием подвижных деталей, малой массой ствола (пистолета). В связи с этим промышленность России выпускает ряд пожаротушающих установок типа «Игла», РУПТ, ГИРС и других газодинамического принципа действия.

В патенте [1] описаны способ создания газокapельной струи, установка для его осуществления и сопло для создания газокapельной струи. Особенность предложенного способа распыления заключается в том, что высокоскоростной осевой газовый поток, направленный вдоль сопла, взаимодействует в камере смешения с перпендикулярно направленными струйками пожаротушающей жидкости, в результате чего струйки распадаются на капли и выносятся в профилированное, имеющее сужение, сопло Лавалья. За счет сверхзвуковой скорости газа в критическом сечении сопла происходит разгон капельной жидкости и ее выброс в окружающую среду. При этом капельная жидкость (дисперсная фаза) и газ (несущая фаза) движутся со скольжением (с разными скоростями). Недостаток известного способа создания газокapельной струи состоит в том, что векторы скорости газа и пожаротушающей жидкости перпендикулярны, из-за чего снижается скорость капель при входе в газокapельное сопло. Такой же недостаток имеют и устройства, описанные в патентах [2, 3], в которых первичное распыление происходит за счет взаимодействия высокоскоростного газового потока с перпендикулярными струйками огнетушащего вещества.

Известно также техническое решение [4], в котором распыление происходит за счет взаимодействия сверхзвукового газового потока, формируемого газодинамическим соплом с коаксиально подаваемым кольцевым потоком огнетушающей жидкости. Полученный первичный капельный поток дополнительно разгоняют в газокapельном сопле. Недостаток устройства – сложность конструкции узла коммутации одновременно двух коаксиальных потоков – газа и жидкости. Так как подача газа и жидкости в камеру смешения осуществляется коаксиальными (спутными) потоками, то для первичного каплеобразования необходимо увеличение скорости газового потока. Это требует применения дополнительного узла – газодинамического сопла, что усложняет устройство. Недостаток заключается в том, что общий подвижный клапан, открывающий и закрывающий газовый и жидкостный потоки, расположен вдоль оси газодинамического и газокapельного сопел, имеет большие габариты, это оказывает сопротивление движению капель.

Конструкция устройства, описанного в патенте [5], аналогична конструкции вышеописанного устройства. Отличие заключается в том, что

в подвижном клапане выполнен излучатель Гартмана. Недостаток устройства (кроме ранее описанных) состоит в том, что излучатель Гартмана не может быть выполнен по оптимальной схеме с острыми кромками, поскольку совмещен с клапаном, включающим и выключающим одновременно газовый и жидкостный потоки, что ухудшает каплеобразование в камере смешения.

Цель исследования – совершенствование конструкции ствола ранцевой установки пожаротушения с ультразвуковым распылением пожаротушающей жидкости.

Результаты исследования. Вышеприведенный анализ конструкции устройства, описанного в работе [5], показывает, что совмещение открывания и закрывания одновременно двух магистралей (воды и газа) одним подвижным клапаном приводит к усложнению конструкции устройства, а увеличенный диаметр клапана (для коммутации одновременно двух магистралей) и его осевое расположение создают дополнительное сопротивление газокапельному потоку. Для исключения этого недостатка может быть применена схема коммутации газовой и жидкостной магистралей двумя отдельными клапанами без ухудшения гидравлических параметров коммутируемых потоков. Такое простое конструктивное решение не только упрощает конструкцию ствола, но и позволяет наиболее оптимальным образом организовать газоструйный генератор акустических колебаний, например генератор Гартмана для ультразвукового дробления водяных струек (рис. 1).

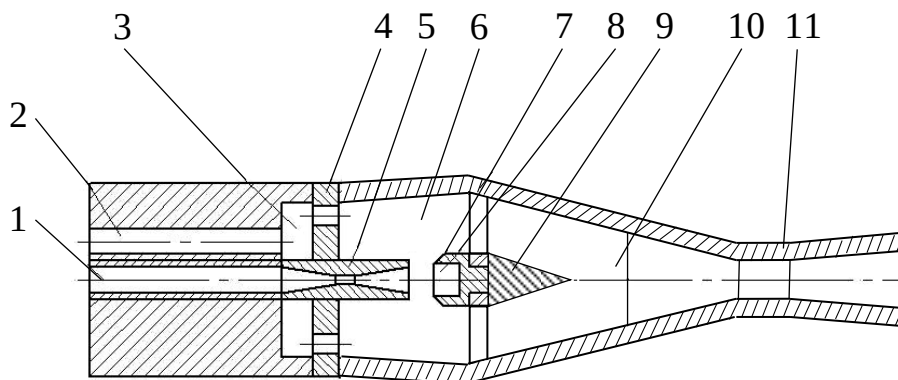


Рис. 1. Схема ствола ранцевой установки пожаротушения с ультразвуковым распылением воды:

- 1 – магистраль подвода газа; 2 – магистраль подвода воды; 3 – кольцевая камера; 4 – распылительный диск; 5 – газодинамическое сопло; 6 – камера ультразвукового распыления; 7 – кромки резонатора; 8 – резонатор; 9 – центральное тело; 10 – камера смешения; 11 – газокапельное сопло

Конструктивно ствол состоит из магистрали подвода газа, оканчивающейся газодинамическим соплом, магистрали подвода воды, соединенной с кольцевой камерой. Через кольцевую камеру и распылительный

диск с круглыми (рис. 2, а) или щелевыми (рис. 2, б) отверстиями пожаротушающая жидкость поступает в камеру ультразвукового распыления. Газодинамическое сопло и резонатор с кромками образуют газоструйный генератор ультразвуковых колебаний Гартмана. Центральное тело удобообтекаемой формы предназначено для выравнивания осевого провала в профиле скоростей газок капельного потока.

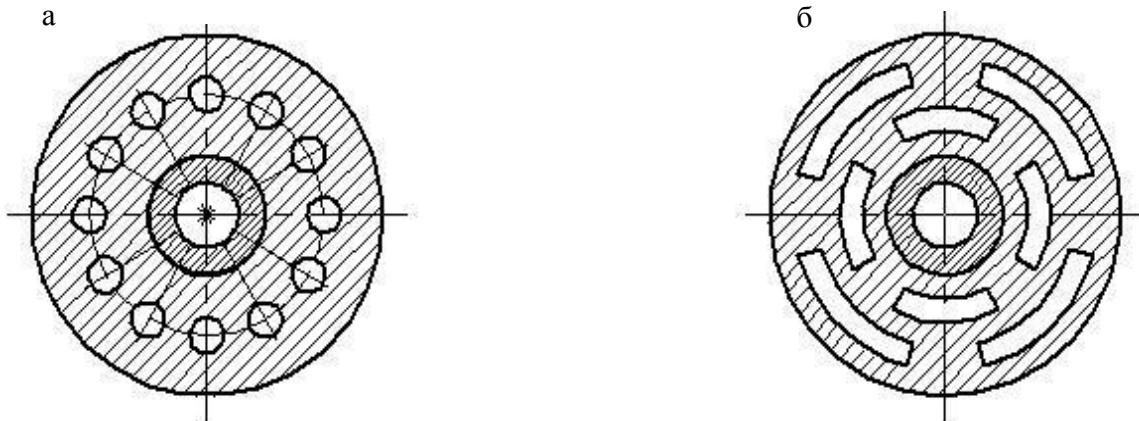


Рис. 2. Распылительный диск:

а – с круглыми отверстиями; б – со щелевыми отверстиями

Работает ствол следующим образом. Газ и воду подают одновременно в ствол по магистралям подвода газа и воды. Вода из магистрали через кольцевую камеру под действием перепада давления вытесняется через круглые или щелевые отверстия распылительного диска в виде тонкопленочных или цилиндрических струек в камеру ультразвукового распыления. Одновременно газ, проходя через газодинамическое сопло со сверхзвуковой скоростью, попадает в резонатор. В результате взаимодействия сверхзвуковой газовой струи с донным резонатора в зазоре между срезом газодинамического сопла и наружными концами кромок резонатора образуется неподвижный скачок уплотнения. Набегающая на него сверхзвуковая струя со стороны газодинамического сопла отражается и приблизительно равномерно распределяется в пространстве камеры ультразвукового распыления. Отраженные сверхзвуковые волны имеют ячеистую структуру – чередование уплотнений и разрежений. При взаимодействии тонкопленочных или цилиндрических струек воды с акустическими волнами ячеистой структуры происходит распад струек на капли, характеризующийся высокой однородностью и высокой дисперсностью. Из камеры ультразвукового распыления под действием перепада давления несущей фазы (отработанного газа) газок капельный поток поступает в камеру смешения, где происходит равномерное распределение по

объему и сжатие газокапельного потока при входе в газокапельное сопло. В профилированном, имеющем сужение, сопле Лаваля происходит разгон газовой и дисперсной фаз на всех участках канала, включая и концевой расширяющийся участок. Особенность двухфазного газокапельного течения в профилированном канале – движение фаз со скольжением, то есть скорость несущей газовой фазы и скорость дисперсной фазы не совпадают. Градиенты скоростей газа и капель (имея в виду длину сопла) – положительные, а градиенты статического давления газа, плотности газа и температуры газокапельной смеси – отрицательные. Таким образом на срезе газокапельного сопла формируется высокоскоростной газокапельный поток с несколько охлажденной дисперсной и газовой фазой (ввиду адиабатического расширения газа). Из-за короткого газокапельного сопла и высокой скорости прохождения дисперсной и газовой фаз реальная температура снижается на несколько градусов, что – положительный фактор, уменьшающий испарение капель при подлете к очагу пожара. Специфика работы ствола заключается во внутреннем распылении пожаротушающей жидкости, а не во внешнем (за счет аэродинамического взаимодействия с воздухом). Большая дальность заброса (достигающая 18 м и более) капельного потока со средним диаметром 80...100 микрон на срезе ствола объясняется не только высокой начальной скоростью капель (достигающей 80 м/с), но и продолжающимся (вне сопла) влиянием на дисперсную фазу несущей газовой струи, скорость которой примерно в полтора раза превышает скорость капель.

Предложенное техническое решение по сравнению с известным решением [5] обладает следующими существенными конструктивными отличительными признаками:

- наличием распылительного диска с щелевыми или круглыми отверстиями, обеспечивающего подачу жидкости в камеру ультразвукового распыления в виде тонкопленочных или цилиндрических струек, что улучшает условия каплеобразования;
- уменьшением гидравлического сопротивления за счет устранения клапана, находящегося на пути движения капельного потока, за счет чего повышается начальная скорость капель при входе в разгонное газокапельное сопло;
- резонатор снабжен наружными острыми кромками, что обеспечивает по сравнению с известным техническим решением более высокую интенсивность излучения акустических волн и большую устойчивость генерируемых колебаний к изменению давления. За счет этого повышается дисперсность капельного потока огнетушащей жидкости.

Генератор Гартмана начинает работать при давлении в сопле выше критического. Для воздуха

$$P_{1кр} = 1,88 P_o, \quad (1)$$

где $P_{1кр}$ – критическое давление начала работы, МПа;

P_o – атмосферное давление, МПа.

При осцилляционной пульсации давления существует и верхнее критическое давление $P_{2кр}$, которое для воздуха равно

$$P_{2кр} = 0,48 \text{ МПа}, \quad (2)$$

нарушающее ячеистый характер пульсирующей струи. Оно связано с образованием в центральной части струи плоского скачка уплотнения – диска Маха.

Длина волны пространственной осцилляции струи определяется эмпирической формулой Гартмана

$$\lambda = 1,12 D_c \sqrt{\Delta P - 0,93},$$

где ΔP – перепад давления на сопле, кг/см²;

D_c – диаметр сопла, мм;

λ – длина волны, мм;

или теоретической формулой Пека

$$\lambda = 1,22 D_c \sqrt{M^2 - 1},$$

где M – число Маха.

Обе формулы хорошо коррелируют в интервалах давлений 0,2...0,4 МПа или чисел Маха 1,36...1,70.

Частота излучения звука зависит от расстояния между соплом и резонатором и размера резонатора. Наиболее благоприятные условия (полученные Гартманом) для генерации ультразвуковых колебаний возникают при

$$D_c = l = d, \quad (3)$$

где l – глубина резонатора, мм;

d – диаметр резонатора, мм.

Ориентировочный расчет параметров генератора дан Гартманом на основе эмпирических формул при условии выполнения соотношений (1), (2), (3).

Диаметр сопла D_c , см, определяют исходя из выбранной частоты излучения по следующей эмпирической формуле:

$$D_c = 5860/f_m, \quad (4)$$

где f_m – частота ультразвуковых колебаний, Гц.

Пределы регулирования частоты вычисляют по формуле

$$\frac{\lambda_m - \lambda_o}{\lambda_o} 100 = 5,4(P - 0,9)^2, \quad (5)$$

где λ_m – максимальное значение длины волны, мм;

λ_o – минимальное значение длины волны, мм;

P – рабочее давление, кг/см².

Интервал неустойчивости $b_1 - a_1$ определяют из следующего выражения:

$$\frac{b_1 - a_1}{D_c} = 0,43\sqrt{P - 1,86}, \quad (6)$$

где b_1 – конец интервала неустойчивости, мм;

a_1 – начало интервала неустойчивости, мм.

Интервал неустойчивости представляет собой участок между соплом и резонатором, на котором статическое давление газа возрастает. Из теории колебательных процессов любой природы известно, что генерация колебаний возможна только при наличии участка с отрицательным сопротивлением. Применительно к газоструйному генератору Гартмана таким участком с отрицательным сопротивлением является участок с возрастающим давлением (с отрицательным аэродинамическим сопротивлением). Для получения устойчивых колебаний торцевые кромки резонатора должны находиться на участке области неустойчивости. Гартман рекомендует располагать кромки резонатора во второй трети интервала $b_1 - a_1$, то есть расстояние l между соплом и кромками резонатора вычисляют по формулам

$$l = a_1 + 0,6(b_1 - a_1) \quad (7)$$

или

$$l = \lambda - 0,4(b_1 - a_1). \quad (8)$$

Акустическую мощность излучаемых колебаний находят по формуле

$$W_a = 295D_c^2 \sqrt{P - 0,9}, \quad (9)$$

где W_a – акустическая мощность, Вт.

Расход воздуха при заданном давлении P вычисляют по выражению

$$Q = 0,852 D_c^2 \sqrt{P + 1,03}, \quad (10)$$

где Q – расход воздуха, м³/мин.

Расстояние a_1 вычисляют по формуле

$$a_1 = D_c [1 + 0,043 (P/P_0 - 1,89)^2]. \quad (11)$$

Полученные Гартманом эмпирические формулы (1), (2), (4) – (11) справедливы только для соотношения (3) между конструктивными параметрами и для конического сопла. Буше показал, что мощность излучения колебаний увеличивается в два раза по сравнению с классическим гартмановским прототипом при соотношении $d/D_c \approx 1,33$ [6]. Известно также и то, что при применении сопла Лавала рабочее давление может быть увеличено более верхнего критического давления $P_{2кр}$, что позволяет генерировать большую выходную мощность ультразвуковых колебаний и увеличить начальную скорость капельного потока. В работе [7] отмечено, что частота колебаний и их мощность зависят от акустической нагрузки. Под акустической нагрузкой понимают предметы, расположенные в зоне излучения генератора Гартмана, к которым относятся щелевые или цилиндрические струйки воды. Очевидно, что эмпирические формулы Гартмана не учитывают особенностей применения генератора для распыления воды (формы струек, количества, расстояния между ними и так далее).

Из вышеперечисленного следует, что применение эмпирических формул Гартмана для расчета ультразвукового генератора тонкораспыленной воды может быть принято только в первом приближении на этапе исследования пожаротушающего устройства, например как центр эксперимента при исследованиях на основе методов планирования математического эксперимента.

Выводы. Предложено новое техническое решение пожаротушающего устройства с ультразвуковым газоструйным распылением воды, отличительные признаки которого: распылительный диск со щелевыми или круглыми отверстиями, обеспечивающими подачу жидкости в камеру ультразвукового распыления в виде струек, движущихся соосно газокapельному соплу; исключение из конструкции подвижного клапана, находящегося на оси газокapельного сопла; снабжение резонатора острыми кромками. Указанная совокупность конструктивных отличий позволит повысить однородность, дисперсность и дальность подачи газокapельной струи, а следовательно, и эффективность тушения пожара.

Список литературы / References

1. Пат. 2107554 Российская Федерация, МПК B05B7/00, A01G25/00, A62C31/02. Способ создания газокapельной струи, установка для его

осуществления и сопло для создания газокапельной струи / Ю.В. Зуев, А.В. Карпышев, И.А. Лепешинский. – № 96113451/25; заявл. 08.07.1996; опубл. 27.03.1998, Бюл. № 9.

Zuyev, Yu.V., Karpyshev, A.V., Lepeshinskiy, I.A. *Sposob sozdaniya gazokapel'noy strui, ustanovka dlya yego osushchestvleniya i soplo dlya sozdaniya gazokapel'noy strui* [Method of creation of a gas-drop jet, an installation for its realization and a fire nozzle for producing the gas-drop jet]. Patent RF, no. 2107554, 1998.

2. Пат. 24639 Российская Федерация, МПК A62C13/00, B05B7/04. Устройство для пожаротушения / А.В. Карпышев. – № 2002111191/20; заявл. 30.04.02; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23.

Karpyshev, A.V. *Ustroystvo dlya pozharotusheniya* [Installation for fire extinguishing]. Patent RF, no. 24639, 2002.

3. Пат. 2316369 Российская Федерация, МПК A62C31/02, B05B7/04. Устройство пожаротушения / А.Л. Душкин, А.В. Карпышев. – № 2006122074/12; заявл. 22.06.06; опубл. 10.02.08, Бюл. № 4.

Dushkin, A.L., Karpyshev, A.V. *Ustroystvo pozharotusheniya* [Fire-extinguishing installation]. Patent RF, no. 2316369, 2008.

4. Пат. 2283152 Российская Федерация, МПК A62C31/00, B05B7/04. Устройство для распыления жидкости в газовой среде с образованием газокапельной струи с высокой кинетической энергией / Г.Б. Пахомов, А.В. Зинин. – № 2004130334/12; заявл. 15.10.04; опубл. 10.09.06, Бюл. № 25.

Pakhomov, G.B., Zinin, A.V. *Ustroystvo dlya raspyleniya zhidkosti v gazovoy srede s obrazovaniyem gazokapel'noy strui s vysokoy kineticheskoy energiyey* [Installation for spraying a liquid in the gaseous medium with formation of a gas-drop jet with the high kinetic energy]. Patent RF, no. 2283152, 2006.

5. Пат. 2317837 Российская Федерация, МПК A62C35/02, A62C31/00, B05B7/00. Устройство для распыления жидкости в газовой среде с образованием газокапельной струи с высокой кинетической энергией / Г.Б. Пахомов, А.В. Зинин, С.Д. Макаров. – № 2006122885/12; заявл. 27.06.06; опубл. 27.02.08, Бюл. № 6.

Pakhomov, G.B., Zinin, A.V., Makarov, S.D. *Ustroystvo dlya raspyleniya zhidkosti v gazovoy srede s obrazovaniyem gazokapel'noy strui s vysokoy kineticheskoy energiyey* [Installation for spraying a liquid in the gaseous medium with formation of a gas-drop jet with the high kinetic energy]. Patent RF, no. 2317837, 2008.

6. Ефремов, А.В. Исследование акустических характеристик генератора Гартмана / А.В. Ефремов // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы IV Междунар. науч. конф. – СПб. : Свое изд-во, 2018. – С. 50 – 56.

Yefremov, A.V. *Issledovaniye akusticheskikh kharakteristik generatora Gartmana* [Investigation of acoustic characteristics of the jet-edge generator (Hartmann oscillator)]. *Tekhnicheskkiye nauki: problemy i perspektivy: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf.* [Technical sciences: problems and prospects: materials

of the 4th International scientific conference]. Saint-Petersburg, Svoye izd-vo Publ., 2018, pp. 50 – 56.

7. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука / Л.Д. Розенберг. – М. : Рипол Классик, 2013. – 386 с.

Rozenberg, L.D. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka* [Physics and technology of power ultrasound]. Moscow, Ripol Klassik Publ., 2013, 386 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 13.06.2019

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

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

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

Anton Vitalyevich Yeryomin, design engineer of the 1st category; e-mail: a.v.eremin18@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) 332-78-36

ULTRASONIC FIRE-EXTINGUISHING DEVICE

Purpose. Development of the ultrasonic water spray device for extinguishing fires at the initial stage of a fire outbreak.

Methods. Information and analytical investigations of the construction arrangements of the water spray fire-extinguishing devices.

Results. The construction arrangement of the device for extinguishing the fires with the ultrasonic gas-jet water spray has been developed.

Scientific novelty. The fire-hose nozzle construction has been proposed. The fire-extinguishing liquid comes into its ultrasonic chamber from the atomizing circular plate in the form of the elementary slit or cylindrical jets coaxially to the longitudinal axis of the gas-drop nozzle.

Practical value. The developed fire-extinguishing device with the ultrasonic gas-jet water spraying enables obtaining the high-velocity gas-drop flow with the high indices of dispersion, uniformity of distribution and the jet range what allows improving the efficiency of extinguishing the fire due to reducing the water discharge, avoiding water spillage and reducing the material damage.

Keywords: fire-extinguishing device; ultrasonic spraying; jet-edge generator (Hartmann oscillation); gas-drop nozzle; fire-hose nozzle; resonator.

УДК 622.822.225:622.411.33

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

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

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*

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКЛОННОСТИ УГЛЕЙ К САМОВОЗГОРАНИЮ

Цель. Повышение точности расчета времени достижения углем критической температуры, характеризующей склонность к самовозгоранию.

Методика. Аналитические и экспериментальные исследования параметров, влияющих на теплообмен скопления угля с окружающей средой при его самонагревании.

Результаты. Исследованы параметры, характеризующие склонность углей к самовозгоранию, и предложены аналитические зависимости для их вычисления. Предложен комплексный критерий, отличающийся от ранее используемого учетом дросселирующего эффекта метана, испарения влаги и реакционной поверхности угля.

Научная новизна. Повышение точности установления склонности углей к самовозгоранию путем дополнительного учета ранее не известных параметров.

Практическая значимость. Уточнение расчетного значения комплексного показателя позволит разработать адекватные мероприятия для предупреждения возникновения пожароопасной ситуации.

Ключевые слова: *самонагревание угля; критическая температура; теплота окисления; метан; параметры.*

Постановка проблемы. Существующие методы определения склонности угля к самовозгоранию в основном базируются на установлении степени взаимодействия его с окислителями, выраженной через константу скорости окисления [1]. Однако при оценке склонности необходимо учитывать влажность угля, характер его пористости, остаточный метан и другие параметры, взаимосвязанные с химической активностью.

Каждый из перечисленных параметров в отдельности отражает тот или иной аспект протекания окислительных процессов в угле, но не характеризует развития процесса самонагревания в целом. Следовательно, ни один из этих параметров не может быть использован в качестве критерия склонности угля к самовозгоранию. В НИИГД «Респиратор» разработан единый показатель, который представляет собой время, необходимое для достижения углем критической температуры самовозгорания при определенных физико-химических и механических свойствах угля [1]. Этот показатель характеризует интенсивность самонагревания угля в адиабатических условиях и, таким образом,

отражает потенциальную способность угля к самовозгоранию, исключая при этом влияние горно-геологических и горно-технических факторов залегания и выемки угольных пластов. С увеличением значения комплексного показателя опасность самовозгорания угля уменьшается и, наоборот, при уменьшении – увеличивается. Это позволяет давать сравнительную оценку склонности угля к самовозгоранию в пределах каждого угольного бассейна или отдельного месторождения, где горно-геологические условия варьируются незначительно.

Физико-химические свойства угля, влияющие на процесс самонагревания, изучены с помощью хроматографического метода и детально рассмотрены авторами работ [1, 2] при исследовании эндогенной пожароопасности угольных шахт.

В дальнейшем была предложена математическая модель хемосорбции кислорода углем, позволившая отдельно изучать кинетику адсорбции и химической реакции окисления [3]. Получено приближенное аналитическое решение краевой задачи и проведено математическое моделирование процесса самонагревания углей различных марок, что послужило основанием для внесения изменений в методику определения склонности углей к самовозгоранию.

После внедрения этой методики в институте не прекращалось изучение процесса самонагревания угля, детально исследовали все случаи происшедших эндогенных пожаров на угольных шахтах Донбасса. Накопленные теоретические разработки и экспериментальные данные позволили обобщить полученные результаты.

Цель исследований. Повышение точности расчета времени достижения углем критической температуры, характеризующей склонность к самовозгоранию.

Материалы и результаты исследований. Проведены исследования реакционной активности различных углей и установлена зависимость доли поверхности, принимающей участие в окислении, ξ от концентрации летучих веществ V^{daf} в нем в виде

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (V^{daf})^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} V^{daf} + 3,76 \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

Исследованы коэффициенты диффузии в углях различной степени метаморфизма с использованием хроматографического метода по уравнению Ван-Деемтера. На основании данных [1] по более чем 50 экспериментам с такими углями установлена зависимость для коэффициента диффузии D , м²/с [4]:

$$D = \frac{-\ln[1,017V_{\phi} \pm 0,133(V_{\phi} - 0,018)^{0,5} + 1,36 \cdot 10^{-2}]}{13 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где V_{ϕ} – фильтрационный объем пор, $\text{м}^3/\text{т}$.

Теоретически исследовано и проверено экспериментально на 17 образцах различных марок углей влияние десорбции метана из твердого топлива на инкубационный период его самовозгорания. Получена зависимость времени окончания напорного выделения метана из частиц угля τ_n , с, в виде [5]

$$\tau_n = -\ln Q^* / \mu_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где Q^* – остаточная газоносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$;

$\mu_{\text{ср}}$ – средняя константа скорости выделения метана, с^{-1} .

Теоретическими исследованиями на основе математической модели выделения метана и экспериментами с помощью специально созданной лабораторной установки определен эффект охлаждения угля за время напорного выделения из него метана [6].

Найдены значения теплоты дросселирования метана $q_{\text{др}}$ образцов угля фракцией 2...5 мм с массовой долей летучих веществ V^{daf} от 16 до 36 %, равные 10...20 кДж/моль. Установлено снижение температуры угля за $\tau_n = 15...100$ ч – от 0,2 до 1,7 °С.

Изучено влияние испарения влаги из углей на изменение температуры в процессе самонагрева. Исследования выполнены в лабораторных условиях НИИГД и *Główny instytut Górnictwa GiG* (Польша) [1].

Предложен метод определения коэффициентов теплоотдачи в слое дисперсной среды при отсутствии конвективного переноса теплоты. Определены численные значения указанного коэффициента для очагового самонагрева в насыпи плотностью 230...270 $\text{кг}/\text{м}^3$ [7].

С учетом результатов исследований, изложенных выше, предложен усовершенствованный по сравнению с существующим метод расчета комплексного показателя склонности угля к самовозгоранию [8].

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать методику расчета комплексного показателя с учетом перечисленных выше факторов для установления склонности углей к самовозгоранию. Порядок выполнения измерений для определения комплексного показателя склонности угля к самовозгоранию следующий.

Для каждой испытуемой пробы угля устанавливают значение дробимости, которое характеризует способность топлива к измельчению и равно отношению внешней поверхности частиц, образовавшихся после измельчения, к поверхности исходных частиц.

Исследуют химическую активность пробы угля с помощью газохроматографического метода по изменению объемной доли кислорода, который не прореагировал с углем. В результате этих исследований определяют критическую температуру самовозгорания угля $T_{\text{кр}}$, К, и кинетические параметры реакции окисления: константу скорости при критической

температуре самовозгорания $k_{кр}$, $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; пред-экспоненциальный множитель k_0 , $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; энергию активации E , Дж/моль. Рассчитывают теплоту реакции окисления q , Дж/моль, используя $k_{кр}$, с^{-1} , и удельное количество теплоты, обусловленное этой реакцией, $Q_{ок}$, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$), из следующих выражений:

$$q = 6980k^{-0,82}; \quad (4)$$

$$Q_{ок} = \xi C_{O_2} q k_{кр}, \quad (5)$$

где ξ – доля реакционной поверхности угля, которую рассчитывают по формуле (1);

C_{O_2} – концентрация кислорода в межкусковом пространстве угля, $\text{моль}/\text{м}^3$, равная

$$C_{O_2} = C_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{25,08}{0,83 + Q_0 \rho \cdot 10^{-3}} \right) \right]; \quad (6)$$

где C_0 – начальная концентрация кислорода, $\text{моль}/\text{м}^3$;

Q_0 – газоносность пласта, $\text{м}^3/\text{т}$;

ρ – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Исследуют процесс выделения метана из пробы угля и определяют теплоту дросселирования газа $q_{др}$, Дж/моль, среднюю константу скорости напорного выделения $\mu_{ср}$, с^{-1} , и время окончания этого процесса τ_n , с, а также интенсивность выделения метана из угля J_m , $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Экспериментальные исследования позволили установить аналитические зависимости для определения $q_{др}$ и $\mu_{ср}$ от дробимости угля Dp в виде

$$q_{др} = 630(Dp - 1)^{1,3}; \quad (7)$$

$$\mu_{ср} = 2 \cdot 10^{-8}(Dp - 1)^2 + 4 \cdot 10^{-7}. \quad (8)$$

По выражению (3) определяют время окончания напорного выделения метана τ_n , которое используют для расчета J_m по формуле

$$J_m = G/\tau_n, \quad (9)$$

где G – газоносность пласта, $\text{моль}/\text{м}^3$.

Рассчитывают удельное количество теплоты, обусловленное дросселированием метана из угля, Q_m , Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$), по формуле

$$Q_m = \delta q_{др} J_m, \quad (10)$$

где δ – доля выделяющегося метана.

Определяют массовую долю влаги в аналитической пробе угля W^a , %, и рассчитывают удельное количество теплоты, обусловленное испарением влаги, Q_B , Дж/(м³·с), по формуле

$$Q_B = q_B k_B W^a \rho / 0,018, \quad (11)$$

где q_B – теплота испарения влаги, Дж/моль;

k_B – константа скорости испарения влаги, м³/(моль·с).

Рассчитывают параметр A , с⁻¹, характеризующий свойства угля, по формуле

$$A = \frac{Q_{OK} - Q_M - Q_B}{\rho c_V T_0}, \quad (12)$$

где c_V – удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К);

T_0 – начальная температура, К.

Рассчитывают комплексный критерий генерации теплоты Γ_T и безразмерный критерий теплоотдачи скопления угля в окружающую среду Bi по формулам

$$\Gamma_T = A \frac{r^2}{a}; \quad (13)$$

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}, \quad (14)$$

где r – толщина скопления угля, м;

a – коэффициент температуропроводности угля, м²/с;

α – коэффициент теплоотдачи угля, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К).

Критерий скорости нагревания угля Γ_v , учитывающий физико-химические свойства угля и тепловые параметры, рассчитывают из следующего выражения:

$$\Gamma_v = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1. \quad (15)$$

Параметр $\bar{\tau}$, учитывающий тепловыделение и теплоотвод в угольном скоплении, определяют по формуле

$$\bar{\tau} = - \frac{\ln[1 - \Gamma_v \frac{T_{кр}}{T_0} + \Gamma_v]}{\Gamma_v}. \quad (16)$$

Для каждой пробы угля рассчитывают комплексный показатель склонности его к самовозгоранию τ_k , с, по формуле

$$\tau_k = \bar{\tau} / A. \quad (17)$$

Расчетное значение комплексного показателя τ_k сравнивают с пороговым τ_n , определяемым для условий каждого угольного месторождения, и устанавливают склонность исследуемого пласта угля к самовозгоранию. При этом учитывают объективные условия для оставления в выработанных пространствах при разработке угольных пластов пожароопасных потерь угля и эндогенных пожаров на данном пласте в пределах исследуемого участка или на соседних участках с аналогичными горно-геологическими условиями.

Выводы. Исследованы новые параметры, влияющие на определение склонности углей к самовозгоранию, и предложен метод расчета комплексного показателя.

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 : сб. науч. тр. / 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: sb. nauch. tr.* [Actual problems of control of the spontaneous combustion of coal: collected scientific papers]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

3. Греков, С.П. Математическое моделирование процесса саморазогрева углей при выборе антипирогенов / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, Б.И. Кошовский // ХТТ. – 1997. – № 1. – С. 71 – 78.

Grekov, S.P., Kalyusskiy, A.Ye., Koshovskiy, B.I. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessa samorazogreva ugley pri vybore antipirogenov* [Mathematical modeling of a process of coal spontaneous heating during choosing the antipyrogens]. *KhTT – Chemistry of solid fuel*, 1997, no. 1, pp. 71 – 78.

4. Пашковский, П.С. Расчет коэффициентов диффузии в угле с использованием хроматографического метода / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Т.Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 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.

5. Пашковский, П.С. Влияние интенсивности выделения метана из отбитого угля на склонность к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков // 10-я сессия Международного бюро по горной теплофизике : докл. – Гливице, Польша, 2005. – С. 73 – 86.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. *Vliyaniye intensivnosti vydeleniya metana iz otbitogo uglya na sklonnost' k samovozgoraniyu* [Influence of the methane release intensity from the broken-down coal on liability to spontaneous combustion]. *10-ya sessiya Mezhdunarodnogo byuro po gornoy teplofizike: dokl.* [The 10th session of the International bureau on mining thermal physics: paper]. Gliwice, Poland, 2005, pp. 73 – 86.

6. Греков, С.П. Экспериментальное определение теплоты дросселирования метана из угля / С.П. Греков, П.С. Пашковский, А.А. Всякий // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – Кемерово, 2018. – С. 111.1 – 111.8.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Vsyakiy, A.A. *Eksperimental'noye opredeleniye teploty drosselirovaniya metana iz uglya* [Experimental determination of methane throttling heat from coal]. *Prirodnyye i intellektual'nyye resursy Sibiri: materialy XVII Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Natural and intellectual resources of Siberia: materials of the 17th International scientific and practical conference]. Kemerovo, 2018, pp. 111.1 – 111.8.

7. Греков, С.П. Расчет коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого вещества / С.П. Греков, И.Г. Старикова, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 2(54). – С. 59 – 68.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Glushenko, K.V. *Raschyet koefitsiyentov teplootdachi v sloye zernistogo veshchestva* [Calculation of heat-transfer coefficients in the layer of a granular substance]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 2(54), pp. 59 – 68.

8. Универсальный комплексный показатель эндогенной пожароопасности органических веществ / С.П. Греков, П.С. Пашковский, А.А. Всякий, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4 (53). – С. 24 – 36.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Vsyakiy, A.A., Orlikova, V.P. *Universal'nyy kompleksnyy pokazatel' endogennoy pozharoопасnosti organicheskikh veshchestv* [The universal complex index of the spontaneous fire hazard of organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 4(53), pp. 24 – 36.

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

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

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

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF COAL LIABILITY TO SPONTANEOUS COMBUSTION

Purpose. Increase of the accuracy of time calculation of coal reaching the critical temperature characterizing the liability to spontaneous combustion.

Methodology. Analytical and experimental investigations of the parameters influencing the heat exchange of a coal accumulation with the environment during its spontaneous heating.

Results. The parameters characterizing the coal liability to spontaneous combustion have been investigated, and the analytical dependences for their calculation have been proposed. The complex criterion has been suggested that differs from the previously used one by the allowance for the methane throttling effect, the moisture evaporation and the coal response surface.

Scientific novelty. The increase of the determination accuracy of the coal liability to spontaneous combustion by means of the additional allowance for the previously unknown parameters.

Practical value. The refinement of the calculated value of the complex index will permit to develop the adequate measures for prevention of a fire hazard situation from occurrence.

Keywords: *coal spontaneous heating; critical temperature; oxidation heat; methane; parameters.*

УДК [622.867:622.414.32]: 519.17

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

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

Владимир Владимирович Захлебн, инж. I кат.; e-mail: avarvent@mail.ru;

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГРАФОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДЕПРЕССИОННЫХ СЪЕМОК В ШАХТАХ

Цель. Анализ и оценка использования метода математического аппарата теории графов с целью снижения трудоемкости работ и времени на проведение депрессионной съемки в шахте подразделениями горноспасательной службы.

Методы. Исследование возможности, анализ достоинств, недостатков и перспектив использования метода графов при проведении депрессионных съемок в шахтах, обработка специальных литературных источников.

Результаты. Представлен анализ результатов теоретических исследований по совершенствованию методов проведения и обработки результатов депрессионных съемок в шахтах. Дана оценка актуальности повышения качества депрессионных съемок для совершенствования вентиляции шахт, сокращения трудоемкости работ за счет упрощения методов проведения депрессионных съемок путем использования математических методов и компьютерного моделирования. Предложен алгоритм выбора оптимального множества горных выработок для измерения давления и расходов воздуха, позволяющий минимизировать затраты труда и времени на съемку.

Научная новизна. Предложен способ выбора маршрутов при проведении депрессионной съемки с применением теории графов, который позволяет сократить количество измерений параметров выработок примерно в одной их трети.

Практическая значимость. Предложенные расчетные методы могут быть использованы службами депрессионных, газовых и тепловых съемок подразделений Государственной военизированной горноспасательной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики при определении аэродинамических сопротивлений ветвей, где точное измерение депрессии выполнить сложно.

Ключевые слова: шахта; служба депрессионных, газовых и тепловых съемок; депрессионная съемка; депрессия; скорость и расход воздуха; методы проведения, измерения и оценки; аэродинамическое сопротивление горных выработок и вентиляционных сооружений; компьютерная модель вентиляционной сети шахты; нормальный и аварийный режимы проветривания шахты; теория графов.

Постановка проблемы. Депрессионные съемки нашли широкое применение на шахтах различных стран. Значительный вклад в развитие

шахтной аэрологии, разработку способов и средств проведения депрессионных съемок внесли известные отечественные ученые: И.Е. Болбат, Г.Л. Верещагин, А.Ф. Воропаев, Н.И. Головкин, Б.А. Клепиков, А.И. Ксенофонтова, В.И. Лебедев, С.Н. Осипов, Г.И. Сталоверов и другие [1].

Анализ последних исследований. Среди опубликованных за последний период работ по проведению, совершенствованию и обработке результатов депрессионных съемок следует выделить научные труды Г.Л. Верещагина, А.Н. Дмитриенко, В.Н. Егорова, Б.П. Казакова, С.В. Спирина, А.В. Шалимова и других [2 – 4]. Данными исследователями предложены сложные многофакторные расчетные методики, которые учитывают давление, плотность воздуха, температуру и газовую постоянную и резко усложняют проведение депрессионных съемок.

Современные вентиляционные сети угольных шахт Донбасса представляют собой сложные диагональные соединения горных выработок, имеют несколько вентиляторов главного и местного проветривания, большое количество различных вентиляционных сооружений, очистных и подготовительных забоев, в которых сложно организовать стабильное проветривание основных объектов.

Актуальная научно-техническая задача – повышение качества депрессионных съемок для совершенствования вентиляции шахт, сокращение трудоемкости работ за счет упрощения методов проведения депрессионных съемок путем использования расчетных методов, математического и компьютерного моделирования.

Цель настоящей статьи – проведение аналитических и теоретических исследований по обоснованию современных методов проведения и обработки результатов депрессионных съемок в шахтах, создание методологии контроля и управления вентиляцией горных предприятий, которая позволит существенно повысить качество депрессионных съемок и проветривания угольных шахт, а также снизить трудоемкость работ и время на проведение депрессионной съемки за счет применения метода математического аппарата теории графов.

Материалы и результаты исследований. Организация проветривания современных шахт – многофакторная задача, трудоемкость решения которой обусловлена сложностью вентиляционной сети горных выработок. Количество и протяженность горных выработок постоянно меняются по мере эксплуатации шахты, разрабатывают новые выемочные участки, появляются новые и дополнительные выработки, изменяются параметры выработанных пространств, возводят вентиляционные сооружения. В результате меняется аэродинамическое сопротивление шахты в целом и частично – по горизонтам, панелям и отдельным выработкам. Знание этих изменений дает возможность корректировать режимы работы источников тяги и вентиляционных устройств,

обеспечивая подачу нормативного количества свежего воздуха на каждый из участков шахты. Аэродинамические сопротивления горных выработок определяют их тип и размер, однако на практике значительно влияют на потери давления местные сопротивления, теоретическое определение которых, как правило, не представляется возможным. К их числу относятся прежде всего уменьшение или увеличение сечения выработок, вызванные наличием зон обрушения породы, горного оборудования и вентиляционных сооружений, а также, в меньшей степени, изгибами и сопряжениями выработок. Поэтому регулярные плановые депрессионные съемки – актуальные мероприятия для получения достоверной информации о текущем аэродинамическом состоянии вентиляционной сети шахты.

Снижение трудоемкости работ и времени на проведение депрессионной съемки может быть достигнуто за счет применения метода математического аппарата теории графов (построения дерева графа, не имеющего замкнутых контуров). Исследованиям теории графов посвящены научные труды К. Бержа, О. Оре, У. Татта, Ф. Харари и других [5 – 8]. Данный метод позволяет сократить измерения депрессии и расхода воздуха примерно в одной трети ветвей шахтной вентиляционной сети и характеризуется следующим образом. Вентиляционная сеть шахты представляет собой связный ориентированный граф. Для повышения точности измерений замерные станции располагают в выработках, наиболее приемлемых для измерений поперечных сечений, скорости движения воздуха и депрессии (в основных выработках, подающих воздух на выемочные участки и в очистные забои, и в исходящих струях из них), где более точно можно определить депрессию и расход воздуха.

Выбор главного дерева ациклического графа производится таким образом, чтобы не образовывалось замкнутых контуров, а именно через действующий очистной забой по выработкам, расходы воздуха в которых можно измерить с большой точностью. Для получения необходимых параметров в данной системе выработок достаточно измерить депрессии в ветвях дерева сети (рис. 1).

В выработках-связях, замыкающих контуры, депрессию рассчитывают по уравнению равенства депрессии в контурах и расходов воздуха в узлах. При необходимости измеряют скорость движения воздуха в отдельных ветвях. Данный метод обеспечивает полный охват выработок вентиляционной системы при минимальном количестве измерений.

Пример: потеря депрессии в ветви 7 – 8, без измерения, определяют из уравнения: $h_{7-8} = h_{2-3} + h_{3-5} + h_{5-8} - h_{2-7}$; в ветви 4 – 6: $h_{4-6} = h_{3-5} + h_{5-6} - h_{3-4}$.

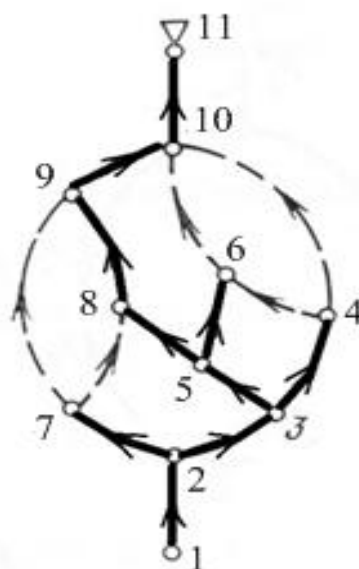


Рис. 1. Ациклическое связное направленное дерево графа части вентиляционной сети: 1 – 2, 2 – 3, 2 – 7, 3 – 4, 3 – 5, 5 – 6, 5 – 8, 8 – 9, 9 – 10, 10 – 11 – ветви дерева; 7 – 8, 7 – 9, 4 – 6, 4 – 10, 6 – 10 – ветви связи

На примере шахты имени Максима Горького, фрагмент вентиляционной сети которой представлен на рис. 2, выполнен расчет депрессии и расхода воздуха (см. таблицу, в которой приведены параметры части выработок вентиляционной сети).

Распределение воздуха и депрессии в сети горных выработок шахты имени Максима Горького

Номер ветви	Номер узла		Расход воздуха		Сопротивление, даПа			Депрессия ветви, даПа
	началь-ного	конеч-ного	м ³ /с	м ³ /мин	ветви	вентиля-ционного сооруже-ния	общее	
105	146	152	6,63	398,1	0,01156	–	0,01156	0,509
106	150	152	6,57	394,5	0,00708	0,00021	0,00729	0,315
107	225	152	3,60	216,1	0,00680	2,01580	2,02260	26,243
108	152	151	16,81	1008,7	0,01059	–	0,01059	2,993
110	224	151	1,08	64,9	0,01602	25,00000	25,01602	29,264
111	224	225	2,51	150,4	0,00453	–	0,00453	0,028
113	228	150	5,29	317,6	0,41012	–	0,41012	11,495
200	13	200	8,43	505,8	0,00193	–	0,00193	0,137

Окончание

Номер ветви	Номер узла		Расход воздуха		Сопротивление, даПа			Депрессия ветви, даПа
	начального	конечного	м ³ /с	м ³ /мин	ветви	вентиляционного сооружения	общее	
201	200	201	7,61	456,3	0,00236	–	0,00236	0,136
202	14	208	1,55	92,9	0,08877	–	0,08877	0,213
220	208	209	1,32	79,2	0,50413	–	0,50413	0,877
221	209	219	0,36	21,5	341,30000	–	341,30000	43,914
222	211	219	0,60	36,2	0,04000	–	0,04000	0,015
223	210	211	0,60	36,0	0,04000	120,00000	120,04000	43,308
224	211	227	5,19	311,3	0,00108	–	0,00108	0,029
225	227	226	5,31	318,4	0,00051	–	0,00051	0,014
226	226	225	5,43	325,6	0,00049	–	0,00049	0,014
227	226	223	-0,12	-7,2	5,00000	–	5,00000	-0,071
228	223	224	3,59	215,3	0,00444	–	0,00444	0,057
229	222	223	3,71	222,5	0,00312	–	0,00312	0,043
230	212	211	5,19	311,4	0,00595	–	0,00595	0,160
231	227	222	-0,12	-7,2	7,00000	–	7,00000	-0,100
232	225	228	4,33	259,9	0,76929	0,00001	0,76930	14,434
233	219	228	0,96	57,8	15,62500	–	15,62500	14,476
234	206	204	2,91	174,4	0,00694	–	0,00694	0,059
235	205	204	3,77	226,4	0,00976	–	0,00976	0,139
236	205	206	2,89	173,3	0,00960	–	0,00960	0,080
237	204	203	2,38	143,0	0,00250	0,12250	0,12500	0,710
238	201	205	6,66	399,7	0,00615	–	0,00615	0,273
239	206	207	-0,02	-1,1	250,00000	1000,00000	1250,00000	-0,414
240	201	217	0,94	56,6	0,10937	–	0,10937	0,097
241	207	216	0,21	12,6	250,00000	–	250,00000	11,068

Пример 1. Расчет депрессии ветви h_{226} , даПа:

$$h_{226} = h_{228} + h_{111} - h_{227};$$

$$h_{226} = 0,057 + 0,028 - 0,071 = 0,014 \text{ даПа},$$

что подтверждают измерения.

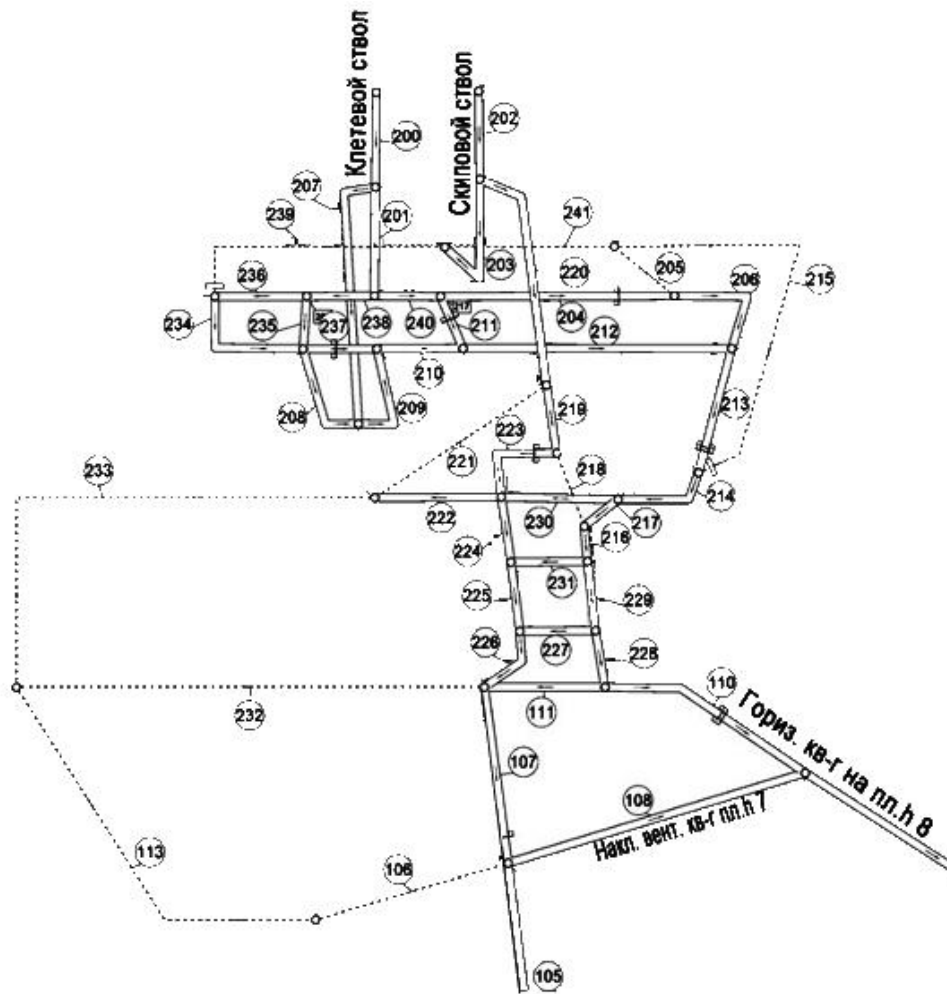


Рис. 2. Фрагмент схемы проветривания шахты имени Максима Горького

Пример 2. Расчет депрессии ветви h_{107} , даПа:

$$h_{107} = h_{110} - h_{108} - h_{111};$$

$$h_{107} = 29,264 - 2,993 - 0,028 = 26,243 \text{ даПа},$$

что подтверждают измерения.

Определяют количество воздуха по формуле

$$h_b = R_b Q_b^2,$$

где h_b – депрессия выработки, даПа;

R_b – аэродинамическое сопротивление выработки, даПа·с²/м⁶;

Q_b – расход воздуха в выработке, м³/с.

Соответственно расход воздуха в выработке находим по формуле

$$Q_B = \sqrt{\frac{h_B}{R_B}}.$$

Пример 3. Для фактического определения внутренней утечки воздуха Q , м³/с, в шахте (ветвь 232), руководствуясь правилом сложения векторов, необходимо выполнить практические измерения количества воздуха в выработках 226, 111, 107:

$$Q_{232} = Q_{226} + Q_{111} - Q_{107};$$
$$Q_{232} = 5,43 + 2,51 - 3,60 = 4,34 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Пример 4. Для фактического определения внутренней утечки воздуха Q , м³/с, в шахте (ветвь 106) необходимо выполнить измерения количества воздуха в выработках 105, 107, 108:

$$Q_{106} = Q_{108} - Q_{107} - Q_{105};$$
$$Q_{106} = 16,81 - 3,60 - 6,63 = 6,58 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким образом, метод графов при проведении депрессионной съемки шахты нагляден и рекомендован для весьма простых участков вентиляционных сетей.

Выводы. Методы и способы проведения депрессионных съемок в шахтах необходимо постоянно совершенствовать, сокращая их трудоемкость, обеспечивая высокую точность, разрабатывая и постоянно поддерживая компьютерную модель вентиляционной сети в рабочем состоянии для решения задач распределения воздуха при нормальной работе шахты и особенно в аварийных ситуациях.

Сокращение времени на производство депрессионной съемки достигается за счет применения метода математического аппарата теории графов (построения дерева графа, не имеющего замкнутых контуров). Это позволяет снизить трудоемкость проведения депрессионной съемки шахты до 30 % ветвей шахтной вентиляционной сети.

Для определения количества воздуха и депрессии в ветвях дерева графов необходимы непосредственные измерения.

В ветвях-связях депрессию выработки следует определять по контурным уравнениям. В качестве связей, как правило, необходимо в первую очередь рассматривать выработки, в которых измерить депрессию сложно (короткие сбойки, утечки воздуха через изолированные выработки и пр.).

Точность метода графов во многом зависит от правильности выбора дерева графа.

В отдельных случаях для сложных сетей непосредственное измерение депрессии в ветвях-связях может быть более точным и простым, а эффект от применения снизится до 10...15 %.

Список литературы / References

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

Karnaikh, N.V., Zakhlebin, V.V., Agarkov, A.V. *Sovershenstvovaniye normativnogo i organizatsionno-metodicheskogo obespecheniya dlya provedeniya vozdushno-depressionnykh i gazovykh s'yemok v ugol'nykh shakhtakh* [Improvement of regulatory and organizational and methodological support for carrying out air-depression and gas surveys in coal mines]. *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity* [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2018, no. 4(16), pp. 136 – 144.

2. Воздушно-депресссионные съемки на новой технической основе / Г. Л. Верещагин, С. В. Спирин, В. Н. Егоров [и др.] // Уголь. – 2007. – № 12. – С. 21 – 22.

Vereshchagin, G.L., Spirin, S.V., Yegorov, V.N. et al. *Vozdushno-depressionnyye s'yemki na novoy tekhnicheskoy osnove* [Air-depression surveys on a new technical basis]. *Ugol' – Coal*, 2007, no. 12, pp. 21 – 22.

3. Верещагин, Г. Л. Современные средства аэрогазового контроля рудничной атмосферы угольных шахт / Г.Л. Верещагин, В.Н. Егоров, А.Н. Дмитриенко // Безопасность труда в пром-сти. – 2010. – № 1. – С. 17–19.

Vereshchagin, G.L., Yegorov, V.N., Dmitriyenko, A.N. *Sovremennyye sredstva aerogazovogo kontrolya rudnichnoy atmosfery ugol'nykh shakht* [Modern means of aerogas monitoring of underground air of coal mines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in the industry*, 2010, no. 1, pp. 17 – 19.

4. Казаков, Б.П. Интерактивный метод планирования проведения и обработки результатов воздушно-депресссионной съемки рудника / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – Тула, 2018. – № 3. – С. 248 – 256.

Kazakov, B.P., Shalimov, A.V. *Interaktivnyy metod planirovaniya provedeniya i obrabotki rezul'tatov vozdushno-depressionnoy s'yemki rudnika* [Interactive method of planning of carrying out and processing the results of the air-depression survey of a mine]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle – Izvestiya of the Tula State University. Earth sciences*, Tula, 2018, no. 3, pp. 248 – 256.

5. Берж, К. Теория графов и ее применение [Электронный ресурс]. – Москва. URL: <https://docplayer.ru/28062801-K-berzh-teoriya-grafov-i-ee-primeneniya-kniga-k-berzha-pervaya-po-teorii-grafov-na-russkom-yazyke-mezhdu-tem-v-poslednie-gody-interes-k-teorii-rezko.html> (дата обращения: 08.07.2019).

Berzh, K. *Teoriya grafov i yeye primeneniye [Elektronnyy resurs]* [Graph theory and its application] (Electronic resource). Available at: <https://docplayer.ru/28062801-K-berzh-teoriya-grafov-i-ee-primeneniya-kniga-k-berzha-pervaya-po-teorii-grafov-na-russkom-yazyke-mezhdu-tem-v-poslednie-gody-interes-k-teorii-rezko.html> (accessed: 08.07.2019).

6. Оре, О. Графы и их применение / О. Оре. – М. : МЦНМО, 2002. – 171 с.

Ore, O. *Grafy i ikh primeneniye* [Graphs and their application]. Moscow, MTsNMO Publ., 2002, 171 p.

7. Теория графов [Электронный ресурс]. – Москва. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%BE%D0%B2> (дата обращения: 08.07.2019).

Teoriya grafov [Elektronnyy resurs]. [Graph theory] (Electronic resource). – Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%BE%D0%B2 (accessed: 08.07.2019).

8. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М. : Мир, 2003. – 300 с.

Kharari, F. *Teoriya grafov* [Graph theory]. Moscow, Mir Publ., 2003, 300 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым

Дата поступления рукописи 11.07.2019

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

Nikolay Viktorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: avrstla@mail.ru;

Vladimir Vladimirovich Zakhlebin, engineer of the 1st category; e-mail: avarvent@mail.ru;

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

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-34

APPLICATION OF THE GRAPH METHOD DURING CARRYING OUT DEPRESSION SURVEYS IN MINES

Purpose. Analysis and evaluation of the application of the method of the mathematical apparatus of the graph theory with the purpose of reduction of the labor intensity of operations and time for carrying out the depression survey in the mine by the subdivisions of the mine-rescue service.

Methods. Investigation of a possibility, analysis of advantages, disadvantages and prospects of the application of the graph method in carrying out the depression surveys in the mines, processing of the special literature sources.

Results. The analysis of the results of the theoretical investigations on perfecting the methods of carrying out and processing the results of the depression surveys in the mines has been presented. The evaluation of the actuality of the quality improvement of the depression surveys for the mine ventilation refinement, the reduction of the labor intensity of the operations due to simplification of the methods of carrying out the depression surveys by means of using the mathematical methods and computer simulation has been given. The algorithm of choosing the optimal set of the mine workings for measurement of pressure and air flows has been proposed which enables minimizing the labor and time inputs for the survey.

Scientific novelty. The method of choosing the routes during carrying out the depression survey with the application of the graph theory has been suggested which allows reducing the number of the measurements of the parameters of the mine workings approximately in one third of them.

Practical value. The proposed calculation methods may be used by the services of depression, gas and thermal surveys of the subdivisions of the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters during determination of the aerodynamic resistances of branches where the accurate measurement of depression is difficult to be done.

Keywords: *mine; service of depression, gas and thermal surveys; depression survey; depression; air rate and flow; methods of carrying out, measurement and evaluation; aerodynamic resistance of mine workings and ventilation constructions; computer model of a mine ventilation network; normal and emergency modes of mine ventilation; graph theory.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.8"363":544.723

Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru

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

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

Алексей Николаевич Янченко, нач. отд. департамента гражданской обороны и защиты населения МЧС ДНР; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики

283048, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-19

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Исследование статической емкости угольных сорбентов на базе активированных и природных мезопористых углей.

Методика. Анализ, обобщение и статистическая обработка результатов экспериментальных исследований природных мезопористых углей.

Результаты. Получены характеристики сорбционной емкости активированных и мезопористых углей по хлорбензолу и фенолу.

Научная новизна. Установлено влияние соотношения поверхности пор различного диаметра в природных мезопористых углях на их сорбционную емкость.

Практическая значимость. Полученные результаты расчета статической емкости угольных сорбентов позволяют оценить их эффективность в сравнении с активированными углями.

Ключевые слова: аварийно химически опасные вещества; сорбенты; мезопористые угли; сорбционная емкость углей; хлорбензол; фенол.

Постановка задачи. Заражение воздуха, почвы и воды водоемов токсичными химическими веществами в случае возникновения чрезвычайных ситуаций весьма интенсивно [1]. Несовершенство технологических процессов, аварийность хранилищ исходных, промежуточных и конечных высокотоксичных продуктов приводят к выбросам аварийно химически опасных веществ (АХОВ) в атмосферу, воздух производственных помещений и к проливам на землю [2]. В связи с вышесказанным заражение токсичными веществами, приводящими к тяжелым последствиям, требует применения комплекса мер по обеззараживанию воздуха, почвы и воды водоемов, что является задачей весьма актуальной и своевременной при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Анализ последних исследований. Одно из самых эффективных средств, применяемых для экологической безопасности при нейтрализации химического заражения почвы и воды водоемов, – сорбенты [3]. Особый интерес как сырье

для переработки в сорбционные материалы различного назначения представляют каменные угли. По имеющимся литературным источникам [4], установлено, что наилучшие сорбенты для поглощения органических примесей из водных растворов – активные угли с развитой мезопористой поверхностью, причем очень важную роль играет размер пор. М.М. Дубинин и Л.В. Радушкевич [5] предложили теорию объемного заполнения пор, где важный параметр описания адсорбции на мезопористых адсорбентах – степень заполнения микропор Θ , определяемая выражением

$$\Theta = W/W_0, \quad (1)$$

где W_0 – общий объем микропор;

W – объем пор, заполненных при некотором относительном давлении P/P_s .

Традиционные технологии получения сорбентов из каменного угля состоят из достаточно энергоемких и длительных стадий карбонизации (температура процесса 650...700 °С, продолжительность – несколько часов) и окислительной активации (температура 800...1000 °С), которые в целом и определяют высокую себестоимость готового продукта – активированных углей различных марок. Высокая стоимость активных углей существенно ограничивает их применение для нейтрализации АХОВ даже при их возможной регенерации. Использование дорогих активированных углей для поглощения АХОВ при промышленных авариях на технологических емкостях, хранилищах, транспорте, в случае разрушения химически опасных объектов, связанных с масштабными разливами АХОВ, нереально с экономической точки зрения.

Один из самых недорогих и эффективных способов сокращения времени испарения пролитых АХОВ и ограничения распространения облака зараженного воздуха [6] – применение сорбирующих опасные вещества сыпучих пористых материалов, таких как уголь, порода, кокс, доломит, керамзит, опилки, шлак, золошлак, зола-унос, песок и др. В связи с этим представляет большой интерес применение сорбентов на основе природных пористых материалов для нейтрализации разливов АХОВ. Ценность этих сорбентов заключается в том, что они могут заменить дефицитные и дорогостоящие материалы, полученные в основном искусственным путем, и вследствие своей относительной дешевизны не нуждаются в регенерации. Оценивали сорбционную емкость природных мезопористых углей методами анализа эффективности нейтрализации жидких АХОВ для определения их удельной поверхности.

Классификация экспериментальных методов определения сорбционной емкости природных пористых материалов представлена на схеме (рис. 1).

В качестве основных экспериментальных методов, используемых для определения сорбционной емкости природных пористых материалов, можно выделить статистические и динамические методы.

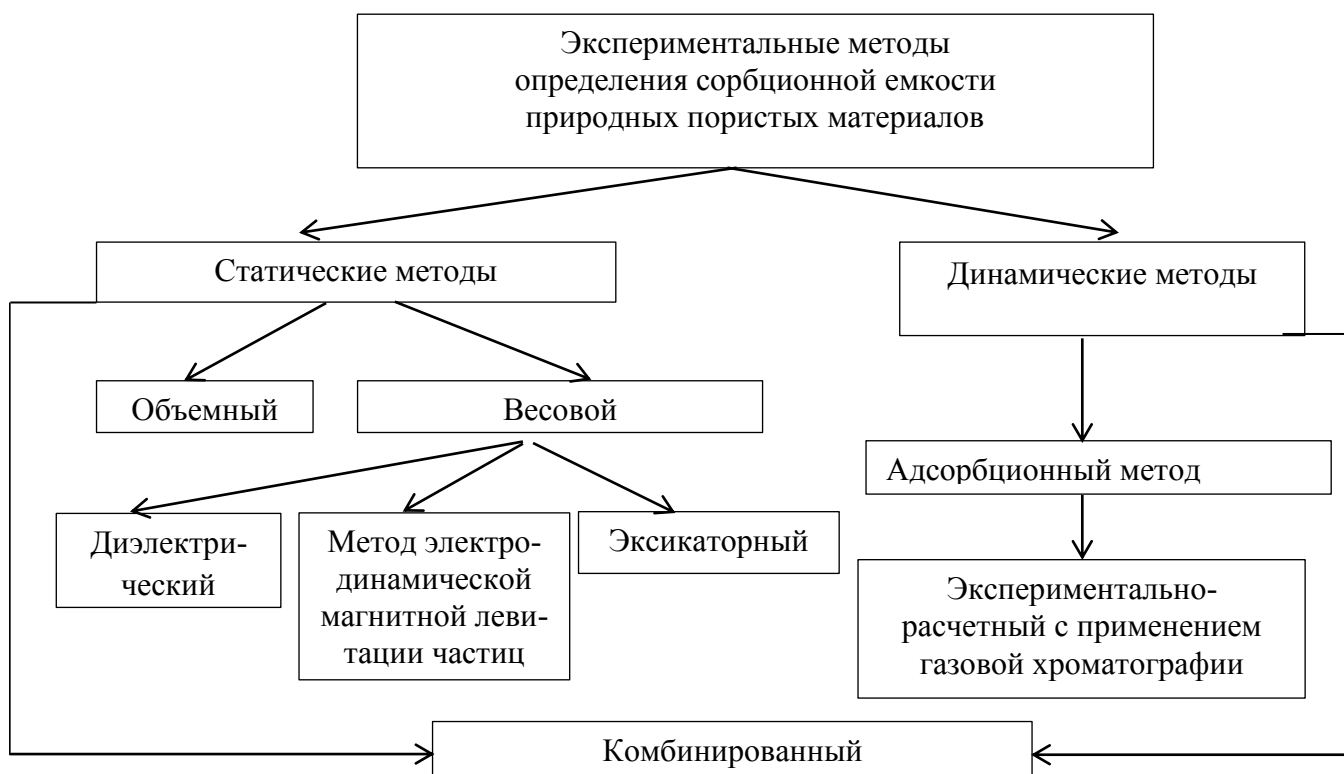


Рис. 1. Классификация экспериментальных методов определения сорбционной емкости природных пористых материалов

При выборе метода исследования сорбционных свойств пористых материалов из вышеперечисленных была оценена роль каждого из критических факторов, сказывающихся на качестве измерения изотерм сорбции и точности их построения.

К таким факторам относятся:

- условия подготовки образца к экспериментам;
- метод определения количества сорбированного вещества;
- контроль температуры сорбента в течение эксперимента;
- объем рабочей установки и вспомогательных емкостей;
- отклонение поведения исследуемого газа от идеального;
- воздействие окружающей среды;
- определение момента установления равновесия в термодинамической системе газ (пар) – твердое тело.

Отметим, что на точности экспериментальных измерений также сказывается область давлений и температур, в которой проводятся измерения.

Для сравнения существующих методов определения сорбционного объема пористых материалов, способов измерения изотерм сорбции с целью выбора оптимальных экспериментальных методов определения сорбционного объема пористых материалов исходя из задач, определенных ранее, была составлена табл. 1, которая наглядно показывает достоинства и недостатки того или иного

метода.

На основе данных табл. 1 выполнен сравнительный анализ экспериментальных методов определения сорбционной емкости материалов. В результате выполненного анализа данных пришли к выводу о том, что для наших исследований невозможно использовать такие экспериментальные методы, как метод электродинамической левитации одиночных частиц (слишком малая навеска сорбента), комбинированный объемно-весовой метод (применим только для многокомпонентных систем), статический (продолжительность по времени, сложность проектирования и производства установки по определению сорбционной емкости).

Таблица 1

Сравнительная характеристика экспериментальных методов определения сорбционных свойств природных пористых материалов

Метод	Измеряемый параметр	Достоинства метода	Недостатки метода
Объемный (волюметрический) метод	Равновесное давление и соответствующий объем сорбированного вещества	Возможность изучения сорбентов с небольшой удельной поверхностью путем загрузки больших навесок в адсорбционную камеру	При малой суммарной поверхности сорбента, помещенного в ампулу, снижается точность измерений, накопление ошибок, вызванных тем, что результаты измерения и расчета каждой последующей точки зависят от предыдущих, длительная подготовка установки
Диэлектрический метод	Диэлектрическая постоянная	Не требуется коррекции результатов, вызванных неидеальностью адсорбата	Требуется термостатирование и предварительные калибровки большого количества вспомогательных емкостей, сосудов, сечений трубопроводов, что усложняет процесс измерений
Весовой (гравиметрический) метод	Масса образца	Прямое измерение сорбции в каждой точке изотермы, вне зависимости от полученных при предыдущих измерениях, погрешности отдельных измерений не суммируются. В весовых установках нет необходимости знать объемы емкостей рабочей части установки при измерениях в интервале давлений, далеких от давления насыщенного пара сорбата, достаточно термостатировать пространство, в котором находится сорбент	Время установления сорбционного равновесия зависит от относительного давления пара P/P_s , малой навески порядка 10^{-7} г, необходимости высокочувствительных электронных микровесов

Окончание табл. 1

Метод	Измеряемый параметр	Достоинства метода	Недостатки метода
Динамический метод	Концентрация сорбата, расход газа	Статические процессы распределения веществ между фазами (сорбент – исследуемое вещество) повторяются многократно. Измерения проводят при атмосферном давлении без вакуумного насоса	Ограничен конкретными условиями и не учитывает многообразия ситуаций, которые могут возникнуть при использовании сорбентов в реальных условиях нейтрализации химически опасного вещества
Метод электродинамической левитации одиночных частиц	Изменение массы частиц сорбента	Прямое измерение сорбции в каждой точке изотермы, вне зависимости от полученных результатов при предыдущих измерениях	Необходимость высокочувствительных электронных микровесов для определения очень малых количеств исследуемого вещества (нанограммы)
Эксикаторный метод	Масса сорбированного вещества	Прямое измерение увеличения массы сорбента в процессе сорбции исследуемого вещества	Невозможность проведения исследований в широком диапазоне давлений и температур, изучения процессов сорбции токсичных веществ, а также веществ с низкими критическими температурами, сложность термостатирования образца
Комбинированный объемно-весовой метод	Масса и объем сорбированного вещества	Комплексное исследование сорбции многокомпонентных газов на различных материалах	Применим только для многокомпонентных систем
Динамический экспериментально-расчетный с применением газовой хроматографии	Концентрация сорбата, расход газа	Простота в аппаратном оформлении, высокая производительность, эффективность и чувствительность	—

Кроме того, выполнение объемного и диэлектрического методов требует термостатирования и предварительной калибровки большого количества вспомогательных емкостей, сосудов, сечений трубопроводов, что значительно усложняет процесс измерений.

В основу экспериментальных исследований процессов сорбции в настоящей работе положены весовой и эксикаторный методы в статических условиях эксперимента, а также адсорбционный метод в потоке газа в динамических условиях эксперимента.

Важное достоинство выбранных методов заключается в том, что сорбция, измеренная этими методами в каждой точке, не зависит от предыдущих

измерений, поэтому погрешности отдельных измерений (случайные или систематические) не суммируют, как в объемном или диэлектрическом методе.

При исследовании сорбционных свойств с помощью выбранных экспериментальных методов основные контролируемые параметры – температура и давление, а измеряемые величины – масса сорбируемого вещества и расход газа.

Цель исследования. Изучение статической емкости угольных сорбентов на базе активированных и природных мезопористых углей.

Результаты исследования. Испытаниям были подвергнуты активированные угли (АГ-3, АГ-5), природные мезопористые угли, коксовая мелочь, термоантрацит, сульфоуголь с размером фракций 1...4 мм (табл. 2).

Таблица 2

Сорбционная емкость углей

Марка угля	Концентрация фенола, г/л					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Природные мезопористые угли	4,4	8,5	16,6	24,2	32,5	39,7
Коксовая мелочь	0,2	0,4	0,8	1,2	1,7	2,1
Термоантрацит	0	0	0	0	0	0
Сульфоуголь	3,8	7,3	14,4	21,6	28,5	34,4
Активированный уголь АГ-3	8,9	17,8	34,6	51,4	65,9	81,7
Активированный уголь АГ-5	8,5	16,7	32,9	45,4	59,7	73,1

Характеристики каменных углей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Соотношение поверхности пор различного диаметра в каменных углях и дифференциальная пористость

Поры	Средний диаметр, м	Поверхность пор, %	Объем пор, %
Микропоры	10^{-9}	62,2	12,5
Мезопоры	$6 \cdot 10^{-9}$	35,1	42,2
Переходные поры	$5,5 \cdot 10^{-8}$	2,5	28,1
Макропоры	$5,5 \cdot 10^{-7}$	0,2	17,2

Из табл. 3 видно, что наибольший вклад в удельную поверхность вносят микропоры (почти 2/3), а вместе с мезопорами удельная поверхность составляет 97,3 %.

В то же время объем пор наиболее существен для мезопор (42,2 %), а вместе с переходными порами составляет более 70 %, в то время как микро- и макропоры вместе составляют менее 30 % суммарного объема пор. Таким образом, при

На рис. 2 представлены изотермы сорбции фенола испытуемых образцов углей. Как следует из полученных результатов, мезопористый уголь в два раза уступает активным углям марки АГ-3 и АГ-5. Следует также отметить низкую сорбционную емкость коксовой мелочи, полное отсутствие сорбционной емкости у термоантрацита и несколько более низкую, чем у мезопористых углей, сорбционную емкость сульфоугля.

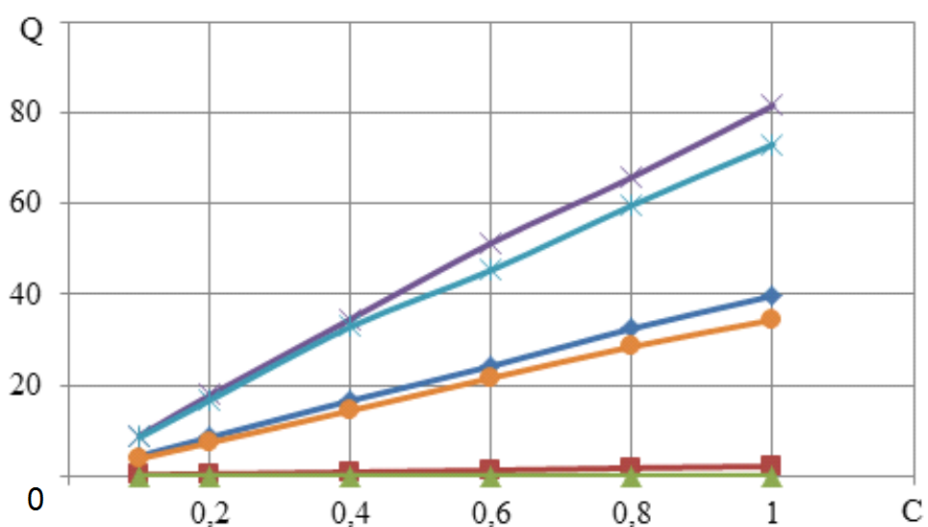


Рис. 2. Статическая сорбционная емкость угольных сорбентов:

 мезопористый уголь;
  коксовая мелочь;

 термоантрацит;
  АГ-3;

 АГ-5;
  сульфоуголь

Для расчета статической емкости угольных сорбентов по хлорбензолу были испытаны четыре образца углей при исходной концентрации хлорбензола в воде 250 мг/л (табл. 4).

Таблица 4

Сорбционная емкость углей по хлорбензолу

Марка угля	Статическая емкость
Мезопористый уголь	127
АГ-3	165
АГ-5	135
СКГ-2С	153

Как видно из приведенных данных, сорбционная емкость мезопористого угля примерно в 1,3 раза ниже активированного.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Подводя итог проведенным исследованиям, можно рекомендовать сорбенты на основе мезопористых углей при чрезвычайных ситуациях, связанных с разливом АХОВ. Учитывая, что стоимость активных углей в десятки раз превышает стоимость мезопористого угля, преимущества последнего очевидны даже при некотором увеличении эксплуатационных издержек.

Список литературы / References

1. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций / С.А. Буланенков, С.И. Воронов П.П. Губченко и др.; под общ. ред. М.И. Фалеева. – Калуга : Облиздат, 2001. – 408 с.

Bulanenkov, S.A., Voronov, S.I., Gubchenko, P.P. et al.; M.I. Faleyev (ed.). *Zashchita naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy* [Protection of population and territories against emergency situations]. Kaluga, Oblizdat Publ., 2001, 408 p.

2. Сычев, Ю.Н. Безопасность жизнедеятельности в чрезвычайных ситуациях / Ю.Н. Сычев. – М. : Финансы и статистика, 2009. – 222 с.

Sychyov, Yu.N. *Bezopasnost' zhiznedeятel'nosti v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Vital activity safety in emergency situations]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2009, 222 p.

3. Кобелев, А.А. Выявление и оценка химической обстановки при разрушениях (авариях) на ХОО / А.А. Кобелев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. 4-й Международной науч.-практ. конф. Т. 2. – Минск, 2007. – С. 139 – 141.

Kobelev, A.A. *Vyyavleniye i otsenka khimicheskoy obstanovki pri razrusheniyakh (avariyakh) na KhOO* [Detection and evaluation of a chemical situation in wreckage (accidents) at the chemically hazardous objects]. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya: sbornik tez. dokl. 4-y Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. T. 2* [Emergency situations: prevention and elimination: collection of theses of papers of the 4th International scientific and practical conference. Vol. 2]. Minsk, 2007, pp. 139 – 141.

4. Передерий, М.А. Углеродные сорбенты из ископаемых углей: состояние, проблемы и перспективы развития / М.А. Передерий // Химия твердого топлива. – 2005. – № 1. – С. 76 – 90.

Perederiy, M.A. *Uglerodnyye sorbenty iz iskopayemykh ugley: sostoyaniye, problemy i perspektivy razvitiya* [Carbon sorbents produced from fossil coal: state, problems and prospects of development]. *Khimiya tverdogo topliva – Chemistry of solid fuel*, 2005, no. 1, pp. 76 – 90.

5. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 2014. – 36 с.

Greg, S., Sing, K. *Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost'* [Adsorption, specific surface, porosity]. Moscow, Mir Publ., 2014, 36 p.

6. Климов, Е.С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод / Е.С. Климов, М.В. Бузаева. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 201 с.

Klimov, Ye.S., Buzayeva, M.V. *Prirodnyye sorbenty i kompleksony v ochistke stochnykh vod* [Natural sorbents and complexons in the sewage treatment]. Ul'yanovsk, UlGTU Press, 2011, 201 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 03.10.2019

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: niigd@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) 332-78-43;

Aleksey Nikolayevich Yanchenko, head of section; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

Department of civil defence and population protection of the MChS DPR

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

238048, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone: (+38 062) 340-62-19

EFFECTIVENESS OF SORBENTS BASED ON NATURAL POROUS MATERIALS

Purpose. Investigation of the static sorption capacity of the carbon sorbents based on activated and natural mesoporous coal.

Methodology. Analysis, generalization and statistical processing of the results of the experimental investigations of the natural mesoporous coal.

Results. The characteristics of the sorption capacity of the activated and mesoporous coal according to chlorobenzene and phenol have been obtained.

Scientific novelty. The influence of the ratio of the surface of the pores of the different diameter in the natural mesoporous coal on their sorption capacity has been established.

Practical value. The obtained calculation results of the static capacity of the carbon sorbents enable to estimate their effectiveness in comparison with the activated coal.

Keywords: *chemically hazardous substances conducive to accidents; sorbents; mesoporous coal; coal sorption capacity; chlorobenzene; phenol.*

УДК [547.53:543-414]:552.578.1; [547.53:543-414]:622.614.1;
[547.53:543-414]:674.823

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;

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

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

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ

Цель. Исследование зависимости сорбционной емкости от фракционного состава каменного угля, котельного шлака и древесных опилок.

Методы. Экспериментальные исследования с применением ускоренного и продолжительного гравиметрического метода определения сорбционной емкости материалов в статических условиях эксперимента. Математическая обработка и корреляционный анализ экспериментальных данных графическим методом с помощью линейной функции.

Результаты. Изучено влияние фракционного состава на сорбционную емкость углеродных сорбентов. Определена сорбционная емкость образцов длиннопламенного газового угля, котельного шлака и древесных опилок пяти фракций: 0,25...0,315 мм; 0,315...0,5 мм; 0,5...1 мм; 1...2 мм и 2...3 мм. Установлено, что наилучшими сорбционными свойствами обладают образцы длиннопламенного газового угля и котельного шлака фракции 0,250...0,5 мм. В отличие от длиннопламенного газового угля и котельного шлака, для древесных опилок получена положительная зависимость сорбционной емкости от размера фракции. Среди исследованных фракций древесных опилок максимальные значения сорбционной емкости получены для фракции 2...3 мм.

Научная новизна. Впервые исследована зависимость сорбционной емкости по бензолу от различного фракционного состава длиннопламенного газового угля и промышленных отходов предприятий Донецкого региона: котельного шлака и древесных опилок.

Практическая значимость. Результаты экспериментальных исследований можно применять при разработке рецептур и технологий приготовления углеродных сорбентов, предназначенных для локализации зон аварийных разливов химически опасных веществ и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах.

Ключевые слова: бензол; длиннопламенный газовый уголь; древесные опилки; сорбционная емкость; фракция; шлак котельный.

Постановка проблемы. Аварийные и технологические разливы токсичных опасных химических соединений представляют серьезную угрозу окружающей природной среде, а также жизни и здоровью населения.

Особенное значение это приобретает при постоянном увеличении объемов перевозок подобных опасных грузов транспортными средствами и использования широкого круга химически опасных веществ в технологических процессах, что потенциально увеличивает возможное количество аварийных выбросов и разливов опасных веществ в окружающую среду.

Среди задач, связанных с разработкой новых и совершенствованием существующих способов и средств ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах, связанных с аварийными разливами токсичных веществ, проблема разработки доступных сорбентов для локализации зоны разлива и снижения времени испарения паров опасных жидкостей с поверхности разлива занимает одно из основных мест.

Актуальность обозначенной проблемы становится все значительнее в связи с высокой стоимостью и дефицитом активированных углей, а также синтетических полимерных сорбентов и нерентабельностью их использования в больших объемах для локализации зон территориально масштабных аварийных разливов химически опасных веществ. Поэтому своевременна проблема исследования и разработки дешевых и одновременно эффективных сорбентов на базе доступного местного сырья.

Анализ последних исследований. Сорбционные свойства во многом обусловлены структурой пористости, удельной поверхностью и фракционным составом сорбентов. Обширный материал по исследованию сорбционных свойств каменных углей Донецкого региона изложен и обобщен в монографии [1]. Изучению эксплуатационных свойств природных сорбентов посвящены работы [2, 3]. Данные исследований последних лет влияния пористой структуры и размера пор на кинетику сорбции природных глинистых материалов рассмотрены и обобщены в работе [4]. Критический анализ результатов научных исследований показывает, что при оптимизации рецептур сорбционных составов на основе каменных углей и промышленных отходов фракционному составу отводится незначительное внимание исследователей. Поэтому изучение влияния фракционного состава на сорбционную емкость каменных углей и промышленных отходов – актуальная проблема с научной и практической точек зрения.

Цель работы – изучить влияние фракционного состава углеродных сорбентов на сорбционную емкость и выбрать наиболее оптимальные размеры фракций для практического использования.

Изложение основного материала. На основании результатов экспериментальных исследований, приведенных в работе [5], для изучения влияния размера фракций на сорбционные свойства сорбентов выбраны каменный уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый), котельный шлак

и древесные опилки как наиболее перспективные материалы с наибольшими значениями статической сорбционной емкости по бензолу.

В качестве образца сравнения для оценки сорбционных свойств исследуемых материалов взят образец активированного угля промышленного производства марки АГН.

Исследования влияния размера частиц материалов на их сорбционную емкость проводили по пяти фракциям с разными размерами гранул: мелкой 0,25...0,315 мм; средней 0,315...0,5 мм, 0,5...1 мм и крупной 1...2 мм, 2...3 мм.

Сорбционную емкость образцов материалов по бензолу определяли гравиметрическим методом, сущность которого заключается в прямом измерении увеличения массы исследуемого материала в процессе насыщения бензолом в течение 15 мин (ускоренный метод) и 24 ч (продолжительный метод).

Значения сорбционной емкости по бензолу образцов длиннопламенного газового угля разных фракций, полученные гравиметрическим ускоренным и продолжительным методом, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сорбционная емкость образцов угля марки ДГ разных фракций

Фракция, мм	Сорбционная емкость по бензолу			
	ускоренный метод		продолжительный метод	
	уголь ДГ	уголь АГН	уголь ДГ	уголь АГН
0,25...0,315	0,83	1,23	0,88	1,39
0,315...0,5	0,72	1,32	0,81	1,42
0,5...1	0,72	1,30	0,75	1,40
1...2	0,67	1,12	0,69	1,24
2...3	0,60	—	0,65	—

Сорбционную емкость активированного угля марки АГН фракции 2...3 мм не определяли, так как максимально возможный размер гранул материала 2,7 мм.

Из данных табл. 1 следует, что значения сорбционной емкости уменьшаются с увеличением размера гранул длиннопламенного газового угля от 0,25 до 3 мм. Максимальные значения сорбционной емкости по бензолу получены для образцов длиннопламенного газового угля мелкой фракции 0,25...0,315 мм.

Для двух исследуемых образцов котельного шлака разных фракций значения сорбционной емкости по бензолу, полученные ускоренным и продолжительным гравиметрическим методом, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сорбционная емкость котельного шлака разных фракций

Фракция, мм	Сорбционная емкость по бензолу					
	ускоренный метод			продолжительный метод		
	образец № 1 шлака	образец № 2 шлака	уголь АГН	образец № 1 шлака	образец № 2 шлака	уголь АГН
0,25...0,315	1,19	1,14	1,23	1,21	1,20	1,39
0,315...0,5	1,20	1,30	1,32	1,32	1,35	1,42
0,5...1	0,84	0,99	1,30	0,89	1,02	1,40
1...2	0,79	0,95	1,12	0,81	1,02	1,24
2...3	0,75	0,85	–	0,76	1,03	–

Анализ полученных данных (табл. 2) показал, что с увеличением размера фракции от 0,315 до 3 мм сорбционная емкость образцов котельного шлака уменьшается, достигая максимальных значений для фракции диапазона 0,315...0,5 мм, и приближается к сорбционной емкости активированного угля АГН.

Результаты экспериментальных исследований древесных опилок по определению зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сорбционная емкость древесных опилок разных фракций

Фракция, мм	Сорбционная емкость по бензолу			
	ускоренный метод		продолжительный метод	
	опилки	уголь АГН	опилки	уголь АГН
0,315...0,5	4,63	1,23	5,03	1,39
0,5...1	5,10	1,32	5,29	1,42
1...2	6,74	1,30	7,33	1,40
2...3	6,99	1,12	7,35	1,24

Сорбционная емкость древесных опилок пропорционально увеличивается с увеличением размера фракций от 0,315 до 3 мм и значительно превышает сорбционную емкость активированного угля марки АГН (табл. 3).

Установление и описание характера зависимостей результатов, полученных из экспериментов (см. табл. 1–3), оценка степени взаимосвязанности значений сорбционной емкости от размера фракции исследуемых материалов исходя из предположения о линейной зависимости данных произведены графическим методом с помощью линейной функции вида

$$Y(X) = aX + b, \quad (1)$$

где Y – значение результативного признака – сорбционная емкость по бензолу;

X – значение факторного признака – фракция материала;

a – угловой коэффициент линейной функции;

b – коэффициент линейной функции – точка пересечения прямой с осью Y .

В качестве меры взаимосвязанности результативного и факторного признака использовали коэффициент корреляции Пирсона r , который рассчитывают по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{X}$ – средние значения факторного признака – фракция материала;

$\bar{Y}$ – средние значения результативного признака – сорбционной емкости по бензолу.

Значения коэффициента корреляции Пирсона получали путем математической обработки экспериментальных данных и компьютерного расчета с помощью табличного процессора Microsoft Office Excel по формуле (2).

В результате математической обработки данных получены аналитические зависимости сорбционной емкости от фракционного состава каждого исследуемого материала, наглядно изображающие направленность корреляционной связи между изучаемыми показателями. Полученные аналитические зависимости представляют собой графики в прямоугольной системе координат, по оси ординат которых откладывают значения результативного признака Y , а по оси абсцисс – значения факторного признака X (среднее значение диапазона фракции материала). На рис. 1 показаны аналитические зависимости экспериментальных данных (см. табл. 1).

Направленность корреляционной связи между значениями Y и X отрицательная (рис. 1): сорбционная емкость по бензолу уменьшается с увеличением фракции угля. Значения коэффициентов корреляции аналитических зависимостей близки к единице, что свидетельствует о весьма высокой корреляционной связи между результативным и факторным признаком.

Аналитические зависимости сорбционной емкости образца № 1 котельного шлака по бензолу от фракционного состава представлены на рис. 2.

Аналогично выполнена математическая обработка экспериментальных данных (табл. 2), на основании которой получены аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава образца № 2 котельного шлака (рис. 3).

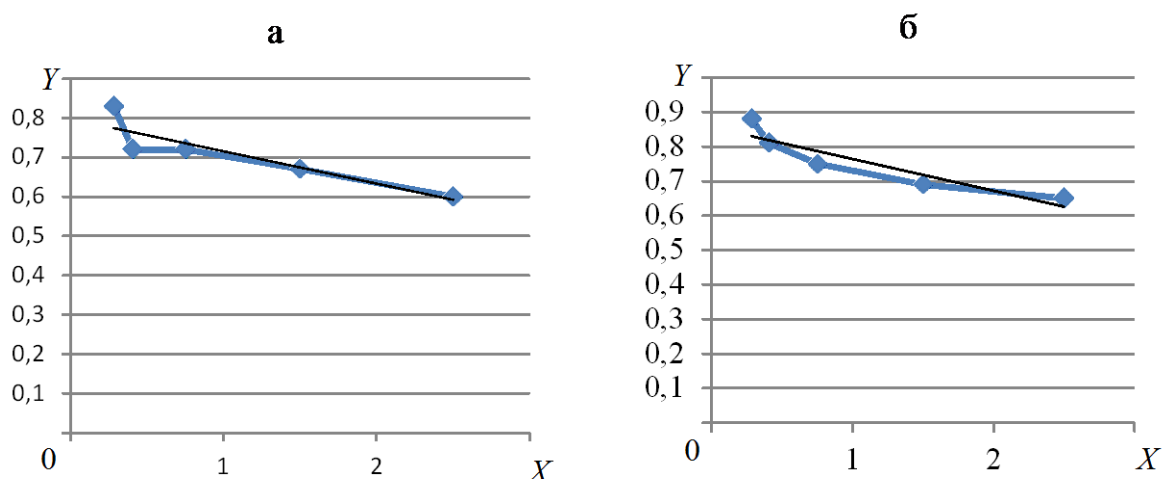


Рис. 1. Аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава длиннопламенного газового угля: а – ускоренный гравиметрический метод; $Y = -0,0822X + 0,7974$; $r = 0,90$; б – продолжительный гравиметрический метод; $Y = -0,0919X + 0,856$; $r = 0,92$

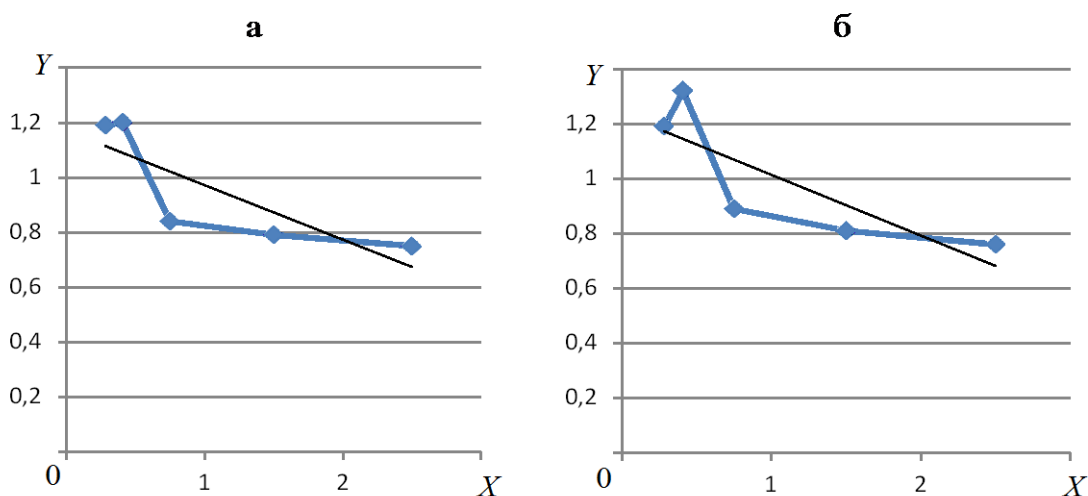


Рис. 2. Аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава образца № 1 котельного шлака: а – ускоренный гравиметрический метод; $Y = -0,199X + 1,1705$; $r = 0,82$; б – продолжительный гравиметрический метод; $Y = -0,2215X + 1,235$; $r = 0,83$

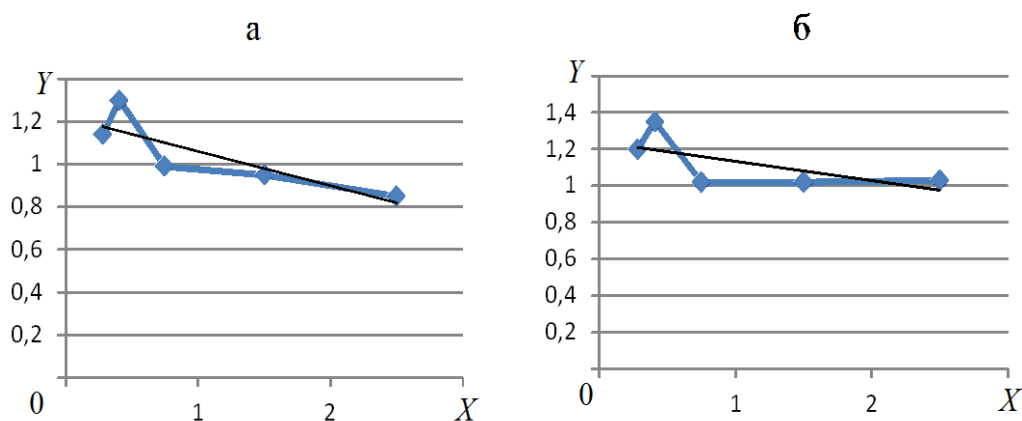


Рис. 3. Аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава образца № 2 котельного шлака: а – ускоренный гравиметрический метод; $Y = -0,1611X + 1,2212$; $r = 0,84$; б – продолжительный гравиметрический метод; $Y = -0,1049X + 1,2381$; $r = 0,65$

Значения коэффициентов корреляции (см. рис. 2 и 3) высокие и стремятся к единице, что свидетельствует о наличии хорошей корреляционной связи отрицательной направленности экспериментальных данных двух исследуемых образцов котельного шлака.

Таким образом, наблюдается общая тенденция уменьшения сорбционной емкости образцов длиннопламенного газового угля и котельного шлака с увеличением размера фракции материала и наличие тесной линейной корреляции между экспериментальными данными.

На рис. 4 представлены аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава древесных опилок, полученные ускоренным и продолжительным гравиметрическим методом.

Значения коэффициентов корреляции аналитических зависимостей (см. рис. 4) близки к единице, что свидетельствует о высокой положительной корреляционной связи между результативным и факторным признаком.

В отличие от длиннопламенного газового угля и котельного шлака, зависимость сорбционной емкости древесных опилок от фракционного состава имеет положительную направленность: сорбционная емкость исследуемых образцов древесных опилок увеличивается с увеличением размера фракции от 0,315 до 3 мм.

Таким образом, для каждого сорбента, определив коэффициенты a и b линейной функции (1), можно найти значение результативного признака Y – сорбционную емкость по значению факторного признака X – фракции материала в дополнительных точках, где эксперимент не проводился.

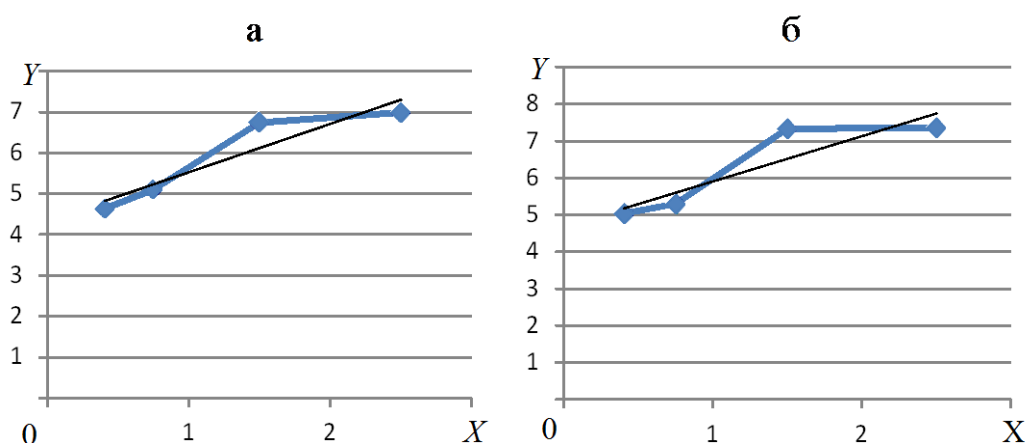


Рис. 4. Аналитические зависимости сорбционной емкости по бензолу от фракционного состава древесных опилок: а – ускоренный гравиметрический метод; $Y = 1,182X + 4,3409$; $r = 0,93$; б – продолжительный гравиметрический метод; $Y = 1,2274X + 4,6699$; $r = 0,90$

Отметим также, что выявленная высокая линейная корреляционная связь между экспериментальными значениями сорбционной емкости и фракционным составом исследуемых материалов свидетельствует о возможности применения ускоренного и продолжительного гравиметрического метода при разработке новых сорбентов, а также при контроле сорбционных свойств уже используемых материалов, поглощающих жидкие токсичные вещества.

Выводы. Впервые исследована зависимость сорбционной емкости каменного угля, котельного шлака и древесных опилок от размера фракций: 0,25...0,315 мм; 0,315...0,5 мм; 0,5...1 мм; 1...2 мм и 2...3 мм.

Результаты исследований показали, что длиннопламенный газовый уголь и котельный шлак фракции 0,25...0,5 мм, древесные опилки фракции 2...3 мм обладают наибольшей сорбционной емкостью и могут быть рекомендованы как наиболее дешевые углеродные сорбенты для проведения ликвидационных мероприятий при масштабных аварийных разливах химически опасных веществ на промышленных объектах и транспорте.

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. 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 sorbents for elimination of oil products spills in transport]. *Avtomobil'nyy transport – Automobile transport*, 2012, issue 31, pp. 129 – 135.

3. Сорбционная способность природных сорбентов / С.В. Беленова, В.И. Вигдорович, Н.В. Шель, Л.Е. Цыганкова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20, вып. 2. – С. 388 – 396 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sorbtsionnaya-sposobnost-prirodnyh-sorbentov> (дата обращения: 17.05.2019).

Belenova, S.V., Vigdorovich, V.I., Shel', N.V. et al. *Sorbtsionnaya sposobnost' prirodnikh sorbentov* [Sorption ability of natural sorbents]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences]. 2015, vol. 20, issue 2, pp. 388 – 396. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/sorbtsionnaya-sposobnost-prirodnyh-sorbentov> (accessed: 17.05.2019).

4. Джусупкалиева, Р.И. Исследования сорбентов, используемых для очистки нефтезагрязненных территорий / Р.И. Джусупкалиева, А.У. Таубаева // Технические науки в России и за рубежом: материалы VII Междунар. науч. конф. – М. : Буки-Веди, 2017. – С. 182 – 184 [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/286/12431> (дата обращения: 17.05.2019).

Dzhusupkaliyeva, R.I., Taubayeva, A.U. *Issledovaniya sorbentov, ispol'zuyemykh dlya ochistki neftezagryaznyennykh territoriy* [Investigations of sorbents being used for cleaning the oily areas]. *Tekhnicheskiye nauki v Rossii i za rubezhom: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf.* [Technical sciences in Russia and abroad: materials of the 7th International scientific conference]. Moscow, Buki-Vedi Publ., 2017, pp. 182 – 184. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/286/12431/> (accessed: 17.05.2019).

5. Способность пористых материалов поглощать аварийно химически опасные вещества / Ан.В. Агарков, А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, О.Н. Щербакова // 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* [Ability of porous materials to absorb chemically hazardous substances conducive to accidents]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 94 – 99.

Andrey Viktorovich Agarkov, applicant; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;
Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;
Oksana Nikolayevna Shcherbakova, engineer of the 1st category; e-mail: astra-jasmin@mail.ru
*The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55*

INFLUENCE OF THE FRACTIONAL COMPOSITION ON SORPTION PROPERTIES OF CARBON SORBENTS

Purpose. Investigation of a dependence of the sorption capacity on the fractional composition of black coal, engine ashes and sawdust.

Methods. Experimental investigations with an application of the express and prolonged gravimetric methods of determination of the sorption capacity of the materials under the static conditions of the experiment. The mathematical processing and the correlation analysis of the experimental data by the graphical method with the help of the affine function.

Results. The influence of the fractional composition on the sorption capacity of the carbon sorbents has been studied. The sorption capacity has been determined for the samples of long flaming coal, engine ashes and sawdust of five fractions: 0.25...0.315 mm; 0.315...0.5 mm; 0.5...1 mm; 1...2 mm; 2...3 mm. It has been stated that the samples of long flaming coal and engine ashes with the fraction of 0.250...0.5 mm possess the best sorption properties. Unlike long flaming coal and engine ashes the positive dependence of the sorption capacity on the fraction size has been obtained for sawdust. Among the investigated sawdust fractions the maximum values of the sorption capacity have been obtained for the fraction of 2...3 mm.

Scientific novelty. For the first time the dependence of the sorption capacity by benzene on the different fractional composition of long flaming coal and industrial waste of the Donetsk region enterprises, i.e. engine ashes and sawdust, has been investigated.

Practical value. The results of the experimental investigations may be used in the development of formulations and technologies of production of the carbon sorbents intended for containment of zones with emergency spills of the chemically hazardous substances and elimination of the consequences of the emergencies at the chemically hazardous objects.

Keywords: *benzene; long flaming coal; sawdust; sorption capacity; fraction; engine ashes.*

УДК 614.842.611*Дарья Федоровна Балта, науч. сотр.; e-mail: balta_daria@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*

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ТУШЕНИЯ СКЛОННЫХ К ТЛЕНИЮ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Определение оптимальных условий тушения пожаров твердых горючих материалов подкласса А1 огнетушащими порошками или порошками в сочетании с другими огнетушащими веществами.

Методика. Аналитические исследования физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии универсальных порошковых составов с очагом горения.

Результаты. Рассмотрен механизм прекращения скрытого тлеющего горения порошковыми огнетушащими составами. Установлена способность универсальных порошков АВСЕ изолировать очаг пожара. Предложена модель тушения пожаров твердых горючих материалов подкласса А1 огнетушащими порошками или порошками в сочетании с огнетушащими веществами охлаждающего действия. На основании формулы, описывающей охлаждающий эффект универсальных порошков, получено выражение для определения необходимого времени подачи порошка для охлаждения очага горения.

Научная новизна. Определены условия тушения очага горения огнетушащими порошками твердых горючих материалов, склонных к тлению. Эти условия учитывают инерционность передачи теплоты частицам порошка и образование на поверхности твердого горючего материала изолирующей полимерной пленки расплава.

Практическая значимость. Использование изолирующего эффекта огнетушащих порошков на основе фосфорно-аммонийных солей позволяет эффективно применять их для тушения склонных к тлению твердых горючих материалов отдельно и в комбинации с огнетушащими веществами охлаждающего действия.

Ключевые слова: *тлеющее горение; огнетушащий порошок; фосфорно-аммонийные соли; пленка расплава; изолирование; охлаждение очага тления; синергизм.*

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследования. Один из опасных факторов пожара – тлеющее горение. Оно характерно для твердых горючих материалов: древесины, бумаги, целлюлозных тканей, слоистых плит, опилок, латексной резины, а также некоторых термореактивных пластиков в растянутом состоянии.

После прекращения пламенного горения из-за преобладания теплоотвода (за счет излучения и конвекции) над тепловыделением тление достаточно быстро затухает. В то же время небольшие очаги могут существовать длительное время. Они сохраняются в местах, где затруднен теплоотвод. Примером может служить тлеющее горение паркетного или деревянного полов в местах стыковки паркета или половых досок, слоистых и ячеистых плит и пр.

В работе [1] отмечено, что при повышении концентрации кислорода в воздухе увеличивается максимальная температура тлеющего горения, т.е. скорость тепловыделения определяется диффузией кислорода в зону реакции.

Таким образом, особенность тушения пожаров подкласса А1 твердых горючих материалов – вероятность повторного воспламенения горючего материала после прекращения воздействия огнетушащего вещества. Повторное воспламенение происходит вследствие скрытого горения (тления) несгоревших остатков целлюлозосодержащих твердых горючих материалов, которое возникает из-за значительного количества теплоты, аккумулированной в них в период пламенного горения, и проникновения кислорода извне.

Основные механизмы прекращения скрытого горения порошковыми огнетушащими веществами – изолирование твердых горючих материалов от кислорода и их эффективное охлаждение. Охлаждение происходит вследствие расхода части теплоты очага тления на нагревание, плавление и испарение частиц порошка, попавших на горячий углистый слой.

И если для выполнения функции изолирования подходят огнетушащие порошки общепромышленного назначения, то с выполнением ими второй функции охлаждения возникают проблемы.

Механизм образования вязкой изолирующей пленки на поверхности твердых горючих материалов практически не рассмотрен в научной литературе. Исключение – ряд работ, выполненных НИИГД во второй половине XX в.

В период времени после нагревания до $t = 150...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и перед разложением огнетушащие порошки (главным образом на основе фосфорно-аммонийных солей) образуют на твердой тлеющей поверхности вязкую изолирующую пленку, препятствующую доступу к этой поверхности кислорода и выходу с поверхности летучих в реакционную зону горения.

На основании изучения дериватограммы аммофоса (рис. 1) – основы огнетушащих порошков П-1А, П-1АП, П-2АП, П-4АП и П-3АТ были сделаны следующие выводы. До $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ заметных потерь аммиака и воды не наблюдается, так как аммофос прошел предварительную сушку при $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержащийся в нем диаммонийфосфат практически весь перешел в моноаммонийфосфат. Экзоэффект при $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ относится к процессу образования пиррофосфата аммония из моноаммонийфосфата:



После достижения температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в расплаве начинается процесс полимеризации мономерных фосфатов с образованием полифосфатов аммония с длинной цепью, о чем свидетельствует эндоэффект при $240\text{ }^{\circ}\text{C}$.

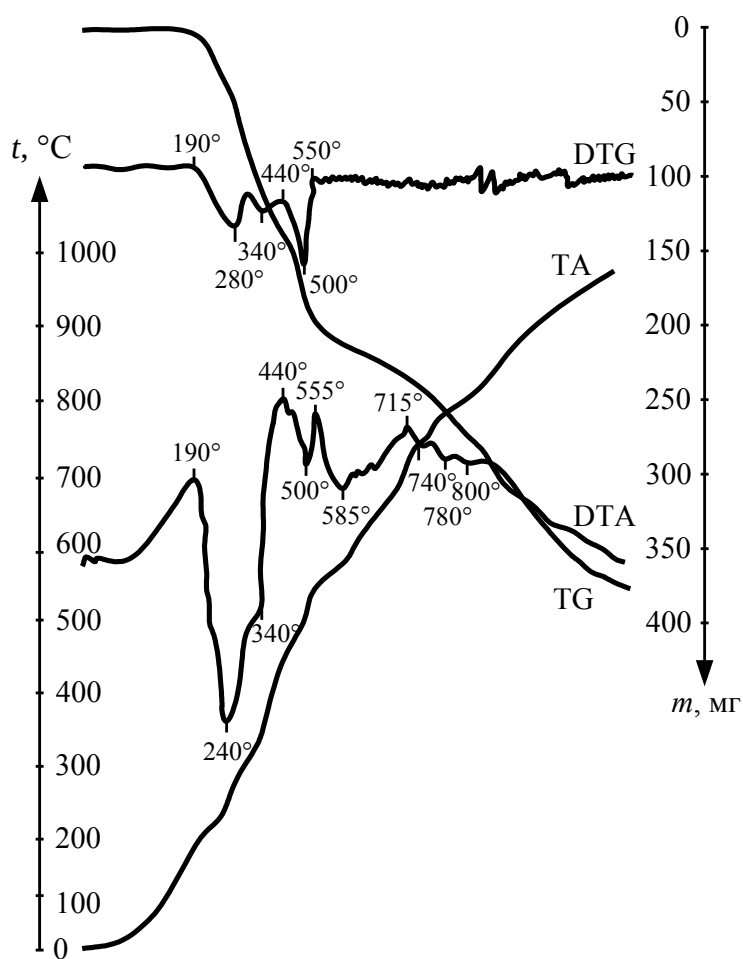


Рис. 1. Дериватограмма аммофоса

Полимеризацию моноаммонийфосфата можно представить следующими уравнениями:



Именно эти соединения образуют на тлеющей поверхности твердых горючих материалов вязкие полимерные пленки, затрудняющие доступ к ней кислорода и прекращающие горение.

Общая потеря массы аммофоса в этом процессе составляет 73 %.

Огнетушащие порошки в основе своей обладают низким охлаждающим эффектом, несмотря на попытки ряда исследователей доказать обратное [2]. Реальный охлаждающий эффект огнетушащего облака не превышает 10...20 % теплоты очага горения, т.е. говорить только о тепловом механизме действия порошков не приходится.

Не имеют основания и рассуждения о разбавлении (флегматизации) очага горения газообразными продуктами разложения порошков. Этот эффект также весьма незначителен. Так, если разложить полностью огнетушащую дозу (150 г/м^3) NaHCO_3 (бикарбонатные порошки классов В, С, Е), то выделившийся CO_2 (около 20 л/м^3) составит лишь 2 % объема защищаемой среды.

Кроме того, порошкам не присуще явление смачивания, вследствие чего они не задерживаются на длительное время на горячей поверхности. Поскольку процесс передачи теплоты частицам порошка происходит не мгновенно, отсутствует возможность эффективного отбора ими теплоты, особенно при ограничении времени воздействия, например при применении для тушения пожаров подкласса А1 модульных и импульсных установок порошкового пожаротушения.

Учет инерционности переноса теплоты в частицах порошка особенно важен при кратковременном воздействии порошка на очаг тления. При попадании частиц порошка на очаг часть из них оседает на обугленную поверхность твердых горючих материалов, образуя расплав, а часть отражается от поверхности и выносится из зоны горения (тления). Отраженные частицы не успевают аккумулировать за время взаимодействия с горючим материалом значительного количества теплоты вследствие инерционности процесса теплопередачи.

Это приводит к необходимости повысить расход порошка для тушения твердых горючих материалов при увеличении интенсивности воздействия на очаг горения и удлинении процесса тушения или заменить на стадии охлаждения порошок другим более эффективным и дешевым огнетушащим веществом.

Цель данной статьи – выявление оптимальных условий тушения твердых горючих материалов подкласса А1 огнетушащими порошками или порошками в сочетании с другими огнетушащими веществами.

Изложение основного материала. Рассмотрим горение и тушение очага пожара в помещении на деревянном полу (древесина – сосна). Возгорание гасится модульной порошковой установкой, крепящейся на потолочном перекрытии помещения над предполагаемым очагом, а тушение обнаруженных при осмотре помещения очагов тления – из стволов установки комбинированного тушения.

Принимаем схему кругового распространения пламени по поверхности равномерно распределенного в горизонтальной плоскости твердого горючего

материала. В качестве огнетушащего вещества в модуле используют универсальные порошки класса ABCЕ на основе фосфорно-аммонийных солей. Под воздействием очага горения на поверхности твердого горючего материала формируется вязкий высокотеплоемкий слой порошка, который поглощает тепловую энергию на собственное расплавление и одновременно блокирует доступ кислорода к очагу возгорания.

Математически условие теплового механизма тушения имеет следующий вид:

$$Q_{\text{зап}} = Q_{\text{пог}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{зап}}$ – общее количество теплоты, запасенное твердым горючим материалом в очаге тления за период пламенного горения, кДж;

$Q_{\text{пог}}$ – общее количество теплоты, поглощенное частицами огнетушащего вещества (на первой стадии – частицами порошка), кДж.

Удельный запас теплоты, накопленный в единице поверхности углистого слоя твердого горючего материала за время свободного горения, определяют по формуле [3]

$$Q_{\text{зап}}^{\text{уд}} = [q_{\text{вн}} - V_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}, \quad (7)$$

где $q_{\text{вн}}$ – внешний лучистый тепловой поток, падающий на единицу поверхности очага горения, кВт/м²;

$V_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания твердого горючего материала, кг/(с·м²);

L – теплота пиролиза, кДж/кг;

$L_{\text{экз}}$ – экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза, кДж/кг;

$q_{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток, отходящий от единицы поверхности очага горения, кВт/м² (рис. 2);

$\tau_{\text{гор}}$ – время свободного горения, с.

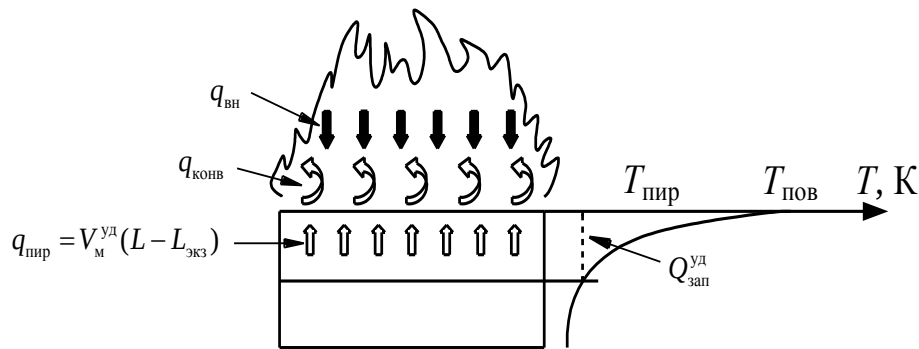


Рис. 2. Схема распределения тепловых потоков при горении одиночного образца древесины

Теплота пиролиза зависит от вида твердого горючего материала. Тепловой эффект экзотермических реакций в пиролизующемся слое древесины приблизительно можно принимать равным 6 % от низшей теплоты сгорания $L_{\text{экз}} = 0,06Q_{\text{н}}$.

Для древесины (сосна) имеем $q_{\text{вн}} = 24 \text{ кВт/м}^2$; $L = 2790 \text{ кДж/кг}$; удельная теплоемкость пиролизированного слоя $c = 1,47 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; средняя удельная теплоемкость пожарных газов $c_{\text{р}} = 3,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; температура поверхности твердых горючих материалов при горении $T_{\text{пов}} = 973 \text{ К}$; температура пиролиза $T_{\text{пир}} = 473 \text{ К}$; низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}} = 19000 \text{ кДж/кг}$, следовательно, $L_{\text{экз}} = 0,06 \cdot 19000 = 1140 \text{ кДж/кг}$ [3].

$$V_{\text{м}}^{\text{пр}} = \frac{q_{\text{вн}}}{(L - L_{\text{экз}}) + c(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) + c_{\text{р}}(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}})} = 0,0061 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2); \quad (8)$$

$$q_{\text{конв}} = V_{\text{м}}^{\text{пр}} c_{\text{р}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) = 9,5 \text{ кВт/м}^2; \quad (9)$$

$$Q_{\text{зап}}^{\text{уд}} = 4,4 \tau_{\text{гор}}. \quad (10)$$

Тогда общее запасенное в очаге количество теплоты

$$Q_{\text{зап}} = Q_{\text{зап}}^{\text{уд}} S_{\text{п}}, \quad (11)$$

где $S_{\text{п}}$ – площадь поверхности очага тления твердого горючего материала, м^2 .

Полный теоретический охлаждающий эффект порошков на основе плавящихся солей выражается формулой

$$Q_{\text{пог}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{лти}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{исп}}, \quad (12)$$

где Q_T – количество теплоты, переданной частицам порошка конвекцией и теплопроводностью, кДж;

$Q_{лтп}$ – количество теплоты, аккумулированной частицами порошка на пути к очагу горения (тления) при поглощении ими лучистого потока, исходящего из очага горения, кДж;

$Q_{пл}$ – общая теплота, выделившаяся при плавлении порошка, кДж;

$Q_{исп}$ – общая теплота испарения частиц порошка, кДж.

Пренебрегая испарением частиц порошка в очаге тления, получим из уравнения (12)

$$Q_T + Q_{лтп} = Q_{зап} - Q_{пл}. \quad (13)$$

С учетом нестационарности передачи теплоты теплопроводностью частицам порошка, отразившимся от твердого горючего материала и не подвергшимся расплавлению, получаем в левой части (13) выражение [4]

$$Q_T + Q_{лтп} = \left[(I c_{\pi} (T_{пов} - T_{\text{ч}}) (1 - (1 - \delta) \exp(-\frac{\tau_{вз}}{\tau_{ин}})) + \mu \varepsilon \sigma T_{пов}^4) S_{\pi} \right] \tau_{\pi}, \quad (14)$$

где $I = \frac{m_{\pi} + n_{\pi}}{S_{\pi} \tau_{\pi}}$ – интенсивность подачи порошка в зону тления, кг/(м²·с);

c_{π} – удельная теплоемкость материала частиц порошка, Дж/(кг·К);

$T_{пов}$ – температура поверхности тления, К;

$T_{\text{ч}}$ – температура частиц порошка в момент их взаимодействия с тлеющим твердым горючим материалом, К;

$\delta = \frac{m_{\pi}}{m_{\pi} + n_{\pi}}$ – доля расплавившихся частиц от общего количества порошка;

$\tau_{вз}$ – время взаимодействия частиц порошка с твердым горючим материалом, с;

$\tau_{ин}$ – постоянная времени инерционности процесса, с;

μ – приведенный коэффициент пропускания слоя частиц порошка;

ε – степень черноты очага тления; $\varepsilon = 0,85$;

σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

τ_{π} – время подачи порошка на очаг пожара, с;

m_{π} – масса расплавившихся частиц порошка, кг;

n_{π} – масса частиц порошка, покинувших зону тления не расплавившись, кг.

Таким образом, эффективность охлаждения определяется, прежде всего, параметрами $\tau_{вз}$ и $\tau_{ин}$.

Время взаимодействия можно оценить из соотношения

$$\tau_{вз} \approx 2h/V_{п}, \quad (15)$$

где h – толщина пограничного слоя над твердым горючим материалом, в котором происходит передача теплоты частицам, м;

$V_{п}$ – скорость частиц порошка в момент соприкосновения с поверхностью тлеющего твердого горючего материала, м/с.

Инерционность процесса определяется теплофизическими параметрами материала частиц порошка:

$$\tau_{ин} = c_{п}\rho_{п}d_{п}^2/\lambda_{п}, \quad (16)$$

где $\rho_{п}$ – плотность материала частиц порошка, кг/м³;

$d_{п}$ – характерный геометрический размер частиц порошка (диаметр), м;

$\lambda_{п}$ – коэффициент теплопроводности материала частиц порошка, Вт/(м·К).

Из анализа выражения (14) установлено, что отбор теплоты частицами порошка от очага тления происходит тем эффективнее, чем больше время их взаимодействия с тлеющим материалом $\tau_{вз}$ и чем меньше тепловая инерционность материала частиц порошка.

Поскольку фосфорно-аммонийные порошки в основном состоят из аммофоса, а из экспериментальных данных известно, что расплавляется 73 % аммофоса, можно принять в выражении (14) в первом приближении $\delta = 0,73$.

Тогда из выражения (14) с учетом (13), (15) и (16) получаем необходимое время подачи порошка для охлаждения очага:

$$\tau_{п} = \frac{Q_{зап} - Q_{пл}}{\left[(Ic_{п}(T_{пов} - T_{ч})(1 - 0,27 \exp(-\frac{2h\lambda_{п}}{V_{п}c_{п}\rho_{п}d_{п}^2}) + \mu\epsilon\sigma T_{пов}^4)S_{п} \right]}. \quad (17)$$

Принимая при подаче порошка из ствола $T_{ч} \approx 300$ К; $T_{пов} \approx T_{пир} = 473$ К, имеем, учитывая уравнение (11):

$$\tau_{п} = \frac{4,4\tau_{гор}S_{п} - Q_{пл}}{\left[(173Ic_{п}(1 - 0,27 \exp(-\frac{2h\lambda_{п}}{V_{п}c_{п}\rho_{п}d_{п}^2}) + 2,4\mu \cdot 10^3)S_{п} \right]}. \quad (18)$$

Таким образом, необходимое время подачи порошка на охлаждение $\tau_{п}$, с, определяют:

- площадью очага тления $S_{\text{п}}$;
- общим временем с момента возникновения пожара $\tau_{\text{гор}}$;
- теплофизическими параметрами порошка $c_{\text{п}}$, $\rho_{\text{п}}$, $d_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{п}}$, $V_{\text{п}}$;
- интенсивностью подачи порошка I .

График тушения представлен на рис. 3.

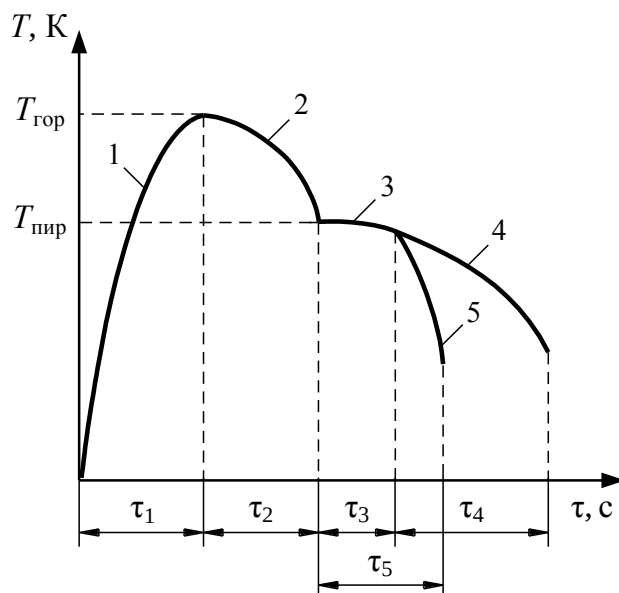


Рис. 3. Процесс разогревания и охлаждения очага пожара при свободном горении (1) и тушении порошком (2, 3, 4) или комбинированном тушении «порошок + тонкораспыленная вода» (2, 3, 5): τ_1 — продолжительность свободного горения; τ_2 — время тушения порошком из модульной автоматической установки; τ_3 — время формирования изолирующей пленки на поверхности тлеющего твердого горючего материала; τ_4 — время охлаждения очага тления порошком; τ_5 — время охлаждения очага тления тонкораспыленной водой

Пусть необходимая толщина изолирующей пленки на поверхности тлеющего очага $h_{\text{пл}}$, м. Тогда

$$Q_{\text{пл}} = q_{\text{пл}} h_{\text{пл}} S_{\text{п}} \rho_{\text{пл}}, \quad (19)$$

где $q_{\text{пл}}$ — удельная теплота плавления фосфорно-аммонийных солей, Дж/кг;

$\rho_{\text{пл}}$ — плотность расплава, кг/м³.

Для моноаммонийфосфата $q_{\text{пл}} = 239$ кДж/кг, а плотность расплава может быть рассчитана в зависимости от концентрации P_2O_5 и температуры по эмпирической зависимости

$$\rho_{\text{пл}} = 0,0706 + 0,0167[\text{P}_2\text{O}_5] - 0,000443t, \quad (20)$$

которая справедлива в температурном интервале $t = 150 \dots 200$ °С.

Выводы. Выявлено, что охлаждающие свойства порошков не играют определяющей роли в эффективности тушения пожара и их использование в таком аспекте приводит к неоправданно большому расходу, повышению длительности подачи.

Решающую роль могут оказать особые свойства порошков, например способность порошков на основе фосфорно-аммонийных солей образовывать при термическом разложении пленку расплава, которая изолирует тлеющий материал от доступа кислорода из внешней среды. Благодаря этому свойству фосфорно-аммонийные порошки являются основными средствами тушения пожаров класса А, в том числе подкласса А1. Комбинация с подачей на второй стадии (охлаждение очага тления) тонкораспыленной воды (или пены) приводит к синергизму – значительному сокращению расхода дорогостоящего порошка с одновременным повышением эффективности тушения (сокращение общего времени ликвидации очага горения).

Список литературы / References

1. Тлеющее горение: особенности. Модельный очаг / Д.В. Бухтояров, С.Н. Копылов, А.В. Казаков, А.В. Попов // Пожарная безопасность. – 2008. – № 3. – С. 63 – 66.

Bukhtoyarov, D.V., Kopylov, S.N., Kozakov, A.V., Popov, A.V. *Tleyushcheye gorenije: osobennosti. Model'nyy ochag* [Smouldering combustion: peculiarities. Standardized fire source]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2008, no. 3, pp. 63 – 66.

2. Беловошин, А.В. К вопросу о возможности создания огнетушащего порошка, способного к теплоизоляции нагретых поверхностей / А.В. Беловошин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: науч. журн. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. – № 4. – С. 35 – 42.

Belovoshin, A.V. *K voprosu o vozmozhnosti sozdaniya ognetushashchego poroshka, sposobnogo k teploizolyatsii nagretykh poverkhnostey* [On question of possibility of creation of a dry chemical powder capable of heat insulation of heated surfaces]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya: nauch. zhurn.* [Fires and emergencies: prevention, elimination: scientific journal]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2010, no. 4, pp. 35 – 42.

3. Бобков, С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.

Bobkov, S.A., Baburin, A.V., Komrakov, P.V. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physical-chemical fundamentals of development and extinguishing fires]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2014, 210 p.

4. Рашоян, И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара / И.И. Рашоян. – Тольятти : Из-во ТГУ, 2013. – 107 с.

Rashoyan, I.I. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozhara* [Physical-chemical fundamentals of development and extinguishing a fire]. Togliatti, TGU Press, 2013, 107 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 19.08.2019

Darya Fyodorovna Balta, scientific associate; e-mail: balta_daria@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

OPTIMAL CONDITIONS OF EXTINGUISHING SOLID MATERIALS LIABLE TO SMOULDERING

Purpose. Determination of the optimal conditions of extinguishing the subclass A1 fires of solid combustible materials with dry chemical powders or dry powders combined with other fire-extinguishing agents.

Methodology. Analytical investigations of physical-chemical processes which progress during the interaction of the universal dry powder compositions with a heat source.

Results. The mechanism of termination of the latent smouldering combustion by the dry chemical powder fire-extinguishing compositions has been considered. The capability of the universal ABCE dry chemical powders to insulate a seat of fire has been determined. The model of extinguishing the subclass A1 fires of the solid combustible materials with the dry chemical powders or the dry powders combined with the fire-extinguishing agents with the cooling effect has been proposed. On the basis of the formula describing the cooling effect of the universal dry chemical powders, the expression for determination of the period of time needed for feeding the powder for cooling the heat source has been obtained.

Scientific novelty. The conditions for extinguishing the heat source of the solid combustible materials liable to smouldering with the dry chemical powders have been determined. These conditions take into account the sluggishness of the heat transfer by the dry chemical powder particles and the formation of the insulating polymer melt film on the surface of the solid combustible material.

Practical value. The application of the insulating effect of the fire-extinguishing dry chemical powders based on the ammonium phosphate (phosphor-ammonium) salts allows using them effectively for extinguishing the fires of the solid combustible materials liable to smouldering separately or combined with the fire-extinguishing agents with the cooling effect.

Keywords: smouldering combustion; dry chemical powder; ammonium phosphate (phosphor-ammonium) salts; melt film; insulation; cooling of a smouldering source; synergism.

УДК 622.281.74

Павел Сергеевич Дрипан, ст. преподаватель; e-mail: dripanps@mail.ru

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

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

УДАРНАЯ НАГРУЗКА ПРИ УСТАНОВКЕ АНКЕРА В ПОРОДНЫЙ МАССИВ

Цель. Получить зависимости для нагрузки и напряжений с учетом коэффициента динамичности при установке в породный массив горной выработки угольной шахты анкера большего диаметра, чем проходной шпур, для определения в дальнейшем параметров ударного устройства.

Методы. Статистический и теоретический методы исследований. Первый метод заключается в анализе состояния в отечественной угольной промышленности существующих способов и средств анкерного крепления породного массива горных выработок; нового его способа, сущность которого состоит в использовании анкера большего диаметра, чем проходной шпур, при его установке в породный массив и воздействии на него статической нагрузки; методов исследований напряженно-деформированного состояния системы «породный массив-анкер» с учетом волновых процессов, сопротивлений по длине, боковой поверхности и сил трения. Теоретический метод, использующий теорию удара.

Результаты. Получены зависимости для определения нагрузки и напряжений в анкере при его установке в породный массив горной выработки с учетом коэффициента динамичности.

Научная новизна. Впервые на основании теории удара по стержню определена динамическая нагрузка на анкер большего диаметра, чем шпур, при установке в породный массив, позволяющая определить его напряженное состояние, обеспечивающее прочность.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят выбрать параметры ударного устройства, обеспечить безопасное ведение горных работ, значительное снижение затрат при креплении породного массива, устойчивость и прочность выработок угольных шахт.

Ключевые слова: *горная выработка; породный массив; анкер; шпур; динамическая нагрузка; напряжение; устойчивость; прочность.*

Постановка проблемы. Интенсификация очистных работ, увеличение площади сечения выработок, постоянный рост глубины разработки привели к существенному ухудшению условий строительства и эксплуатации горных выработок. Большим резервом повышения эффективности работы шахт является совершенствование способов крепления и поддержания капитальных и подготовительных выработок, создание и широкое внедрение надежных и экономичных видов крепи. Перспективное направление в улучшении состояния выработок, как показывает опыт последних лет, связано с укреплением породного массива в окрестности выработки и использование его несущей способности с помощью анкерной крепи, которая обеспечивает сокращение трудоемкости работ по креплению,

снижение затрат, улучшение условий труда и значительное повышение технико-экономических показателей добычи угля.

Все большее распространение получает способ установки анкера с большим диаметром, чем диаметр шпура, под действием динамической нагрузки ударного устройства в виде пневматического отбойного молотка [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] приведены математические модели напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкер», в которой диаметр анкера принят большим, чем диаметр проходного шпура, с учетом волновых процессов, сопротивлений его сечению по длине и сил трения под действием ударной нагрузки, которая не определена как динамическая, что существенно уменьшает напряжения, возникающие в анкере.

Цель работы – получить зависимости для нагрузки и напряжений с учетом коэффициента динамичности при установке в породный массив анкера большего диаметра, чем проходного шпура для определения в дальнейшем параметров ударного устройства.

Результаты исследований. Ранее получены зависимости для исследования напряженного состояния анкерного крепления горного массива при действии на анкер статической нагрузки, то есть она медленно нарастает от нуля до своего максимального значения и сжимает анкер на $\delta_{ст}$ [3].

В нашем случае при осевом ударе скорость в очень короткий промежуток времени изменяется на конечное значение. Получающиеся при этом большие ускорения (замедления) приводят к возникновению значительных инерционных сил, действующих в направлении, противоположном направлению ускорений, то есть в направлении движения анкера.

При динамической нагрузке анкер испытывает сжатие $\delta_d > \delta_{ст}$:

$$\delta_{ст} = lmg/EF, \quad (1)$$

где l, m, g, E, F – длина, м, масса, кг, ускорение силы тяжести, m/c^2 , модуль упругости, МПа, площадь сечения анкера, m^2 , соответственно.

Изменение деформации при ударном действии нагрузки по сравнению с деформацией при статическом приложении той же нагрузки характеризуется коэффициентом динамичности

$$k_d = \delta_d/\delta_{ст}, \quad (2)$$

откуда динамическая деформация через статическую деформацию выражается зависимостью

$$\delta_d = k_d \delta_{ст}. \quad (3)$$

Учитывая линейную связь между напряжением и деформацией, различные модули упругости анкера и горных пород при статическом и ударном действии нагрузок, связь между статическим и динамическим напряжениями примет вид

$$\sigma_d = k_d \sigma_{ст}, \quad (4)$$

где

$$\sigma_{ст} = P / S. \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{ст}$ – напряжения, возникающие в анкере при сжатии силой, равной P ударного устройства, H .

Чтобы использовать формулу (4), необходимо определить коэффициент динамичности k_d . При этом будем исходить из общепринятого в теории удара допущения, что связь между усилиями и деформациями сохраняется одной и той же при статической и динамической нагрузках, то есть

$$\delta_{ст} = P_{ст} / c; \quad (6)$$

$$\delta_d = P_d / c, \quad (7)$$

где $P_{ст}$ – статическая нагрузка: $P_{ст} = P$, Н;

$c = EF/l$ – жесткость анкера, Н/м;

P_d – динамическая нагрузка, представляющая собой силу инерции ударного устройства в первый момент его соприкосновения с анкером, Н.

Изменение кинетической энергии ударного устройства численно равно работе, совершенной им при ударе и деформации анкера:

$$T = P(H + \delta_d), \quad (8)$$

где H – расстояние между ударным устройством и анкером, м.

Используя закон сохранения энергии и пренебрегая потерями энергии, вызываемыми местными пластическими деформациями при ударе анкера и пород горного массива, а также инерцией массы ударяемого анкера, можно записать

$$U_d = \frac{1}{2} P_d \delta_d = c \delta_d^2 / 2. \quad (9)$$

При равенстве этих энергий из выражений (8) и (9) следует

$$c \delta_d^2 / 2 = P(H + \delta_d). \quad (10)$$

Учитывая (6), уравнение (10) представим в виде

$$\delta_d^2 - 2\delta_{ст}\delta_d - 2\delta_{ст}H = 0,$$

откуда следует

$$\delta_d = \delta_{ст}\sqrt{\delta_{ст}^2 + 2\delta_{ст}H}. \quad (11)$$

Знак минус в этой формуле не соответствует физической сущности рассматриваемой задачи, поэтому следует сохранить знак плюс.

Представим формулу (11) в виде

$$\delta_d = \delta_{ст}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}}\right) \quad (12)$$

и получим выражение для коэффициента динамичности

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}}. \quad (13)$$

Имея в виду, что $H = v^2 / (2g)$ (v – скорость устройства в начале удара), коэффициент динамичности представим в виде

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\delta_{ст}}}, \quad (14)$$

а с учетом

$$\frac{2H}{\delta_{ст}} = \frac{PH}{\frac{1}{2}P\delta_{ст}} = \frac{T_0}{U_{ст}}$$

запишем его следующим образом:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{T_0}{U_{ст}}}, \quad (15)$$

где T_0 – кинетическая энергия ударного устройства к моменту воздействия на анкер;

$U_{ст}$ – потенциальная энергия деформации подвергающегося удару анкера, которая накапливается в нем при статическом действии силы, равной весу ударного устройства P , то есть

$$U_{ст} = \frac{1}{2}P\delta_{ст} = P^2/2c = P^2l/2EF. \quad (16)$$

Если $H=0$, то есть сила прикладывается внезапно, то согласно выражению (3) коэффициент динамичности $k_d = 2$. Если расстояние между ударным устройством и анкером H значительно больше $\delta_{ст}$, то определение коэффициента динамичности в выражениях под корнем вторым слагаемым по сравнению с единицей можно пренебречь. Тогда выражение (3) примет вид

$$k_d = 1 + \sqrt{\frac{2H}{\delta_{ст}}}. \quad (17)$$

Или, согласно формуле (15),

$$k_d = 1 + \sqrt{\frac{T_0}{U_{ст}}}. \quad (18)$$

С учетом выражения для коэффициента динамичности (13) напряжение при ударе на основании зависимости (14) примет вид

$$\sigma_d = k_d \sigma_{ст} = \sigma_{ст} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}} \right), \quad (19)$$

или

$$\sigma_d = \sigma_{ст} \left(1 + \sqrt{\frac{2H}{\delta_{ст}}} \right) = \frac{P}{F} + \sqrt{\frac{2PHE}{lF}}. \quad (20)$$

Аналогично определяем и усилие при ударе

$$P_d = \sigma_d F = P_{ст} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}} \right). \quad (21)$$

Приведенная приближенная теория расчета на удар имеет определенные пределы применения. Они обусловлены скоростью ударного устройства к моменту удара и жесткостью анкера, что выражается в формулах (13) или (15) отношением $\frac{2H}{\delta_{ст}}$ или $\frac{T_0}{U_{ст}}$. Так, если

$$\frac{2H}{\delta_{ст}} = \frac{T_0}{U_{ст}} \leq 100,$$

то ошибка расчета не превышает 10 %.

Из формулы (20) следует, что чем больше объем анкера, подвергающегося удару, тем меньше динамические напряжения, возникающие в нем, а чем больше модуль упругости его материала, тем они больше.

Таким образом, использование вышеприведенных зависимостей для определения нагрузки и напряжений с учетом коэффициента динамичности позволит в дальнейшем получить результаты исследований напряженно-деформированного состояния анкера при его установке в породный массив, параметры ударного устройства, обеспечивающие прочность и устойчивость горных выработок.

Выводы

1. Предложен способ установки в породный массив анкера большего диаметра, чем проходного шпура, с помощью динамической нагрузки ударного устройства.

2. Использование полученных зависимостей нагрузки и напряжений с учетом коэффициента динамичности позволит в дальнейшем провести их уточнения, определить параметры ударного устройства, обеспечивающие безопасность и снижение затрат при ведении работ, прочность и устойчивость горных выработок.

Список литературы / References

1. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск : Вильпо, 2010. – 372 с.

Bulat, A.F., Vinogradov, V.V. *Oporno-ankernoye krepneniye gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht* [The support roof bolting of mine workings of coal mines]. Dnepropetrovsk, Vil'po Publ., 2010, 372 p.

2. Дрипан, П.С. Математическая модель внедрения анкера в породный массив под нагрузкой / П.С. Дрипан. – Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 3(55). – С. 91 – 101.

Dripan, P.S. *Matematicheskaya model' vnedreniya ankera v porodnyy massiv pod nagruzkoy* [The mathematical model of penetration of an anchor into the massif under load]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2018, no. 3(55), pp. 91 – 100.

3. Дрипан, П.С. Оценка усилий запрессовки анкеров в горный массив / П.С. Дрипан, Я.В. Шажко, Н.И. Василенко // Физика и техника высоких давлений. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 91 – 94.

Dripan, P.S., Shazhko, Ya.V., Vasilenko, N.I. *Otsenka usiliy zapressovki ankerov v gornyy massiv* [Evaluation of press-fitting forces of the anchors into a rock massif]. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy – Physics and technology of high pressures*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 91 – 94.

Pavel Sergeyevich Dripan, senior lecturer; e-mail: dripanps@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“The Donetsk National Technical University”

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

IMPACT LOAD DURING SETTING AN ANCHOR INTO A ROCK MASSIF

Purpose. To obtain dependences for load and stresses with regard to the dynamic magnification factor during setting the anchor of a bigger diameter than the pass-through borehole into the rock massif of a mine working of a coal mine for further determination of parameters of a hammering device.

Methods. Statistical and theoretical methods of investigations. The first method consists of analysis of the state of existing methods and means of the rock massif anchor support of the mine workings in the domestic coal industry; of its new method which essence is in using the anchor of the bigger diameter than the pass-through borehole during its setting into the rock massif and the influence of the static load on it; of the methods of investigations of the deflected mode of the “rock-massif – anchor” system taking into account the wave processes, the frictional resistances, the lateral surface and the friction forces. The theoretical method that uses the theory of impact.

Results. The dependences have been obtained for determination of the load and stresses in the anchor during its setting into the rock massif of the mine working taking into account the dynamic magnification factor.

Scientific novelty. For the first time on the basis of the theory of impact on the bar the dynamic load on the anchor of the bigger diameter than the borehole has been determined enabling to detect its stressed state which ensures its strength.

Practical value. The results of the investigations will permit to select the parameters of the hammering device, to ensure the safe mine operations, considerable reduction in expenses for timbering the rock massif, stability and durability of the mine workings of the coal mines.

Keywords: mine working; rock massif; anchor; borehole; dynamic load; stress; stability; durability.

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [622.867-057:616-072.7]-519

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

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

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-49

КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОСПАСАТЕЛЯ ВО ВРЕМЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Цель. Определение возможности осуществления объективного контроля функционального состояния горноспасателя в сложных микроклиматических условиях.

Методика. Информационно-аналитические исследования технических возможностей портативных устройств определения, обработки и отображения цифровых значений основных физиологических функций организма.

Результаты. Установлены наиболее перспективные модели устройств, определяющих и регистрирующих показатели основных физиологических функций организма горноспасателя, таких как частота пульса и его вариабельность, артериальное давление, температура тела, а также устройств приема-передачи и обработки информации, способных функционировать в сложных микроклиматических условиях и не пригодной для дыхания среде.

Научная новизна. Осуществление объективного (инструментального) контроля функционального состояния горноспасателя в сложных микроклиматических условиях и не пригодной для дыхания среде с использованием малогабаритных устройств и передач данной информации медицинскому работнику, находящемуся на подземной базе с резервным отделением.

Практическая значимость. Внедрение системы объективного контроля функционального состояния горноспасателя позволит своевременно реагировать на ухудшение показателей основных физиологических функций организма и осуществить соответствующие меры по сохранению жизни и здоровья горноспасателей.

Ключевые слова: *аварийно-спасательные работы; микроклиматические условия; функциональное состояние; показатели физиологических функций организма; инструментальный контроль; смарт-браслет; дистанционный контроль.*

Постановка проблемы. Обеспечение безопасности, сохранение жизни и здоровья горноспасателей с соблюдением принципа оправданного риска – первоочередная задача при организации и выполнении аварийно-спасательных работ подразделениями ГВГСС МЧС ДНР.

Основная единица подразделений ГВГСС МЧС ДНР – отделение, которое способно выполнить конкретное локальное задание по разведке горных выработок аварийного участка в условиях не пригодной для дыхания среды, поиску, оказанию первой помощи и эвакуации пострадавшего

в выработку со свежей струей воздуха, а также по выполнению иных горноспасательных работ в не пригодной для дыхания среде.

Номинальный состав горноспасательного отделения – командир и четыре респираторщика. Исходя из этой численности определяют перечень минимального горноспасательного оснащения, необходимого для выполнения отделением оперативного задания.

В случае ухудшения состояния здоровья даже одного горноспасателя отделение обязано прекратить выполнение задания, оказать пострадавшему помощь, доложить об этом на подземную базу и немедленно эвакуировать пострадавшего из загазованной среды на подземную базу или в выработку со свежей струей воздуха в соответствии с требованиями Устава по организации и ведению горноспасательных работ ГВГСС МЧС ДНР.

Несвоевременность диагностирования изменений функционального состояния горноспасателя и достижения критических (пороговых) значений показателей отдельных физиологических функций может привести к значительному ухудшению состояния здоровья и более тяжелым последствиям.

На первый взгляд контроль состояния здоровья каждого горноспасателя осуществляется системно. Начинается он с объективного (инструментального) медицинского контроля основных показателей функционирования организма (температура тела, артериальное давление и частота пульса) работниками оперативно-медицинской службы подразделения при заступлении на смену (на дежурство). Возможность объективного медицинского контроля функционального состояния организма горноспасателя сохраняется в течение всей смены несения службы [1].

Кардинально меняется порядок контроля за функциональным состоянием организма горноспасателя с момента поступления сигнала тревоги и выезда дежурных отделений ГВГСС на ликвидацию аварии.

В этом случае контроль осуществляется субъективно. Во время подготовки к спуску в шахту, подготовки отделения к уходу в выработки с не пригодной для дыхания средой и с повышенной температурой информация о самочувствии и психоэмоциональном состоянии респираторщиков командир, возглавляющий отделение (или медработник ГВГСС, если он следует с отделением), получает в результате их устного опроса. Данный способ контроля предусмотрен документами, регламентирующими основы оперативных действий горноспасателей.

При этом, с одной стороны, латентные дисфункции организма остаются невыявленными, а с другой – ответ о нормальном самочувствии может быть недостоверным из-за опасения показаться слабым или малодушным. Неадекватная оценка функционального состояния даже одного горноспасателя,

вызванная отсутствием какого-либо объективного контроля, может привести к тяжелым последствиям для данного горноспасателя и для всего отделения.

В Донецкой Народной Республике отсутствуют аппаратура, законодательная и нормативная базы для осуществления обязательного непрерывного контроля функционального состояния горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ в условиях экстремального микроклимата.

Анализ последних исследований и публикаций. Серьезное внимание уделяют обеспечению безопасной жизнедеятельности человека при выполнении работ повышенной опасности и работ, в ходе выполнения которых возможно возникновение экстремальных или чрезвычайных ситуаций, а также ликвидации таких ситуаций, в том числе и в условиях опасной и вредной окружающей среды.

В ряде стран, в том числе в Российской Федерации и Соединенных Штатах Америки, решают глобальные задачи при активной поддержке государства. В Российской Федерации такие работы включают в перечень фундаментальных научно-исследовательских работ, которые финансируют из централизованных источников [2 – 8].

В ходе анализа публикаций установлено, что осуществление непрерывного объективного контроля функционального состояния человека во время выполнения работ повышенной опасности или в экстремальной ситуации возможно при наличии соответствующего малогабаритного и надежного устройства контроля показателей основных физиологических функций организма. Назначение устройства:

- контроль частоты пульса P , мин^{-1} , и его вариабельности;
- измерение артериального кровяного давления, мм рт. ст.;
- определение температуры тела, $^{\circ}\text{C}$;
- визуальное отображение информации по всем параметрам;
- возможность установки пороговых значений по каждому из измеряемых показателей;
- световое и звуковое оповещение при достижении пороговых значений по каждому из измеряемых показателей;
- обеспечение надежности крепления на определенных участках тела.

Цель исследования – определение возможности осуществления объективного контроля функционального состояния горноспасателя во время аварийно-спасательных работ в сложных микроклиматических условиях и обоснование технических и эргономических требований к устройствам, обеспечивающим указанный контроль.

Результаты исследований. Специфика аварийно-спасательных работ, которые выполняют горноспасательные отделения при ликвидации аварий и их последствий в угольных шахтах, обусловлена следующими вредными и опасными факторами:

- метанообильность угольных пластов и вмещающих пород, что может привести к загазованности горных выработок, образованию взрывоопасной метановоздушной смеси или не пригодной для дыхания среды;
- наличие в горных выработках и в шахтном воздухе опасной по взрывчатости угольной пыли;
- загазованность горных выработок продуктами горения или другими вредными и опасными газами;
- ограниченность пространства и стесненные условия на рабочем месте;
- повышенная температура в действующих горных выработках при влажности, близкой к 100 %;
- удаленность места работы от подземной базы и выработок с пригодной для дыхания средой (до 500 м и более);
- нарушение крепления горных выработок;
- возможность затопления горных выработок.

Учитывая условия, в которых горноспасатели ведут аварийно-спасательные работы, были определены требования к устройствам контроля показателей основных физиологических функций организма, которые в дополнение к вышеперечисленным функциям должны обладать следующими характеристиками:

- малые габариты и масса, не превышающая 100 г;
- надежность крепления на теле горноспасателя;
- взрывозащищенное искробезопасное исполнение POi;
- пылевлагозащита не ниже IP68 или IP67;
- ударопрочное исполнение;
- возможность сделать электрокардиограмму (желательно);
- функция запоминания результатов измерений, с временными метками по каждому из измеряемых показателей;
- возможность передачи информации (результатов измерений по каждому из измеряемых показателей) по беспроводным каналам связи (Wi-Fi, Bluetooth).

Как установлено в результате аналитических исследований, наиболее распространенные, удобные в пользовании и доступные по стоимости и возможности приобретения и в то же время удовлетворяющие требованиям к устройствам контроля показателей основных физиологических функций организма – «умные» часы и их разновидность – фитнес-браслет. Фитнес-браслет, по сравнению с «умными» часами, обладает более ограниченным объемом функциональных возможностей, но в то же время полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям. Измерение пульса в этих устройствах осуществляется с помощью фотодатчика высокого разрешения (HRS 3300C или аналогов). Измерение давления – с использованием технологии неинвазивного скринингового метода – фотоплетизмографии путем математического анализа данных о скорости распространения пульсовой волны, длине волны и частоте

пульса. Зависимость между амплитудой пульсовой волны и артериальным давлением устанавливается по методу Марея. Учитывая технические характеристики отдельных фитнес-браслетов, удовлетворяющие установленным требованиям к устройствам контроля показателей основных физиологических функций организма, а также специфику их применения, предложено именовать данное устройство – смарт-браслет. Программное обеспечение смарт-браслетов учитывает данные о частоте пульса, скорости распространения пульсовой волны и другие показатели, а затем совмещает их с предварительно введенными физиологическими характеристиками (пол, масса, возраст, среднее значение пульса, давления). В результате программного анализа результаты выводятся на экран смарт-браслета и передаются на устройство обработки информации командира, возглавляющего отделение, по беспроводному каналу связи Wi-Fi или Bluetooth.

Устройство обработки информации представляет собой аппаратно-программный комплекс со специальным программным обеспечением, с помощью которого параметры вышеуказанных физиологических показателей сравниваются с установленными пороговыми значениями по каждому показателю. Текущее значение контролируемых физиологических показателей отображается на встроенном мониторе устройства обработки информации с заданной периодичностью. В случае достижения контролируемого физиологического показателя пороговому значению или превышения его устройство выдает пользователю и руководителю (контролеру) звуковой и/или световой сигнал и отображает на дисплее цифровое значение показателя. В качестве устройства обработки информации можно использовать смартфон во взрывозащищенном искробезопасном исполнении POi и пылевлагозащитном исполнении не ниже IP67, коммутированный со всеми смарт-браслетами отделения по беспроводному каналу связи Wi-Fi или Bluetooth.

Для более объективного контроля функционирования организма горноспасателя рекомендовано создать базу данных функционального состояния организма всего основного личного состава подразделений ГВГСС МЧС ДНР. В базе данных должны быть отражены значения контролируемых параметров организма, измеренные инструментальным способом в состоянии покоя, при выполнении работы средней тяжести, при выполнении тяжелой работы, при ведении работ в зоне повышенных температур, а также возраст, рост и масса. На основании полученных данных для каждого параметра рекомендовано определить пороговые значения, которые будут индивидуальными для отдельно взятого горноспасателя. Наиболее оптимальным итогом научно обоснованной аналитической обработки данных о каждом горноспасателе будет определение условного интегрального показателя функционального состояния организма. Создание электронной базы данных о каждом горноспасателе следует выполнять при проведении плановых медицинских осмотров, выполнении упражнений в респираторах, определении тепловой устойчивости в тепловой камере и внеплановых обследованиях оперативно-медицинской службой ГВГСС

с участием специалистов НИИГД «Респиратор». Каждому горноспасателю в базе данных будет присвоен уникальный идентификационный номер. Постоянное пополнение базы данных позволит контролировать не только реакцию организма при выполнении аварийно-спасательных работ, но и изменение функционального состояния горноспасателя в течение всего срока службы в ГВГСС.

Возможно два вида объективного контроля функционального состояния горноспасателей.

1. Оперативный контроль на месте ведения аварийно-спасательных работ осуществляется (рис. 1):

- горноспасателем самостоятельно (самоконтроль) путем реагирования на звуковые и/или световые сигналы индивидуального смарт-браслета. Указанные сигналы с индикацией соответствующего измеряемого параметра и его фактического значения подаются смарт-браслетом в случае превышения установленного порогового значения;
- командиром, возглавляющим отделение (и/или медработником ГВГСС, если он следует с отделением), по информации, поступающей на смартфон, а также в случае звукового и/или светового сигнала индивидуального смарт-браслета.

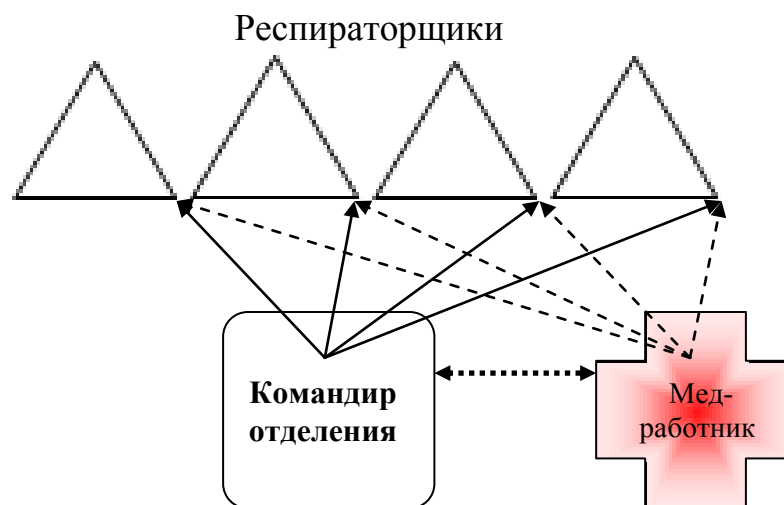


Рис. 1. Оперативный контроль функционального состояния

2. Дистанционный контроль, осуществляемый на подземной базе медработником ГВГСС по монитору персонального компьютера или другого аналогичного устройства с установленным соответствующим программным обеспечением. Данные на персональный компьютер передаются по линии проводной связи в цифровом виде и выводятся на дисплей в виде цифровых значений, графиков с указанием установленных пороговых значений по каждому измеряемому параметру (рис. 2).

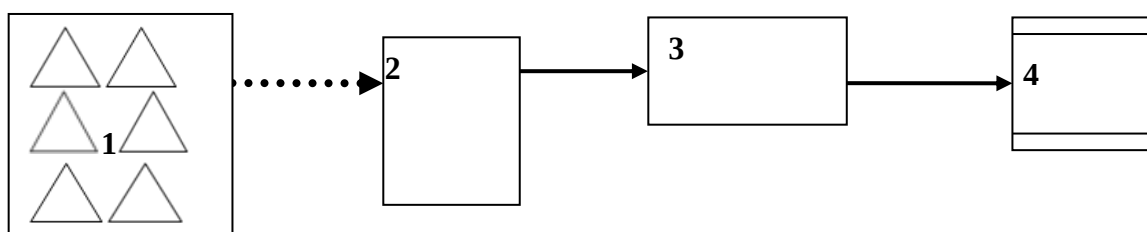


Рис. 2. Дистанционный контроль функционального состояния:

- 1 – отделение горноспасателей в не пригодной для дыхания среде;
 2 – устройство обработки информации (смартфон командира отделения);
 3 – усилитель сигнала; 4 – удаленный сервер (персональный компьютер);
➤ – беспроводная передача сигнала (Wi-Fi, Bluetooth);
 —————➤ – линия проводной связи

Выводы

1. Сформулированы требования к организации контроля показателей основных физиологических функций организма и устройству обработки информации, обеспечивающие возможность их применения во время аварийно-спасательных работ в сложных микроклиматических условиях.

2. Предложен тип индивидуального устройства контроля показателей основных физиологических функций организма – смарт-браслет GSMIN WP60 с функциями пульсометра (контроль частоты пульса) и тонометра (контроль артериального давления). Класс пылевлагозащиты – IP67.

3. Предложены методы объективного контроля, позволяющие повысить достоверность оценки функционального состояния горноспасателей и обеспечить своевременность оказания первой доврачебной помощи, – оперативный и дистанционный.

Список литературы / References

1. Пособие для медицинских работников МЧС / под ред. Э.Я. Фисталя, В.В. Черкасова. – Донецк, 2016. – 350 с.

Fistal', E.Ya., Cherkasov, V.V. (eds.). *Posobiye dlya meditsinskikh rabotnikov MChS* [Manual for medical workers of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters]. Donetsk, 2016, 350 p.

2. Марков, Г.С. Телеметрическая система оперативного контроля состояния (ТСКС) пожарного, спасателя, водителя транспортного средства и других работников во время тушения пожара, проведения аварийно-спасательных работ и в других чрезвычайных ситуациях / Г.С. Марков, В.М. Шахнарович // Технологии обеспечения комплексной безопасности, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций – проблемы, перспективы, инновации: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – С. 366 – 368.

Markov, G.S., Shakhnarovich, V.M. *Telemetricheskaya sistema operativnogo kontrolya sostoyaniya (TSKS) pozhnogo, spsatelya, voditelya transportnogo sredstva i drugikh rabotnikov vo vremya tusheniya pozhara, provedeniya avariynospasatel'nykh rabot i v drugikh chrezvychaynykh situatsiyakh* [Telemetric system of on-line monitoring of a state of a fire-fighter, a rescuer, a driver of a transport vehicle and other workers during extinguishing a fire, carrying out emergency-rescue operations and in other emergency situations]. *Tekhnologii obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti, zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy – problemy, perspektivy, innovatsii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technologies of ensuring integrated safety, protection of population and territories against emergencies – problems, prospects, innovations: materials of the 16th International scientific and practical conference]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2011, pp. 366 – 368.

3. Потапов, А.И. Приборы и системы контроля и мониторинга физиологического состояния спасателя при чрезвычайных ситуациях / А.И. Потапов, И.А. Потапов, Б.В. Самойлов // Природные и техногенные риски: Физико-математические и прикладные аспекты: науч.-аналит. журн. – 2012. – № 2. – С. 8 – 12.

Potapov, A.I., Potapov, I.A., Samoylov, B.V. *Priboroy i sistemy kontrolya i monitoringa fiziologicheskogo sostoyaniya spsatelya pri chrezvychaynykh situatsiyakh* [Devices and control and monitoring systems of a rescuer's physiological state in emergency situations]. *Prirodnyye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty: nauch.-analit. zhurn. – Natural and technology-related risks (physico-mathematical and applied aspects): scientific and analytical journal*, 2012, no. 2, pp. 8 – 12.

4. Синютин, С.А. Двухкомпонентный датчик для оценки психофизиологического состояния спасателя при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / С.А. Синютин, Е.С. Семенистая, А.В. Леонова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 9. – С. 180 – 185.

Sinyutin, S.A., Semenistaya, Ye.S., Leonova, A.V. *Dvukhkomponentnyy datchik dlya otsenki psikhofiziologicheskogo sostoyaniya spsatelya pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy* [Two-component sensor for evaluation of a rescuer's psychophysiological state during elimination of consequences of emergency situations]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki – Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2013, no. 9, pp. 180 – 185.

5. Friedl, K.E. Military applications of soldier physiological monitoring. *Journal of science and medicine in sport*, 2018, vol. 21, issue 11, pp. 1147–1153.

6. Friedl, K.E., Buller, M.J., Tharion, W.J., Potter, A.W. Potter, Manglapus, G.L., Hoyt, R.W. Real time physiological status monitoring (RT-PSM): accomplishments, requirements and research roadmap. Technical Note NO. TN16-2, USARIEM, March, 2016, 58 p.

7. Pandian, P.S., Mohanavelu, K., Safeer, K.P., Kotresh, T.M., Shakunthala, D.T., Gopal, P., Padaki, V.C. Smart Vest: wearable multi-parameter remote

physiological monitoring system. *Medical Engineering and Physics*, 2008, vol. 30, issue 4, pp. 466 – 477.

8. An, B.W., Shin, J.H., Kim, S.-Y., Kim, J., Ji, S., Park, J., Lee, Y., Jang, J., Park, Y.-G., Cho, E., Jo, S., Park, J.-U. Smart sensor systems for wearable electronic devices. *Polymers*, 2017, vol. 9, issue 8, pp. 1 – 40.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 13.06.2019

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

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

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

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-49

MONITORING OF A FUNCTIONAL STATE OF A MINE RESCUER DURING EMERGENCY-RESCUE OPERATIONS

Purpose. Determination of a possibility of implementation of the objective monitoring of the mine rescuer’s functional state in the difficult microclimate conditions.

Methodology. Informational and analytical investigations of the technical possibilities of the portable devices for determination, processing and display of the digital values of the basic physiological body functions.

Results. The most promising models of the devices which determine and register the indices of the basic physiological functions of the organism of the mine rescuer such as pulse rate and its variability, blood pressure, body temperature, as well as the full duplex devices and devices for processing the information which are capable to function under the difficult microclimate conditions and in the irrespirable environment have been determined.

Scientific novelty. Execution of the objective (instrumental) monitoring of the mine rescuer’s functional state in the difficult microclimate conditions and irrespirable environment with the use of the compact devices and transmission of this information to a medical worker being present at the underground base with a reserve squad.

Practical value. The implementation of the objective monitoring system of the mine rescuer’s functional state will permit to respond timely to worsening of the indices of the basic physiological functions of the organism and to take corresponding measures aimed at saving the mine rescuers’ life and health.

Keywords: emergency-rescue operations; microclimate conditions; functional state; indices of physiological functions of the organism; instrumental monitoring; smart-wristband; remote monitoring.

УДК 620.168.32:544.723-033.22

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: oszd_niigd_1@mail.ru;

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

Александр Витальевич Чапкович, гл. инж.; e-mail: majsept@mail.ru;

Владимир Леонидович Котляров, слесарь-ремонтник; e-mail: oldvovan@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*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ТВЕРДЫХ СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Повысить эффективность фракционного анализа химического известкового поглотителя ХП-И благодаря применению механического сита с автоматическим контролем времени рассеивания.

Методика. Аналитические методы исследования работы электромеханических устройств.

Результаты. Проведенные исследования позволили повысить достоверность фракционного анализа благодаря применению изготовленного механического сита для просеивания химического известкового поглотителя.

Новизна. Разработаны электрическая и кинематическая схемы механического сита, влияющие на параметры просеивания химического известкового поглотителя, который необходим для работы респиратора Р-30.

Практическая значимость. Повышение качества химического известкового поглотителя ХП-И благодаря применению механического сита при проведении фракционного анализа.

Ключевые слова: установка для просеивания; механическое сито; химический поглотитель известковый; кинематическая схема; электрическая схема; фракционный состав.

Постановка проблемы. В настоящее время на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР находятся респираторы со сжатым кислородом Р-30. Регенеративный патрон респираторов снаряжён химическим поглотителем известковым (ХП-И). При определении качества ХП-И один из важных показателей – фракционный состав. В поглотителе массовая доля фракции 2,80...5,50 мм должна составлять не менее 90,0 %, доля других фракций также нормируется. В случае отклонения фракционного состава поглотителя от регламентированного ГОСТом возникает несоответствие сопротивления дыханию нормируемым значениям. Если регламентируемое значение превышает массовая доля мелких фракций, сопротивление дыханию увеличивается до значений, не приемлемых для пользователя, если увеличена доля крупных фракций, происходит «проскок» диоксида углерода по воздушным промежуткам между гранулами. Для контроля фракционного состава необходимо применение механического сита для просеивания поглотителя.

Анализ последних исследований. Установки для просеивания могут иметь плоские или цилиндрические сита. Плоские сита совершают возвратно-поступательное, круговое или вибрационное движения, а цилиндрические – вращательное движение [1].

Вследствие движения и наклона сита (короба) материал, загружаемый в головную его часть, продвигается к разгрузочному концу. При этом он расслаивается, и мелкая фракция просеивается через отверстия сита.

Установки с наклонным и горизонтальным ситом сообщают своим ситам возвратно-поступательное движение. Сито установки с однокривошипным грохотом совершает сложное движение: верхняя часть корпуса – круговые движения, а нижняя, поддерживаемая шарнирными подвесками, – прямолинейные движения.

Другой тип установок для просеивания – самобалансирующиеся, их подразделяют на две группы: с жестким приводным валом (веретеном) (рис. 1) и безверетенные с постоянным статическим моментом дебаланса (рис. 2) [2, 3].

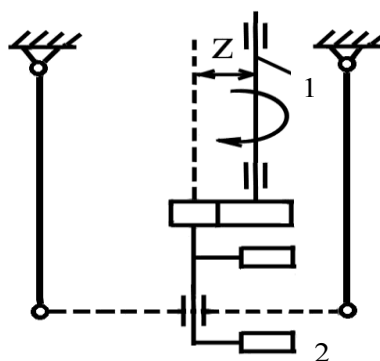


Рис. 1. Кинематическая схема самобалансирующейся установки для просеивания с жестким приводным валом (веретеном):
1 – веретено; 2 – уравнивающие грузы; Z – эксцентриситет

В безверетенных установках для просеивания [4] частицы продукта, загружаемого в бункер рабочей камеры, продвигаются через сито за счет вибрации, создаваемой электродвигателем, на валу которого установлены грузы – дебалансы. Для совершения колебаний рабочая камера устанавливается на основание просеивателя с помощью пружин – амортизаторов. К днищу рабочей камеры приварена шпилька с резьбой и гайкой, с помощью которой регулируют натяжение сита. Просеянный продукт удаляется через разгрузочный лоток, находящийся в приемной части рабочей камеры под ситом.

Однако имеющиеся установки не обеспечивают необходимых параметров просеивания, имеют высокую стоимость и сложны в эксплуатации из-за

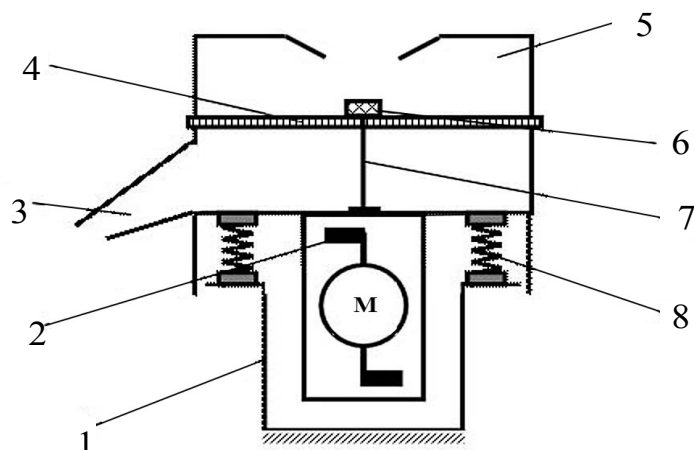


Рис. 2. Кинематическая схема вибрационной установки для просеивания:

1 – основание; 2 – дебалансы; 3 – разгрузочный лоток; 4 – сито;
5 – бункер рабочей камеры; 6 – гайка; 7 – шпилька; 8 – амортизатор

необходимости подбора и настройки режима работы, а ручное рассеивание поглотителя не обеспечивает достаточной точности из-за трудности поддержания необходимых амплитуды, частоты и времени рассеивания. Поэтому разработка установки для рассеивания актуальна.

Цель работы. Повысить эффективность фракционного анализа химического известкового поглотителя ХП-И благодаря применению механического сита с автоматическим контролем времени рассеивания.

Результаты исследований. За основу кинематической схемы установки для просеивания взят кривошипно-шатунный механизм коромыслового типа [5] (рис. 3).

В конструкции установки (рис. 4) в качестве приводного применен асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором АИР56А4У3, питающийся от трехфазной сети переменного тока, напряжением 380 В, ток потребления 0,44А, с частотой вращения вала 1350 мин^{-1} , работающий в режиме S1. Исполнение IP44S, класс изоляции В.

Для передачи крутящего момента от вала горизонтально расположенного электродвигателя валу установки, расположенному вертикально, и для обеспечения требуемой частоты колебаний сит $(150 \pm 3) \text{ мин}^{-1}$ применен червячный редуктор. Передаточное отношение u выбрано равным 9. Передаточное отношение определено из выражения [6]

$$u = Z_1 / Z_2, \quad (1)$$

где Z_1 – количество витков (заходов) червяка;
 Z_2 – количество зубьев червячного колеса.

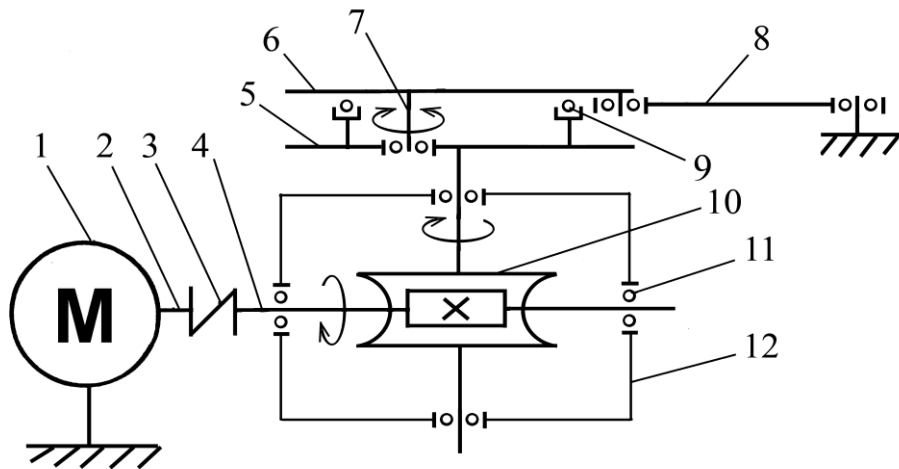


Рис. 3. Кинематическая схема механического сита:

1 – электродвигатель; 2 – выходной вал электродвигателя; 3 – муфта упругая втулочно-пальцевая; 4 – входной участок ведущего вала; 5 – нижний диск (кривошип); 6 – колебательный стол (шатун); 7 – ось, соединяющая нижний диск и колебательный стол; 8 – коромысло; 9 – шариковая опора; 10 – червячная передача; 11 – подшипник; 12 – корпус редуктора



Рис. 4. Общий вид механического сита

При определении качества механического известкового поглотителя ХП-И для его разделения на фракции используют четыре круглых сита, имеющих отверстия различного диаметра (1,00; 2,80; 5,50; 6,50 мм) и устанавливаемых одно над другим на колебательном столе установки. В процессе колебаний стола гранулы ХП-И просыпаются в отверстия сит (от больших к меньшим) и делятся на фракции. Сита с диаметрами отверстий 2,80; 5,50; 6,50 мм изготовлены методом просечки.

Для защиты элементов электрической схемы от короткого замыкания используют трехполюсный автоматический выключатель АВ1 типа ВА-1-63 с током отсечки 10 А. Для защиты электрического двигателя от перегрузки используют термическое реле ТР типа РТТ-111 с диапазоном регулирования тока 0,68...0,92 А. Схема управления работой установки выполнена релейной, с электропитанием переменным напряжением 24 В (рис. 5). Для понижения напряжения применен трансформатор ТР-1 типа ОСМ1-0,16У3. Включение электродвигателя производится с помощью реле (трехполюсного пускателя) типа ПМЛ-11000м45, с током коммутации 10 А. Требуемое время цикла просеивания [1] выдерживается с помощью вакуумного реле времени РВП-72-3121-00УХК4, которое состоит из пневматической приставки выдержки времени, имеющей контакты с временной задержкой, и электромагнитного привода, собранных на общем основании. В качестве коммутирующих контактов в реле применено контактное устройство.

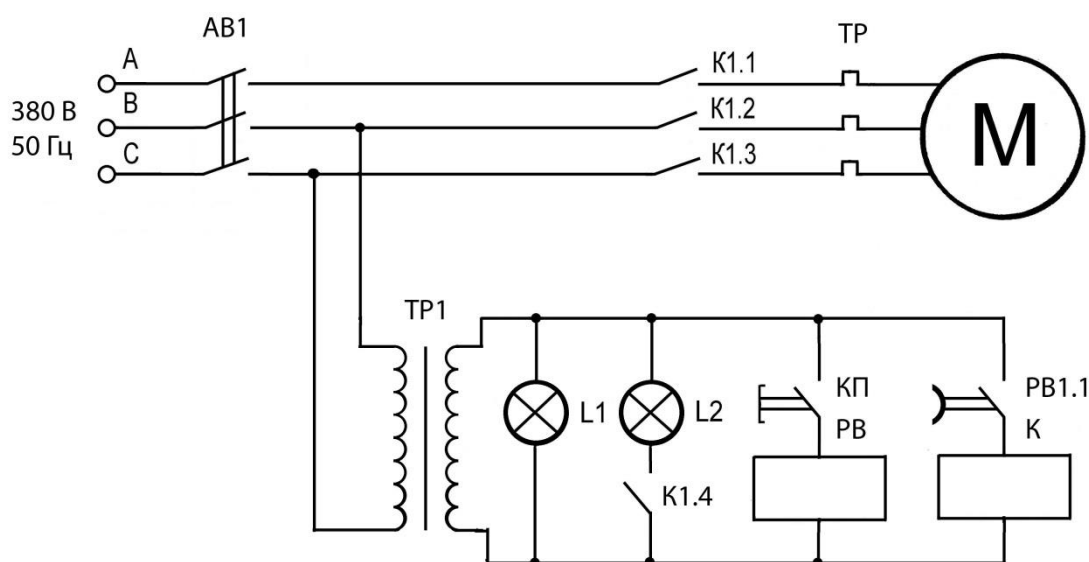


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема механического сита: АВ1 – автоматический выключатель; ТР – термореле; ТР1 – понижающий трансформатор; L1 – лампа «Сеть»; L2 – лампа «Работа»; КП – кнопка «Пуск»; РВ – реле времени; К – реле включения электрического двигателя

Реле обеспечивает диапазон регулируемой выдержки времени 0,4...180 с. Номинальный ток исполнительных контактов 16 А. Катушка примененной модификации реле рассчитана на номинальное напряжение 24 В переменного тока частотой 50 и 60 Гц. Допустимые колебания напряжения сети от 0,85 до 1,10 от номинального значения. Катушка реле рассчитана на работу в продолжительном режиме (ПВ = 100 %), а также повторно в кратковременном режиме (ПВ = 40 %) с максимальной частотой 1200 ч⁻¹ [7].

Схема установки обеспечивает индикацию наличия напряжения (индикаторная лампа L1 «Сеть») и индикацию начала (окончания) рабочего цикла (индикаторная лампа L2 «Работа»). Для защиты людей от поражения электрическим током в конструкции установки выполнены требования Правил устройства электроустановок.

Разработанная электрическая схема установки имеет упрощенную конструкцию, не требующую дополнительных настроек. Особенностью разработанной схемы является применение реле времени вакуумного типа, что значительно упрощает конструкцию и повышает безотказность работы установки (см. таблицу).

Технические характеристики механического сита

Параметр	Значение
Потребляемая электрическая мощность, кВт	0,12
Время рассеивания, с	60
Частота колебаний сит, мин ⁻¹	150 ± 3
Диаметр отверстий сит, применяемых для рассеивания ХП-И, мм	6,5 ± 0,110; 5,5 ± 0,090; 2,8 ± 0,070; 1,0 ± 0,070

Выводы. Проведенные исследования позволили разработать и изготовить электромеханическую установку с техническими параметрами, регламентированными ГОСТом, что обеспечивает большую эффективность фракционного анализа гранул химического известкового поглотителя ХП-И.

Список литературы / References

1. Плоские качающиеся грохоты [Электронный ресурс]. URL: https://studwood.ru/1597480/tovarovedenie/ploskie_kachayuschiesya_grohoty (дата обращения: 27.05.2019).

Ploskiye kachayushchiesya grokhoty [Elektronnyy resurs] [Flat shaker screens] (Electronic resource). Available at: https://studwood.ru/1597480/tovarovedenie/ploskie_kachayuschiesya_grohoty (accessed: 27.05.2019).

2. Конструкции рассевов [Электронный ресурс]. URL: <https://mppnik.ru/publ/542-konstrukcii-rassevov.html> (дата обращения: 11.07.2019).

Konstruktsii rassevov [Elektronnyy resurs] [Constructions of screenings] (Electronic resource). Available at: <https://mppnik.ru/publ/542-konstrukcii-rassevov.html> (accessed: 11.07.2019).

3. Исследование процессов разделения неоднородных пищевых продуктов [Электронный ресурс]. URL: <https://megalektsii.ru/s31630t7.html> (дата обращения: 27.05.2019).

Issledovaniye protsessov razdeleniya neodnorodnykh pishchevykh produktov [Elektronnyy resurs] [Investigation of processes of inheterogeneous food separation] (Electronic resource). Available at: <https://megalektsii.ru/s31630t7.html> (accessed: 27.05.2019).

4. Просеиватели и их классификация [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/14_3620_proseivateli-i-ih-klassifikatsiya.html (дата обращения: 11.07.2019).

Proseivateli i ikh klassifikatsiya [Elektronnyy resurs] [Sifting machines and their classification] (Electronic resource). Available at: https://studopedia.ru/14_3620_proseivateli-i-ih-klassifikatsiya.html (accessed: 11.07.2019).

5. Гурин, В.В. Механика / В.В. Гурин, В.М. Замятин, А.М. Попов. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 581 с.

Gurin, V.V., Zamyatin, V.M., Popov, A.M. *Mekhanika* [Mechanics]. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo un-ta Press, 2010, 581 p.

6. Теоретическая механика / Сост. Н.А. Воронович, М.А. Осипенко, Р.М. Подгаец. – Пермь : Пермский гос. техн. ун-т, 2006. – 138 с.

Voronovich, N.A., Osipenko, M.A., Podgayets, R.M. (authors). *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical mechanics]. Perm, Permskiy gos. tekhn. un-t Press, 2006, 138 p.

7. Реле времени пневматическое РВП-72 [Электронный ресурс]. URL: <https://eandc.ru/pdf/rele/rvp72.pdf> (дата обращения: 11.07.2019).

Rele vremeni pnevmaticheskoye РВП-72 [Elektronnyy resurs] [The РВП-72 pneumatic time-delay unit] (Electronic resource). Available at: <https://eandc.ru/pdf/rele/rvp72.pdf> (accessed: 11.07.2019).

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: oszd_niigd_1@mail.ru;

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

Aleksandr Vitalyevich Chapkovich, engineering manager; e-mail: emajsept@mail.ru;

Vladimir Leonidovich Kotlyarov, maintenance man; e-mail: oldvovan@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

EFFECTIVENESS OF THE FRACTIONAL ANALYSIS DURING SEPARATION OF SOLID GRANULAR SUBSTANCES

Purpose. To improve effectiveness of the fractional analysis of the XII-II chemical lime absorbent due to the use of a bolting screening machine with the automatic time control of sieving.

Methodology. Analytical investigation methods of the operation of electromechanical devices.

Results. The conducted investigations have permitted to improve the accuracy of the fractional analysis due to the use of the manufactured screening machine for sieving the chemical lime absorbent.

Scientific novelty. The electric circuit and kinematic arrangement of the screening machine have been developed which influence the parameters of sieving of the chemical lime absorbent that is essential for the operation of the P-30 breathing apparatus.

Practical value. Improvement of the quality of the XII-II chemical lime absorbent due to the use of the screening machine during conducting the fractional analysis.

Keywords: *sieving installation; screening machine; chemical lime absorbent; kinematic arrangement; electric circuit; fractional composition.*

УДК [622.822.22:622.693.26]:[536.5:504.5]

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: zinstar@mail.ru;

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

Виктория Викторовна Волынец, инж.; e-mail: volynetsvika@mail.ua

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81

СВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОРОДНОГО ОТВАЛА И КОЛИЧЕСТВОМ ВЫДЕЛЯЕМЫХ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Прогноз количества вредных веществ, поступающих в окружающую атмосферу в зависимости от температуры внутри породного отвала.

Методика. Установление аналитических зависимостей количества выделяющихся вредных веществ от термодеструкции породной массы отвалов.

Результаты. Рассмотрены процессы термодеструкции в породном отвале. Предложена математическая модель выделения вредных веществ из породного отвала в атмосферу в зависимости от температуры угля и пирита. Получены аналитические зависимости вредных веществ от температуры для дальнейшей оценки концентрации пожарных газов.

Научная новизна. Предложена аналитическая зависимость, полностью отражающая физический процесс термодеструкции материала и выделения вредных веществ.

Практическое значение. Полученные результаты исследований позволят прогнозировать выбросы и количество поступающих в атмосферу вредных газов в промежутках между натурными наблюдениями.

Ключевые слова: породный отвал; термодеструкция; горение; аналитическая зависимость; вредные вещества; концентрации; температура.

Постановка проблемы. Непосредственные измерения количества выделяющихся вредных веществ при горении породных отвалов представляют собой трудоёмкую работу, которая при этом может быть выполнена один – два раза в год. Вместе с тем термогазовое состояние породных отвалов – это динамический процесс, зависящий от многих внешних и внутренних факторов, таких как время года, атмосферные осадки, направление и сила ветра, неравномерное распределение горючих материалов в породном отвале, фракционный состав пород, перемещение зон горения по мере выгорания угля и т.д.

Установлена зависимость количества выделяющихся вредных газов от температуры, которая представлена в табличном виде. Однако табличные данные не дают возможности использовать промежуточные значения и выйти за указанный диапазон температур. В результате обработки табличных данных получены линейные расчётные зависимости количеств выделяемых вредных веществ от температуры.

Расчётные и табличные данные практически совпадают друг с другом.

Однако, как показали последние экспериментальные исследования в лабораторных условиях и на породных отвалах, не существует линейной зависимости между температурой внутри породного отвала и количеством выделяемых в атмосферу вредных веществ. Установлено, что при температуре до 200...250 °С выделения вредных веществ почти не обнаружено.

Анализ последних исследований. Несмотря на наличие методик расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ [1–3] и наличие современных способов определения поля температур тепловизорами [2], требуется глубокое изучение протекающих в породных отвалах тепломассообменных процессов для точного прогноза выделений вредных веществ в атмосферу и разработка мероприятий по уменьшению их выделения.

Цель исследований. Прогноз количества вредных веществ, поступающих в окружающую атмосферу в зависимости от температуры внутри породного отвала.

Материалы исследований. Все процессы теплогазообмена при пожарах необходимо начинать с рассмотрения процесса термодеструкции твёрдого горючего вещества. Так, считается, что изменение массы твердого вещества при пиролизе пропорционально самой массе:

$$\frac{dM}{d\tau} = -kM, \quad (1)$$

где M – масса твёрдого вещества, кг/м³;

k – константа скорости реакции при термодеструкции, с⁻¹;

τ – время, с.

Константу скорости реакции в зависимости от температуры выражают соотношением Аррениуса

$$k = A \exp(-E_A / RT), \quad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E_A – энергия активации, Дж/моль;

R – газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К·моль);

T – температура, К.

Подставляя выражение для константы скорости реакции в уравнение (1), получим

$$\frac{dM}{d\tau} = -AM \exp(-E_A / RT). \quad (3)$$

Такой подход дает возможность выразить зависимость процесса термодеструкции от температуры. Так, полагая отмеченную ранее температуру,

равной $T = T_n = 400 + 273 = 673$ К и интегрируя уравнение (3) при постоянной температуре, получим

$$M = M_0 \exp[-A \exp(-E_A / R(\tau + 273))]. \quad (4)$$

где M_0 – первоначальная масса горючего материала, кг/м³.

На рис. 1 приведена зависимость термодеструкции твёрдого вещества от температуры при фиксированном времени полураспада, равном 30 мин.

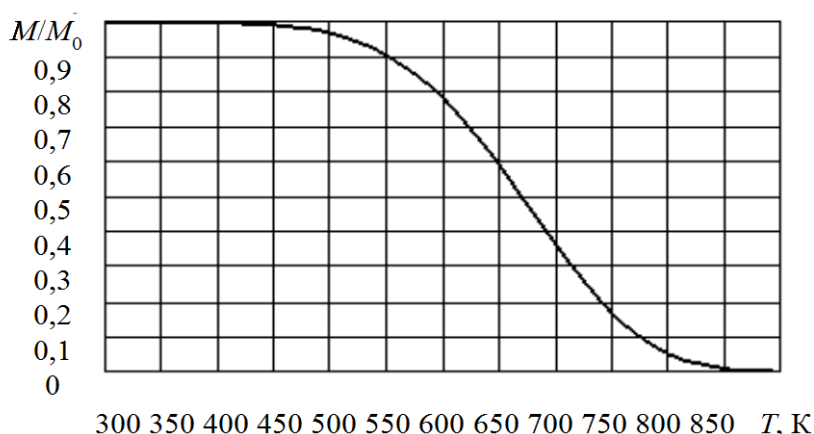


Рис. 1. Зависимость массы твёрдого вещества от температуры при фиксированном времени полураспада при термодеструкции

Для расчёта количества выбрасываемых в атмосферу вредных веществ используем аналогично (1) дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dX}{d\tau} = k(X_1 - X), \quad (5)$$

где X – концентрация какого-либо вредного вещества, попадающего в атмосферу, кг/м³;

X_1 – ожидаемая максимальная концентрация какого-либо вредного вещества, попадающего в атмосферу, кг/м³.

Начальным условием для уравнения (5) примем отсутствие в атмосфере данного вредного вещества $X(0) = 0$. Решение уравнения (5) имеет вид

$$X = X_1[1 - \exp(-k\tau)]. \quad (6)$$

Подставляя формулу (9) в решение (6), получим

$$X = X_1 \{1 - \exp[-A \exp(-E_A / R(\tau + 273))]\}. \quad (7)$$

Это дает возможность выразить зависимость количества выделяемого в атмосферу вредного вещества от температуры.

На рис. 2 приведена зависимость количества выделяемого вредного вещества от температуры при фиксированном времени полураспада, равном 30 мин.

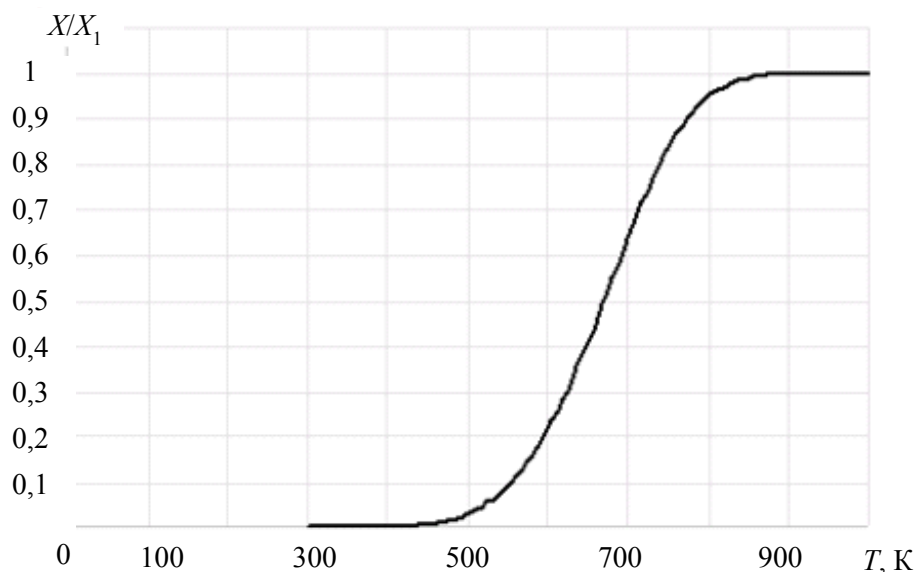


Рис. 2. Зависимость количества выделяемого вредного вещества от температуры при фиксированном времени полураспада при термодеструкции

Из анализа полученной зависимости (рис. 2) следует, что при температуре до 200 °С по сути отсутствует выделение вредных веществ, а при температуре 600 °С через 30 мин количество вредных веществ становится максимальным. Входящие в формулу (7) константы должны быть установлены путем экспериментальных исследований.

Это дает возможность в дальнейшем по температуре тлеющего или горящего породного отвала более точно прогнозировать количество выбрасываемых вредных веществ в атмосферу.

Выводы. Получена аналитическая зависимость массы твердого вещества от температуры при термодеструкции и фиксированном времени полураспада. Из анализа полученной зависимости следует, что при температуре до 200 °С термодеструкция практически отсутствует, а при температуре 600 °С через 30 мин все твердое вещество разлагается и постепенно переходит в газообразное состояние. Таким образом, первоначально до 200 °С объемная доля кислорода в воздухе не будет меняться.

Изучая с помощью тепловизора температуру горения породного отвала, можно научно обоснованно прогнозировать выбросы и количество поступающих в атмосферу вредных газов в промежутках между натурными наблюдениями.

Список литературы / References

1. Греков, С.П. Тепломассообменные процессы в самовоспламеняющихся газоотдающих двухфазных средах / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. Вып. 2(22). – Херсон : ХНТУ, 2005. – С. 124 – 133.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. *Teplomassoobmennyye protsessy v samovosplamenyayushchikhsya gazootdayushchikh dvukhfaznykh sredakh* [Heat mass exchange processes in self-inflammable gas-discharging two-phase media]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kherson National Technical University], 2005, issue 2(22), Kherson, KhNTU Press, pp. 124 – 133.

2. Исследование вредных выбросов породных отвалов и разработка их научно-технических нормативов / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, О.П. Пашковский // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнськ. наук.-техніч. журн. гірничого профілю. – Донецьк : ДВНЗ «ДОННТУ», 2008. – № 2. – С. 122 – 130.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Pashkovskiy, O.P. *Issledovaniye vrednykh vybrosov porodnykh otvalov i razrabotka ikh nauchno-tekhnicheskikh normativov* [Investigation of harmful emissions of the waste rock piles and development of their scientific and technical guidelines]. *Visti Donets'koho Hirnychoho Instytutu Vseukrains'k. nauk.-tekhnich. zhurn. hirnychoho profilu* – **Journal of Donetsk Mining Institute: All-Ukrainian scientific and technical journal of the mining specialization**, 2008, no. 2, pp. 122 – 130.

3. Пашковский, П.С. Контроль теплового состояния породных отвалов / П.С. Пашковский, Э.А. Попов, М.А. Яремчук // Уголь Украины. – 2000. – № 7. – С. 27 – 29.

Pashkovskiy, P.S., Popov, E.A., Yaremchuk, M.A. *Kontrol' teplovogo sostoyaniya porodnykh otvalov* [Monitoring of the thermal condition of waste rock piles]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2000, no. 7, pp. 27 – 29.

Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech), senior scientific associate; e-mail: zinstar@mail.ru;

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

Viktoria Viktorovna Volynets, engineer; e-mail: volynetsvika@mail.ua

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81

RELATIONSHIP BETWEEN A WASTE ROCK PILE TEMPERATURE AND AMOUNT OF EMITTED HARMFUL SUBSTANCES

Purpose. Prediction of the amount of the harmful substances entering the ambient air in relation to the temperature inside the waste rock pile.

Methodology. Establishment of analytical dependences of the amount of the emitted harmful substances on the thermodestruction of the rock mass of the waste rock piles.

Results. The thermodestruction processes in the waste rock pile have been considered. The mathematical model of the emission of the harmful substances from the waste rock pile into the air in relation to the coal and pyrite temperature has been proposed. The analytical dependences of the harmful substances on the temperature have been obtained for the further evaluation of the fire gases concentration.

Scientific novelty. The analytical dependence has been proposed which completely reflects the physical process of material thermodestruction and emission of the harmful substances.

Practical value. The obtained investigation results will allow predicting the emissions and the amount of the harmful gases entering the air atmosphere in the intervals between the full-scale observations.

Keywords: *waste rock pile; thermodestruction; combustion; analytical dependence; harmful substances; concentrations; temperature.*

УДК 614.8"363":504.5

Виталий Георгиевич Попов, канд. хим. наук, науч. сотр.; e-mail: v.g.popov.donetsk@gmail.com

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

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

УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ОБЛАКОВ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Достоверность определения удельного расхода воды и нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ жидкостными завесами.

Методика. Аналитические исследования и математическая обработка данных из литературных источников.

Результаты. Выявлена необходимость экспериментальной проверки ряда рекомендованных значений удельного расхода воды и нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ жидкостными завесами. С помощью имеющихся в литературе экспериментальных данных найдены фактические значения удельного расхода воды и водного раствора гидрокарбоната натрия для поглощения хлористого водорода из паровоздушной смеси при ее орошении указанными жидкостями. Эти значения удельного расхода приблизительно пропорциональны отношению времени орошения к исходной концентрации хлористого водорода в газовой фазе.

Научная новизна. Расчеты по уравнениям химических реакций впервые применены с целью повышения достоверности определения удельных расходов нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ жидкостными завесами.

Практическая значимость. Достоверность определения удельного расхода воды и нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ жидкостными завесами способствует улучшению планирования мероприятий по локализации и ликвидации последствий химических аварий.

Ключевые слова: аварийно химически опасные вещества; обеззараживание облаков; жидкостные завесы; нейтрализующие растворы; вода; удельный расход.

Постановка проблемы. В целях локализации и обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ (далее – АХОВ) при химических авариях используют жидкостные завесы, для постановки которых применяют воду или растворы нейтрализующих веществ [1 – 3]. Предложено использовать жидкостные завесы также для поглощения газообразных продуктов горения конвейерных лент при пожарах в горных выработках [4].

При определении сил и средств для обеззараживания облака АХОВ жидкостной завесой рекомендовано [1, 2] учитывать удельный расход распыленной жидкости, то есть массу этой жидкости, необходимую для поглощения соответствующей единицы массы АХОВ (например, 1 кг АХОВ). Безразмерные значения удельного расхода воды и нейтрализующих растворов для поглощения АХОВ из паровоздушных смесей далее обозначены m_y .

Анализ последних исследований. В качестве норм расхода нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков АХОВ жидкостными завесами рекомендовано [1 – 3] использовать табулированные значения удельного расхода растворов реагентов для нейтрализации АХОВ. Однако в соответствующих таблицах [1 – 3] не указаны условия поглощения АХОВ распыленными жидкостями. Значения удельного расхода воды для обеззараживания облаков аммиака и хлора водяными завесами зависят от условий поглощения этих АХОВ.

В работах [1 – 3] не нормирован расход воды для постановки водяных завес с целью локализации и обеззараживания облаков АХОВ. По мнению автора работы [5], продолжительность ведения аварийно-спасательных работ определяет общую потребность в воде для постановки водяных завес с указанной целью.

Значение m_y удельного расхода воды для обеззараживания облака опасного химического вещества водяной завесой рекомендовано рассчитывать по уравнению

$$m_y = K / R_m, \quad (1)$$

где $K = 100 \%$;

R_m – массовая доля опасного химического вещества в его насыщенном водном растворе, %.

Однако значения R_m определены в состоянии равновесного распределения опасного химического вещества между газовой и жидкой фазами, тогда как процесс обеззараживания облаков этого вещества жидкостными завесами может быть неравновесным в связи с ограниченным временем нахождения капель жидкости в воздухе. Соответственно расчеты по уравнению (1) могут давать меньшие значения m_y , чем фактический удельный расход воды для обеззараживания облаков опасного химического вещества водяными завесами. Например, метанол неограниченно растворим в воде. Тогда по уравнению (1) для поглощения паров метанола распыленной водой получаем $m_y \approx 0$, хотя фактически $m_y > 0$.

Вышеописанные соображения для опасного химического вещества, очевидно, верны и для АХОВ. Использование меньших, чем фактически необходимые, значений m_y при определении расхода воды или нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков АХОВ жидкостными завесами может снизить эффективность защитного действия таких завес.

Цель исследований – повышение достоверности определения удельного расхода воды и нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков АХОВ жидкостными завесами.

Материалы и результаты исследований. В табл. 1 приведены значения m_y , табулированные в литературных источниках и найденные по методике [6] с помощью уравнений химических реакций, протекающих при нейтрализации АХОВ водными растворами соответствующих реагентов:

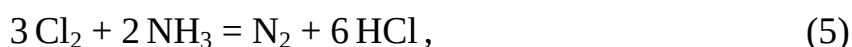
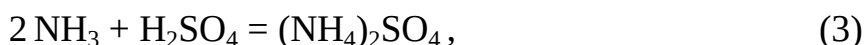


Таблица 1

Значения m_y удельного расхода растворов реагентов для нейтрализации АХОВ

Нейтрализующее вещество, его массовая доля в применяемом водном растворе	Уравнение реакции	Значение m_y	
		приведенное в литературе	найденное по методике [6]
Для нейтрализации аммиака			
Соляная кислота, 10 %	(2)	20 [1 – 3]	21
Серная кислота, 10 %	(3)	30 [1, 3]	29
Уксусная кислота, 10 %	(4)	20 – 30 [2]	35
Для нейтрализации хлора			
Аммиак, 10 %	(5)	10 [1]	1,6
Аммиак, 25 %	(5)	5 [1]	0,64
Щелочь (гидроксид натрия), 5 %	(6)	22 – 25 [1, 3]	23
Для нейтрализации хлористого водорода			
Аммиак, 10 %	(2)	10 [1, 2]	4,7
Аммиак, 25 %	(2)	5 [1, 2]	1,9
Для нейтрализации соляной кислоты (водного раствора хлористого водорода с массовой долей 34 %)			
Аммиак, 10 %	(2)	10 [1]	1,6
Аммиак, 25 %	(2)	5 [1]	0,64
Щелочь (гидроксид натрия), 5 %	(7)	7,4 [1, 3]	7,5

Как видно из табл. 1, в ряде случаев приведенные в литературе значения m_y близки к результатам расчетов по методике [6]. Однако автор методики [6] предложил ее для расчета расхода реагентов при нейтрализации проливов АХОВ, предполагая, что нейтрализующее вещество полностью расходуется исключительно на химическую реакцию с АХОВ. При постановке жидкостных завес часть распыленных нейтрализующих веществ обычно не вступает в химическую реакцию с АХОВ. Поэтому найденные по методике [6] значения m_y могут быть меньше фактических значений удельного расхода нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков АХОВ путем распыления этих растворов.

Вызывает сомнения обоснованность одинаковых значений m_y , приведенных в работе [1] для нейтрализации хлора, хлористого водорода и соляной кислоты водными растворами с одинаковой массовой долей аммиака (см. табл. 1). Для таких сомнений имеются следующие основания:

- соляная кислота – водный раствор хлористого водорода (с массовой долей не выше 40 % при давлении $1 \cdot 10^5$ Па и температуре 293 К), поэтому при нейтрализации соляной кислоты должно расходоваться меньше реагентов, чем при нейтрализации такой же массы хлористого водорода;

- представленные в табл. 1 результаты расчетов по методике [6] показывают, что удельный расход аммиака для нейтрализации хлористого водорода согласно уравнению (2) должен быть в 3 раза больше, чем для нейтрализации хлора согласно уравнению (5). Кроме того, хлор хуже растворим в воде, чем хлористый водород в тех же условиях. Поэтому фактические значения удельного расхода водных растворов аммиака для нейтрализации хлора должны быть больше, чем для нейтрализации хлористого водорода.

Сомнительно и приведенное в работе [2] значение m_y для нейтрализации аммиака водным раствором уксусной кислоты, меньшее, чем результат расчета той же величины m_y по методике [6]: вряд ли можно ожидать, что слабая уксусная кислота нейтрализует аммиак лучше, чем сильные кислоты (соляная и серная), для которых приведенные в литературе и рассчитанные по методике [6] значения m_y практически совпадают (см. табл. 1). Сомнительные данные нуждаются в экспериментальной проверке.

Приведенные в работах [4, 7] экспериментальные данные позволяют рассчитать фактические значения m_y удельного расхода водного раствора гидрокарбоната натрия для поглощения хлористого водорода из орошаемой этим раствором паровоздушной смеси. Учитывая определение величины m_y [1], можно записать:

$$m_y = \frac{Q_{\text{тр}}}{(C_0 - C_{\text{П}})V}, \quad (8)$$

где Q – расход жидкости для орошения паровоздушной смеси, $\text{м}^3/\text{с}$;
 τ – время орошения данного объема паровоздушной смеси, с ;
 ρ – плотность орошающей жидкости, принятая равной $1 \cdot 10^6 \text{ г}/\text{м}^3$;
 C_0 – концентрация хлористого водорода в газовой фазе до орошения, $\text{г}/\text{м}^3$;
 C_{Π} – концентрация хлористого водорода в газовой фазе после орошения, $\text{г}/\text{м}^3$;
 V – объем орошаемой за время τ паровоздушной смеси, м^3 .

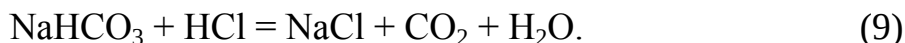
Подставляя в уравнение (8) приведенные в статьях [4, 7] экспериментальные данные, находим фактические значения m_y (табл. 2). Обозначения в графе «Вода» этой таблицы указывают, что применявшийся для орошения раствор готовили с использованием шахтной (ШВ) или дистиллированной воды (ДВ).

Таблица 2

Значения m_y удельного расхода распыленного водного раствора гидрокарбоната натрия для нейтрализации газообразного хлористого водорода

Место проведения опыта	Вода	$C_0 \cdot 10, \text{ г}/\text{м}^3$	$C_{\Pi} \cdot 10, \text{ г}/\text{м}^3$	$\tau, \text{ с}$	Значение $m_y \cdot 10^{-2}$	
					по уравнению (8)	по уравнению (11) при $W = 254 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ для ДВ, $W = 274 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ для ШВ
Лабораторная установка	ШВ	32,6	7,18	6	5,11	5,04
	ДВ	20,0	3,39	6	7,83	7,63
	ШВ	7,18	1,44	10	37,7	38,2
	ДВ	3,39	0,425	10	73,1	74,9
Штольня	ШВ	0,987	0,523	6	89,6	(166)

Гидрокарбонат натрия в водном растворе реагирует с хлористым водородом:



По методике [6] значение m_y для реакции, протекающей согласно уравнению (9), рассчитывают с помощью уравнения

$$m_y = \frac{K}{c_{\text{ГКН}}} \frac{M(\text{NaHCO}_3)}{M(\text{HCl})}, \quad (10)$$

где $c_{\text{ГКН}} = 0,5 \%$ – массовая доля гидрокарбоната натрия в растворе;
 $M(\text{NaHCO}_3) = 84,01 \text{ г}/\text{моль}$ – молярная масса гидрокарбоната натрия;
 $M(\text{HCl}) = 36,46 \text{ г}/\text{моль}$ – молярная масса хлористого водорода.

Расчет по уравнению (10) с вышеуказанными значениями его параметров дает $m_y = 4,61 \cdot 10^2$. Этот результат меньше, чем значения m_y из табл. 2. Следовательно, фактические значения m_y , найденные с помощью уравнения (8) из приведенных в [4, 7] экспериментальных данных, не могут быть рассчитаны по методике [6].

Фактические значения m_y из табл. 2 не могут быть рассчитаны и с помощью уравнения (1). Поскольку химическая реакция согласно уравнению (9) необратимо протекает слева направо, в равновесных условиях при наличии в растворе гидрокарбоната натрия не может быть хлористого водорода, поэтому делитель R_m в уравнении (1) оказывается равным нулю.

Представленные в табл. 2 (кроме последней строки) фактические значения m_y , найденные по уравнению (8), можно приближенно рассчитать с помощью простого уравнения

$$m_y \approx W\tau / C_0, \quad (11)$$

где W – эмпирический параметр, г/(с·м³).

Приведенные в табл. 2 значения параметра W для дистиллированной и шахтной воды находим как среднее арифметическое значений W_i , отвечающих представленным в табл. 2 результатам соответствующих опытов [7] на лабораторной установке и рассчитанных для каждого опыта по уравнению

$$W_i = (m_y)_i(C_0)_i / \tau_i, \quad (12)$$

где индекс i указывает на значения величин для определенного i -го опыта; значения $(m_y)_i$ найдены по уравнению (8).

Из приведенных в работах [4, 7] экспериментальных данных по уравнению (8) находим также фактические значения m_y удельного расхода воды для поглощения хлористого водорода из орошаемой этой водой паровоздушной смеси (табл. 3). Обозначения в графе «Вода» этой таблицы указывают, что для орошения использовали дистиллированную или шахтную воду.

Хлористый водород при давлении $1 \cdot 10^5$ Па и температуре 293 К образует насыщенный водный раствор с массовой долей $R_m = 40$ %. Подставляя это значение R_m в уравнение (1), находим $m_y = 2,5$, что намного меньше представленных в табл. 3 значений m_y . Это подтверждает сделанный выше вывод, что расчет m_y по уравнению (1) может привести к меньшим значениям, чем фактический удельный расход распыленной воды для поглощения газообразных АХОВ.

Таблица 3

Значения m_y удельного расхода распыленной воды для поглощения газообразного хлористого водорода

Место проведения опыта	Вода	C_0 , г/м ³	$C_{\text{п}}$, г/м ³	τ , с	Значение $m_y \cdot 10^{-2}$	
					по уравнению (8)	по уравнению (11) при $W = 286$ г/(с·м ³) для ДВ, $W = 375$ г/(с·м ³) для ШВ
Лабораторная установка	ДВ	17,92	4,95	6	1,00	0,96
	ШВ	5,55	2,53	6	4,31	4,05
	ДВ	4,95	1,03	10	5,53	5,78
	ШВ	2,53	0,975	10	13,9	14,8
Штольня	ШВ	0,265	0,214	6	81,9	84,9
	ШВ	0,126	0,0893	6	114	(179)

Представленные в табл. 3 (кроме последней строки) фактические значения m_y , найденные по уравнению (8), можно приближенно рассчитать с помощью уравнения (11). Приведенные в табл. 3 значения параметра W находим, как описано выше, с помощью уравнений (8), (12) и представленных в табл. 3 экспериментальных данных [7], полученных на лабораторной установке.

Низкие значения параметра W уравнения (11) указывают на более эффективную абсорбцию газообразных АХОВ распыленной жидкостью. Значения параметра W из табл. 2 ниже, чем приведенные в табл. 3. Это соответствует ожидаемому повышению эффективности абсорбции газообразного хлористого водорода при добавке к абсорбенту (воде) нейтрализующего реагента – гидрокарбоната натрия. Как видно из табл. 2 и 3, значения параметра W для шахтной воды выше соответствующих значений для дистиллированной воды. Это можно объяснить наличием в шахтной воде примесей, ухудшающих абсорбцию газообразного хлористого водорода водой и водным раствором гидрокарбоната натрия.

В опытах [4], результаты которых представлены в последней строке табл. 2 и в последней строке табл. 3, хлористый водород поступал в воздух штольни при испарении соляной кислоты, тогда как в остальных опытах, фигурирующих в указанных таблицах, источником хлористого водорода служила горящая конвейерная лента. Для опытов с соляной кислотой расчеты по уравнению (11) дают более высокие значения m_y (взяты в скобки в табл. 2 и 3), чем найдено по уравнению (8). Вероятная причина этого – присутствие в продуктах горения конвейерной ленты веществ, ухудшающих абсорбцию газообразного хлористого водорода водой и водным раствором гидрокарбоната натрия.

Выводы. Табулированные в работах [1–3] значения удельного расхода растворов реагентов для нейтрализации АХОВ, которые меньше или равны

результатам расчетов тех же величин по методике [6], могут не соответствовать фактическим значениям удельного расхода указанных распыленных растворов для обеззараживания облаков АХОВ.

В работе [1] приведены одинаковые значения удельного расхода водных растворов с одинаковой массовой долей аммиака для нейтрализации хлора, хлористого водорода и соляной кислоты. Результаты расчетов показывают, что эти значения удельного расхода не должны быть одинаковыми.

Значения удельного расхода воды для обеззараживания облаков АХОВ водяными завесами, рассчитанные исходя из растворимости этих АХОВ в воде в равновесных условиях, могут быть меньше фактических значений удельного расхода распыленной воды для обеззараживания облаков указанных АХОВ.

Экспериментальная проверка ранее рекомендованных в литературных источниках значений удельного расхода нейтрализующих растворов для обеззараживания облаков АХОВ жидкостными завесами будет способствовать улучшению планирования мероприятий по локализации и ликвидации последствий химических аварий.

Из экспериментальных данных, приведенных в работах [4, 7], найдены фактические значения удельного расхода воды и водного раствора гидрокарбоната натрия для поглощения хлористого водорода из паровоздушной смеси при ее орошении указанными жидкостями. Эти значения удельного расхода приблизительно пропорциональны отношению времени орошения к исходной концентрации хлористого водорода в газовой фазе. Соответствующие коэффициенты пропорциональности согласуются с известными представлениями.

Список литературы / References

1. Методические рекомендации по ликвидации последствий химических аварий / под ред. В.А. Владимирова [Электронный ресурс]. – М. : ЦСИ ГЗ МЧС России, 2005. URL: http://04.mchs.gov.ru/upload/site63/document_file/EzumrIDWe6.doc (дата обращения: 05.08.2019).

Vladimirov, V.A. (ed.). *Metodicheskiye rekomendatsii po likvidatsii posledstviy khimicheskikh avariy [Elektronnyy resurs]* [Guidelines on liquidation of consequences of chemical accidents] (Electronic resource). Moscow, TsSI GZ MChS Rossii Publ., 2005. Available at: http://04.mchs.gov.ru/upload/site63/document_file/EzumrIDWe6.doc (accessed: 05.08.2019).

2. Методические рекомендации по организации и технологиям ликвидации чрезвычайных ситуаций с наличием опасных химических и радиоактивных веществ [Электронный ресурс] : утв. МЧС Республики Беларусь 20.01.2014. URL: <http://rosn.mchs.gov.by/upload/iblock/d3c/-d3c0ae042b34a533123f6fcdb7ca100d.pdf> (дата обращения: 05.08.2019).

Metodicheskiye rekomendatsii po organizatsii i tekhnologiyam likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy s nalichiyem opasnykh khimicheskikh i radioaktivnykh veshchestv [Elektronnyy resurs]: utv. MChS Respubliki Belarus' [Guidelines on organization and technologies of elimination of emergency situations with hazardous chemical and radioactive substances] (Electronic resource): approved by the MChS of Belarus on 20.01.2014. Available at: <http://rosn.mchs.gov.by/upload/iblock/d3c/d3c0ae042b34a533123f6fcd7ca100d.pdf> (accessed: 05.08.2019).

3. Справочник спасателя. Книга 6. Спасательные работы по ликвидации последствий химического заражения / под ред. Г.С. Карпова. – М. : ВНИИ ГОЧС, 2006. – 112 с.

Karpov, G.S. (ed.). *Spravochnik spasatelya. Kniga 6. Spasatel'nyye raboty po likvidatsii posledstviy khimicheskogo zarazheniya* [Rescuer's reference book. Book 6. Rescue operations for elimination of consequences of chemical contamination]. Moscow, VNI GOChS Publ., 2006, 112 p.

4. Поглощение вредных веществ в воздухе горной выработки водяной завесой / Л.С. Беляева, А.В. Бондаренко, О.А. Жадан, В.Р. Туков // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. – Вып. 42. – С. 102 – 108.

Belyayeva, L.S., Bondarenko, A.V., Zhadan, O.A., Tukov, V.R. *Pogloshcheniye vrednykh veshchestv v vosduke gornoj vyrabotki vodyanoy zavesoy* [Sorption of harmful substances in mine working air by a water screen]. *Gornospasatelnoye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2005, issue 42, pp. 102 – 108.

5. Котов, Г.В. Тактика применения водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом (проливом) опасных химических веществ. Часть 2. Прокладка перфорированных линий / Г.В. Котов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 2 (42). – С. 74 – 83.

Kotov, G.V. *Taktika primeneniya vodyanykh zaves pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy s vybrosom (prolivom) opasnykh khimicheskikh veshchestv. Chast' 2. Prokladka perforirovannykh liniy* [Tactics of application of water screens during elimination of the emergency situations with emission (spillage) of hazardous chemical substances. Part 2. Laying of perforated lines]. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya – Emergency situations: prevention and elimination*, 2017, no. 2(42), pp. 74 – 83.

6. Чинюк, М.В. Определение сил и средств для нейтрализации проливов аварийно химически опасных веществ химическими реагентами / М.В. Чинюк // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 6. – С. 25 – 28.

Chinyuk, M.V. *Opredeleniye sil i sredstv dlya neytralizatsii prolivov avariyno khimicheskikh opasnykh veshchestv khimicheskimi reagentami* [Determination of forces and facilities for neutralization of the spills of chemically hazardous substances conducive to accidents with chemical reagents]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2006, vol. 15, no. 6, pp. 25 – 28.

7. Способ поглощения вредных веществ водными растворами / О.А. Жадан, В.Р. Туков, И.Н. Непочатых, О.В. Храпоненко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. – Вып. 42. – С. 131 – 136.

Zhadan, O.A., Tukov, V.R., Nepochatykh, I.N., Khraponenko, O.V. *Sposob pogloshcheniya vrednykh veshchestv vodnymi rastvorami* [Method of sorption of harmful substances by water solutions]. *Gornospasatelnoye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2005, issue 42, pp. 131 – 136.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 07.08.2019

Vitaly Georgiyevich Popov, Cand. Sci. (Chem.), scientific associate; e-mail: v.g.popov.donetsk@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) 332-78-43

SPECIFIC DISCHARGE OF LIQUIDS FOR DECONTAMINATION OF CLOUDS OF CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES CONDUCTIVE TO ACCIDENTS

Purpose. Determination accuracy of the specific discharge of water and neutralizing solutions for the decontamination of clouds of chemically hazardous substances conducive to accidents by liquid screens.

Methodology. Analytical investigations and mathematical processing of data from the literature sources.

Results. The necessity of the experimental testing of a number of recommended values of the specific water and neutralizing solutions discharge for the decontamination of clouds of the chemically hazardous substances conducive to accidents by the water screens has been identified. With the help of the available in the literature experimental data the actual values of the specific discharge of water and the sodium bicarbonate aqueous solution for absorption of hydrogen chloride from a steam-and-air mixture during its spraying with the mentioned liquids have been found. These values of the specific discharge are approximately proportional to the ratio of the spraying time to the initial concentration of hydrogen chloride in the gaseous phase.

Scientific novelty. The calculations by the equations of the chemical reactions have been applied for the first time with the purpose of improvement of the determination accuracy of the specific discharges of the neutralizing solutions for the decontamination of clouds of chemically hazardous substances conducive to accidents by the liquid screens.

Practical value. The determination accuracy of the specific discharge of water and neutralizing solutions for the decontamination of clouds of chemically hazardous substances conducive to accidents by the liquid screens contributes to improvement of planning the measures for localization and elimination of consequences of the chemical accidents.

Keywords: *chemically hazardous substances conducive to accidents; decontamination of clouds; liquid screens; neutralizing solutions; water; specific discharge.*

УДК 622.281:622'112.4

Геннадий Иванович Соловьев, канд. техн. наук, доц.; e-mail: GISoloviev@gmail.com;

Андрей Леонидович Касьяненко, канд. техн. наук, доц.; e-mail: KasyanenkoAL@aol.com

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

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

Геннадий Петрович Стариков, д-р техн. наук, проф.; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;

Юрий Анатольевич Петренко, д-р техн. наук, проф.; e-mail: ifgpdnr@mail.ru

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»

283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел.: (+38 062) 311-52-85

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД ПОЧВЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОЧНОГО СЛОЯ

Цель. Установить особенности процесса деформирования пород почвы выработки при наличии в ее текстуре прочного слоя и обосновать способ обеспечения устойчивости почвы.

Методика. Лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов.

Результаты. Установлено, что в почве выработки шириной В при наличии прочного слоя пород толщиной 0,3В наибольший положительный эффект достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород так, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки. Если невозможно расположить выработку близко к этому слою, для уменьшения смещений пород почвы необходимо дополнительное внешнее воздействие непосредственно на прочный слой, чтобы предотвратить его разлом.

Научная новизна. Установлено, что устойчивость пород почвы при наличии в ее текстуре прочного слоя зависит от его толщины, прочности и глубины расположения ниже почвы выработки.

Практическая значимость. Предложено для обеспечения устойчивости пород почвы выработки создавать систему «прочный слой – крепь усиления – рама основной крепи» с помощью упорно-лежневой крепи усиления.

Ключевые слова: горная выработка; породы почвы; прочный слой; эквивалентные материалы; критерий подобия; упорно-лежневая крепь усиления.

Постановка проблемы. Опыт отработки угольных пластов Донецко-Макеевского района Донбасса показывает, что из-за деформирования пород почвы около 65 % выемочных выработок находятся в неудовлетворительном состоянии и до 43 % затрат по ремонту выработок приходится на их поддирку.

Проведение работ по поддирке почвы выработок не только увеличивает затраты на поддержание выработок, но и затрудняет работу транспорта, влияет на проветривание выработок и, что особенно важно, существенно влияет на безопасность ведения горных работ. Для поддирки и зачистки почвы применяют поддирочные и поддирочно-бурильные машины, причем их применение эффективно в условиях слабых пород. Анализ состава углевмещающих пород Донецко-Макеевского района Донбасса показал, что

в 32 % случаев в почве выработки вторым слоем залегают породы с прочностью от 60 до 120 МПа [1]. При этом прочность пород для механизированной поддирки должна быть не более 60 МПа. Выше этого предела при поддирке почвы необходимо применять буровзрывные работы, что повышает энергозатраты на разрушение пород и снижает темпы работ более чем в 5 раз [2].

Таким образом, изучение процесса деформирования пород почвы при наличии в ее текстуре прочного слоя и разработка способов использования его несущей способности – актуальная научно-техническая задача.

Анализ последних исследований. Обзор отечественных и зарубежных исследований [3–6] по обеспечению устойчивости выемочных выработок показывает, что вопросу влияния текстуры пород на процесс деформирования почвы выработок уделялось недостаточное внимание. При наличии в текстуре почвы прочного слоя пород их разрушение происходит в результате развития породной складки с образованием крупных породных блоков [5, 6]. Кроме того, не рассмотрено использование несущей способности прочного слоя в почве выработки для повышения ее устойчивости.

Цель исследований – установить особенности процесса деформирования пород почвы выработки при наличии в её текстуре прочного слоя и обосновать способ обеспечения устойчивости почвы.

Результаты исследований. Исследования проводили на моделях из эквивалентных материалов с использованием плоского стенда с внутренними рабочими размерами 76×58×16 см, обеспечивающими соблюдение граничных условий при выбранном масштабе моделирования 1:50. Процессы деформирования моделируемого породного массива изучали в пластовой выработке шириной В, содержащей прочный слой в почве, с мероприятиями по обеспечению ее устойчивости и без них.

На первом этапе моделировали почву пласта выработки без прочного слоя, остальные 12 моделей отработывали для аналогичных условий, но с наличием прочного слоя различной толщины $m_{пр}$, прочности $\sigma_{сж}$ и глубины залегания ниже почвы выработки $h_{пр}$. Затем отработывали еще 12 моделей с предлагаемыми мероприятиями по обеспечению устойчивости почвы выработки. За прочный слой принимали слой пород, прочность которого на 50 % и более превышает прочность остальных вмещающих пород. По мере нагружения модели измеряли смещение почвы выработки методом фотофиксации. Для обработки результатов измерений использован графический редактор Photoshop.

Результаты исследования влияния прочного слоя и его параметров на смещения контура почвы в работе [7] позволили выделить два характерных этапа деформирования пород почвы. На первом этапе при увеличении пригруза начинала формироваться складка и наблюдалось равномерное смещение пород почвы. На втором этапе при дальнейшем увеличении

пригруза наблюдался изгиб и разлом слоев, в том числе и прочного, и увеличение смещений пород почвы. Причем после разлома прочного слоя интенсивность деформации возрастала, вовлекая нижележащие слои в процесс смещений. Также было установлено, что при наличии в почве выработки шириной B слоя прочных пород толщиной $0,3B$ наибольший положительный эффект наблюдается, если располагать выработку относительно вмещающих пород так, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки, в случае невозможности расположения выработки близко к контуру с целью уменьшения смещений пород почвы, необходимо дополнительное внешнее воздействие непосредственно на прочный слой для предотвращения его разлома до наступления второго этапа деформирования.

Наиболее перспективное направление обеспечения устойчивости почвы горных выработок – механическое силовое воздействие на прочный слой, позволяющее максимально использовать его несущую способность. Исходя из вышесказанного был предложен способ [8, 9], заключающийся в создании системы «прочный слой – крепь усиления – рама основной крепи» с помощью упорно-лежневой крепи усиления (рис. 1).

Сущность данного способа заключается в следующем: под верхнюю основную крепь последовательно устанавливают вдоль выработки крепь усиления, которая состоит из верхней и нижней частей стойки из отрезков металлического профиля, соединенных между собой замковым соединением. В почве выработки создают канавку, в которую укладывают лежень. Глубину канавки определяет глубина залегания прочного слоя.

Для исследования эффективности предложенного способа отработаны модели со следующими параметрами прочного слоя: толщина $m_{\text{пр}} = 0,1B$ и $m_{\text{пр}} = 0,3B$; глубина залегания $h_{\text{пр}} = 0,1B$ и $h_{\text{пр}} = 0,3B$; прочность $\sigma_{\text{сж}} = 60 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{сж}} = 80 \text{ МПа}$ и $\sigma_{\text{сж}} = 120 \text{ МПа}$ (рис. 2).

Сравнивая результаты исследования без предложенных мероприятий и с их применением (см. рис. 2, а), можно сделать вывод, что при использовании предлагаемого способа смещение почвы выработки снизилось в 1,5...2 раза.

При этом путем разборки модели по срезам почвы было установлено, что без предложенных мероприятий при деформировании пород почвы происходит разлом прочного слоя за счет складкообразования нижележащих слоев (см. рис. 2, б). После разлома прочного слоя охранное сооружение начинает воздействовать на породы почвы как штамп, спровоцировав дальнейший рост их смещений. Создание системы «прочный слой – крепь усиления – рама основной крепи» стабилизировало и уменьшило процесс складкообразования, вызванный нижележащими породами, что позволило сохранить целостность прочного слоя и обеспечило устойчивость пород почвы.

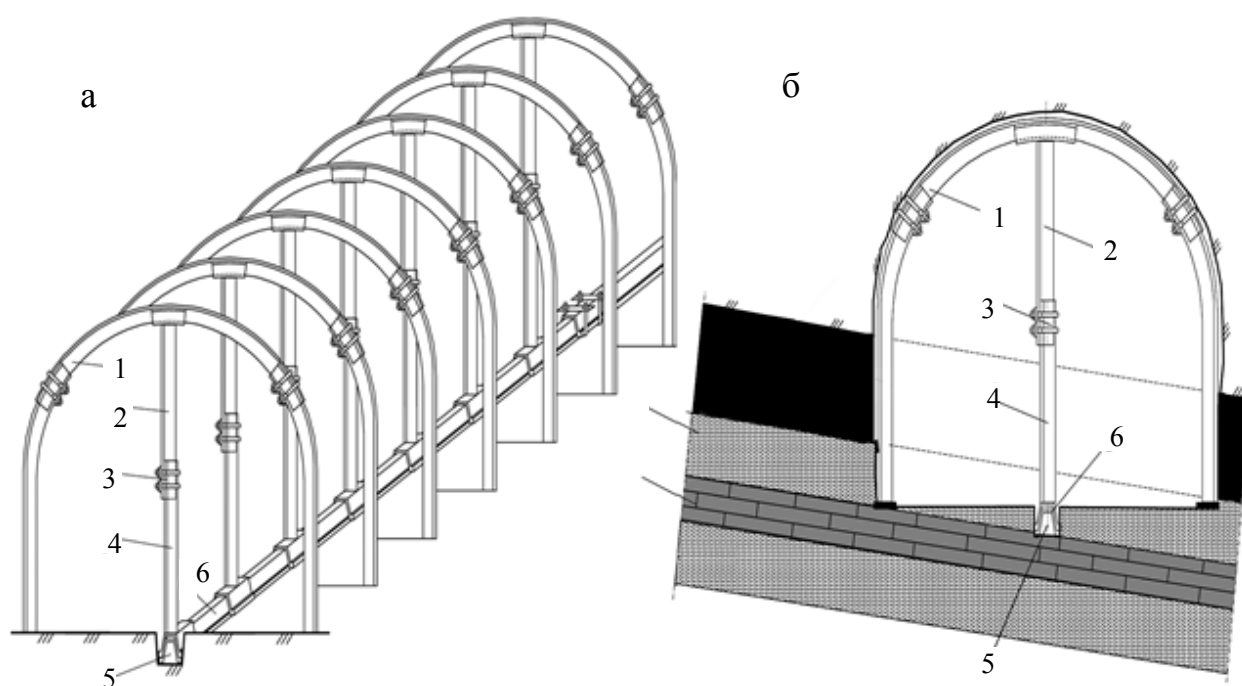


Рис. 1. Общий вид предлагаемого способа: а – по длине выработки; б – в поперечном сечении: 1 – верхняк основной крепи; 2 – верхняя часть стойки; 3 – замковое соединение; 4 – нижняя часть стойки; 5 – канавка; 6 – лежень; 7 – почва выработки; 8 – прочный слой

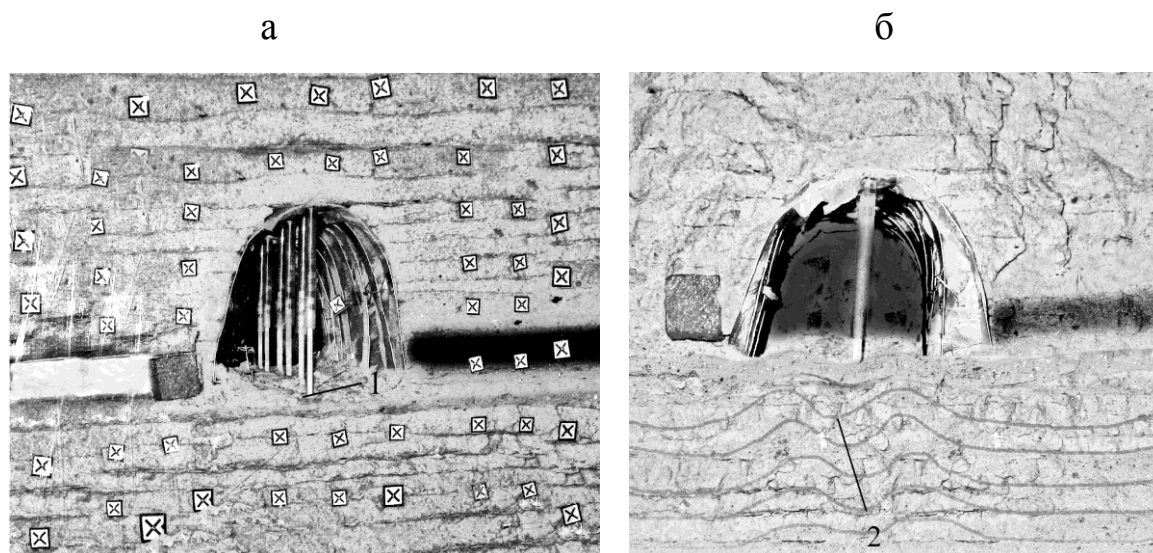


Рис. 2. Общее состояние выработок с мероприятиями по обеспечению устойчивости пород почвы в начале моделирования (а) и в конце моделирования (б): 1 – упорно-лежневая крепь усиления, контактирующая с прочным слоем почвы; 2 – складкообразование пород почвы от внешнего воздействия

Эффективность предлагаемого способа оценивали с помощью коэффициента $k_{\text{э}}$, определяемого по формуле

$$k_{\text{э}} = U_{\text{пр}}^{\text{Б}} / U_{\text{пр}}^{\text{М}},$$

где $U_{\text{пр}}^{\text{М}}$, $U_{\text{пр}}^{\text{Б}}$ – смещения пород почвы с применением мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки и без их применения, м.

Из рис. 3 видно, что при $k_{\text{э}} > 1$ предлагаемый способ эффективен. При этом для условий $m_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$; $m_{\text{пр}} = 0,3\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,3\text{В}$ эффект наблюдается на всех этапах деформирования пород почвы для всех прочностей. А для условий $m_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,3\text{В}$; $m_{\text{пр}} = 0,3\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$ при прочности слоя 60 МПа положительный эффект от способа наблюдается только на втором этапе деформирования пород почвы. При $k_{\text{э}} < 1$ отсутствие эффекта от применения данного способа объясняется нарушением сплошности прилегающих к контуру выработки пород почвы в процессе создания канавки для установки лежня, что вызывает и увеличение смещений на первом этапе деформирования.

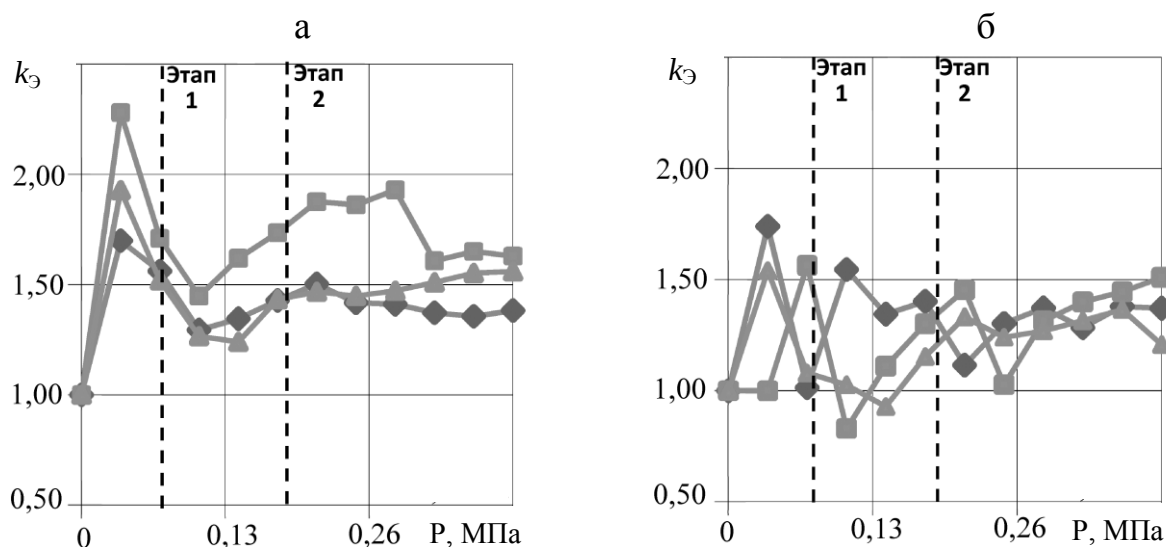


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности $k_{\text{э}}$ от пригруза P в моделях с прочным слоем со следующими параметрами:
а – $m_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$; б – $m_{\text{пр}} = 0,3\text{В}$ и $h_{\text{пр}} = 0,1\text{В}$; со слоем породы прочностью: $\blacklozenge$ – 60 МПа; $\blacktriangle$ – 80 МПа; $\blacksquare$ – 120 МПа

Выводы. Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- прочный слой в почве выработки и его параметры (толщина, прочность, глубина залегания ниже почвы) оказывают влияние на её устойчивость. При этом наибольшее влияние оказывает толщина и прочность;
- деформирование пород почвы с прочным слоем происходит в два этапа: на 1-м этапе – складкообразование слоев происходит только над прочным слоем; на 2-м этапе – происходит изгиб и разлом прочного слоя и увеличение смещений пород почвы;
- при наличии в почве выработки шириной B слоя прочных пород толщиной $0,1B$ наибольший положительный эффект достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород так, чтобы прочный слой залегал как можно дальше от контура почвы, но не более $0,5B$;
- при слое прочных пород толщиной $0,3B$ в почве выработки наибольший положительный эффект достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород так, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки;
- с целью уменьшения смещений пород почвы необходимо дополнительное внешнее воздействие на прочный слой для предотвращения его разлома до наступления второго этапа деформирования;
- в качестве дополнительного мероприятия предложено создавать систему «прочный слой – крепь усиления – рама основной крепи» путем установки крепи усиления, контактирующей с прочным слоем через продольный лежень;
- применение разработанного способа оказывает наибольший эффект на первом этапе деформирования пород почвы, при этом смещение контура почвы уменьшилось в 1,5...2 раза по сравнению с моделями без мероприятий по обеспечению устойчивости пород почвы;
- оптимальная область применения разработанного способа: прочный слой толщиной $m_{\text{пр}} = 0,1B$, глубиной залегания ниже почвы $h_{\text{пр}} = 0,1B$ и прочностью $\sigma_{\text{сж}} = 60$ МПа и более.

Список литературы / References

1. Касьяненко, А. Л. Обеспечение устойчивости пород почвы выемочных выработок при наличии в их текстуре прочных слоев : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / А.Л. Касьяненко. – Донецк, 2017. – 237 с.

Kas'yanenko, A.L. *Obespecheniye ustoychivosti porod pochvy vyyemochnykh vyrabotok pri nalichii v ikh teksture prochnykh sloyev: dis. ... kand. tekhn. nauk: 25.00.22* [Ensuring of stability of bed floor rocks of winning mine workings with durable layers in their texture: cand. tech. sci. diss.: 25.00.22]. Donetsk, 2017, 237 p.

2. Бабиюк, Г.В. Управление надежностью горных выработок / Г.В. Бабиюк. – Донецк : Свит книги, 2012. – 420 с.

Babiyuk, G.V. *Upravleniye nadyezhnost'yu gornykh vyrabotok* [Management of mine workings safety]. Donetsk, Svit knyhy Publ., 2012, 420 p.

3. Brady, B.H.G., Brown, E.T. Rock mechanics: for underground mining. 3rd edition. Netherlands, Springer, 2007, 628 p.

4. Экспериментальные исследования пучения пород почвы подготовительных выработок на пологих пластах Донбасса / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович [и др.]. – Днепропетровск : ЛизуновПресс, 2014. – 224 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. et al. *Eksperimental'nyye issledovaniya pucheniya porod pochvy podgotovitel'nykh vyrabotok na pologikh plastakh Donbassa* [Experimental investigations of the swelling of bed floor rocks of development mine workings at the Donets basin flat-lying seams]. Dnepropetrovsk, LizunovPress Publ., 2014, 224 p.

5. Геомеханика нагружения крепи очистных и подготовительных выработок в слоистом массиве слабых пород / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк. – Днепропетровск : ЛизуновПресс, 2012. – 236 с.

Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A., Chervatyuk, V.G. *Geomekhanika nagruzheniya крепи ochistnykh i podgotovitel'nykh vyrabotok v sloistom massive slabyykh porod* [Geomechanics of loading the support of stopes and development mine workings in the stratified massif of soft rocks]. Dnepropetrovsk, LizunovPress Publ., 2012, 236 p.

6. Снигур, В.Г. Закономерности пучения пород почвы пластовых выработок / В.Г. Снигур // Уголь Украины. – 2014. – № 7. – С. 3 – 5.

Snigur, V.G. *Zakonomernosti pucheniya porod pochvy plastovykh vyrabotok* [Regularities of the swelling of bed floor rocks of in-seam workings]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2014, no. 7, pp. 3 – 5.

7. Касьян, Н.Н. Исследование влияния прочного слоя в составе пород почвы выработки на ее устойчивость / Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.Л. Касьяненко // Сборник научных трудов ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2019. – № 14(57). – С. 5 – 11.

Kas'yan, N.N., Petrenko, Yu.A., Kas'yanenko, A.L. *Issledovaniye vliyaniya prochnogo sloya v sostave porod pochvy vyrabotki na yeye ustoychivost'* [Investigation of influence of a durable layer being in the constitution of bed floor rocks of a mine working on its stability]. *Sbornik nauchnykh trudov GOUVPO LNR "DonGTU"* [Collection of scientific papers of the GOUVPO LNR "DonGTU"]. 2019, no. 14(57), pp. 5 – 11.

8. Пат. 99028 Україна, МПК⁸ E21D 11/14. Спосіб підтримання гірничих виробок / Г.І. Соловійов, А.Л. Касьяненко; заявник і власник Донецький національний технічний університет. – № а201015254; заявл. 25.06.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. – 2 с.

Soloviov, H.I., Kas'ianenko, A.L. *Sposib pidtrymannia hirnychykh vyrobok* [Method of maintenance of mine workings]. Patent UA, no. 99028, 2012.

9. Пат. 103110 Україна, МПК⁸ E21D 11/00, E21D 20/00, E21C 41/18. Спосіб охорони виїмкових виробок у шаруватих породах підшви, схильних до здимання / Г.І. Соловійов, А.Л. Касьяненко, Е.В. Поляков; заявник і власник Донецький національний технічний університет. – № а201203091; заявл. 16.03.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17 – 8 с.

Soloviov, H.I., Kas'ianenko, A.L., Poliakov, E.V. *Sposib okhorony vyimkovykh vyrobok u sharuvatykh porodakh pidoshvy, skhyl'nykh do zdymannia* [Method of protection of winning mine workings in layered rocks of a foot wall liable to swelling]. Patent UA, no. 103110, 2013.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Н.Н. Грищенковым
Дата поступления рукописи 20.08.2019

Gennady Ivanovich Solovyov, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: GISoloviev@gmail.com;
Andrey Leonidovich Kasyanenko, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: KasyanenkoAL@aol.com
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“Donetsk National Technical University”
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09;
Gennady Petrovich Starikov, Dr. Sci. (Tech.), professor; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;
Yuri Anatolyevich Petrenko, Dr. Sci. (Tech.), professor; e-mail: ifgpdnr@mail.ru
The Governmental Institution “Institute of Physics of Mining Processes” of the DPR
283114, Donetsk, 72, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+38 062) 381-13-55

ENSURING OF STABILITY OF BED FLOOR ROCKS BY USING THE LOAD-BEARING ABILITY OF A DURABLE LAYER

Purpose. To determine peculiarities of a deformation process of the bed floor rocks of a mine working containing the durable layer in its texture and to substantiate a method to ensure the stability of the floor.

Methodology. Laboratory investigations on the models made of the equivalent materials.

Results. It has been established that the most positive effect is being achieved in the floor of the B wide mine working containing the 0.3B thick durable layer of rocks if the mine working is laid out towards the host rocks in such way that the durable layer would embed as close as possible to the contour of the mine working floor. If it is impossible to lay out the mine working close to this layer to reduce displacements of the bed floor rocks the additional external action directly on the durable layer is necessary in order to prevent its fracture.

Scientific novelty. It has been established that the stability of the bed floor rocks containing the durable layer in its texture depends on its thickness, durability and depth of its location below the floor of the mine working.

Practical value. In order to ensure the stability of the bed floor rocks of the mine working it has been suggested to create a “durable layer – reinforced support – main support frame” system with the help of a prop-and-sill reinforced support.

Keywords: mine working; bed floor rocks; durable layer; equivalent materials; similarity criterion; prop-and-sill reinforced support.

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

2019, № 4(56)

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 18.11.2019.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 3,35 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 28 ноября 2019 г.