



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 2(55)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2018

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 2(55). – 118 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	П.С. Пашковский – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	Ю.Ф. Булгаков
д-р техн. наук	С.П. Высоцкий
д-р техн. наук	С.П. Греков
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	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
д-р техн. наук	В.Г. Сынков
канд. техн. наук	В.С. Харьковский (Республика Казахстан)

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 № 2 от 29.03.2018).

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 Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 2(55)

Published quarterly

Found in 1970

Donetsk
2018

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2018. – No. 2(55). – 118 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included in the list of reviewed scientific publications which the basic scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences should be published in (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 Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters.

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	P.S. Pashkovskiy – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Vysotskiy
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov
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.)	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
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Synkov
Cand. Sci. (Tech.)	V.S. Kharkovskiy (Republic of Kazakhstan)

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. 2 from 29.03.2018).

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***

**Кострубицкий А.А., Балта Д.Ф.,
Дикенштейн И.Ф.**
Повышение огнетушащей
эффективности средств аэрозольно-
порошкового пожаротушения

7

Коляда А.Ю.
Локализация подземных пожаров в
лавах

18

Диденко А.А.
Моделирование теплообмена в горном
массиве при подземном пожаре

27

Буряк Д.С.
Обоснование гидравлических
параметров противопожарного
водоснабжения надшахтных зданий

36

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

**Агеев В.Г., Пейтибай Г.И.,
Марийчук И.Ф.**
Моделирование воздействия горного
давления на взрывоустойчивую
перемычку

44

**Пашковский П.С., Пейтибай Г.И.,
Галухин Н.А.**
Газодинамические процессы в
разгонном сопле пожаротушающего
устройства

53

Ковалев А.П., Москвина И.И.
Вероятность взрывов метановоздушной
смеси при эксплуатации
электрооборудования в шахтах

64

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

**Kostrubitskiy A.A., Balta D.F.,
Dikenshteyn I.F.**
Increase in the fire-fighting efficiency of
aerosol-dry powder fire-extinguishing
means

Kolyada A.Yu.
Localization of underground fires in
longwall faces

Didenko A.A.
Simulation of the heat exchange in a massif
by an underground fire

Buryak D.S.
Substantiation of hydraulic parameters
of the fire water supply of deckhead
buildings

II. Safety in emergencies

**Ageyev V.G., Peftibay G.I.,
Mariychuk I.F.**
Modeling the influence of the rock pressure
on an explosion-stable stopping

**Pashkovskiy P.S., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A.**
Gasdynamic processes in an overspeed
nozzle of a fire-extinguishing device

Kovalyov A.P., Moskvina I.I.
Probability of methane-air mixture
explosions by operation of the electrical
equipment in mines

Гуржий В.В., Зинченко Е.О. Признаки больших переходных сопротивлений в контактных соединениях	74	Gurzhii V.V., Zinchenko Ye.O. Signs of large transient resistances in contact connections	
III. Охрана труда и экологическая безопасность		III. Labor protection and environmental safety	
Греков С.П., Глушенко К.В., Волынец В.В. Математические модели очагового самонагрева дисперсных веществ	80	Grekov S.P., Hlushenko K.V., Volynets V.V. Mathematical models of the seat spontaneous heating of disperse substances	
Высоцкий С.П., Князев С.А. Повышение эффективности очистки газовых выбросов при сжигании твердого топлива	93	Vysotskiy S.P., Knyazev S.A. Increase of effectiveness of cleaning the gas bursts by combustion of the solid fuel	
Долженков А.Ф., Тарасенко С.Л. Зональный принцип подхода к оценке эффективности защиты шахтеров спецодеждой	102	Dolzhenkov A.F., Tarasenko S.L. The zonal principle of the approach to estimation of efficiency of protection of mine workers with working clothes	
Пашковский О.П. Проницаемость породного отвала под напором ветра и тепловой депрессии	111	Pashkovskiy O.P. Permeability of a waste dump under the force of the wind and thermal drop of ventilation pressure	
Требования к оформлению статьи	117	Requirements of execution of an article	

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.842.611:001.891.572

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

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР

283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-28;

Дарья Федоровна Балта, науч. сотр.; e-mail: balta_daria@mail.ru;

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

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

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

ПОВЫШЕНИЕ ОГNETУШАЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ АЭРОЗОЛЬНО-ПОРОШКОВОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Цель. Обоснование параметров аэрозольно-порошковой установки пожаротушения для обеспечения синергетического эффекта при действии бинарной комбинации огнетушащих веществ.

Методика. Аналитические исследования огнетушащих веществ и их доминирующих механизмов подавления пламени; расчет параметров работы средств аэрозольно-порошкового пожаротушения.

Результаты. Рассмотрен аэрозольно-порошковый метод тушения пожаров, основанный на проявлении огнетушащими веществами сразу нескольких механизмов прекращения горения. Предпринята попытка полностью или частично отказаться в средствах порошкового пожаротушения от сжатого газа в качестве энергоносителя посредством его замены газами, образующимися при сгорании твердого аэрозольобразующего состава. Выполнен расчет параметров аэрозольно-порошковой установки пожаротушения в процессе истечения огнетушащего вещества. Получены расчетные формулы для определения давления в емкости установки, расхода и массы выбрасываемой смеси порошка и аэрозоля.

Научная новизна. Оптимизировано соотношение массы порошкового и твердого аэрозольобразующих огнетушащих составов в емкости установки, что обеспечивает появление синергетического эффекта при их действии.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволяют повысить эффективность объемного аэрозольно-порошкового тушения пожаров путем совместного действия бинарной комбинации огнетушащих веществ.

Ключевые слова: тушение пламени; огнетушащее вещество; механизм прекращения горения; комбинированный способ пожаротушения; синергетический эффект; аэрозольно-порошковый состав; установка; параметры работы.

Постановка проблемы. Наиболее эффективными средствами тушения пожаров являются огнетушащие вещества, одновременно реализующие несколько механизмов прекращения горения.

Долгое время ученые и специалисты в области горения и тушения пожаров полагали, что у большинства огнетушащих веществ преобладает один из механизмов подавления пламени. Только в последние годы пришло понимание того, что вполне реальным является достижение синергетического эффекта,

который состоит в нарушении принципа аддитивности и проявляется в виде взаимного усиления различных механизмов огнетушащего воздействия.

К числу огнетушащих веществ, реализующих одновременно несколько механизмов подавления пламени, относятся порошковые огнетушащие составы, основу которых составляют фосфорно-аммонийные соли $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ и $(\text{NH}_4)\text{HPO}_4$, карбонат натрия (Na_2CO_3) и гидрокарбонат натрия (NaHCO_3), хлорид калия (KCl) и другие.

В качестве добавок, снижающих слеживаемость и комкование порошковых огнетушащих составов, используются высокодисперсный диоксид кремния SiO_2 , стеараты металлов, тальк, аэросил, что значительно повышает их стоимость.

Огнетушащее действие порошков – комбинированное и определяется следующими механизмами:

- гетерогенное и гомогенное ингибирование цепных реакций горения;
- разбавление горючей среды газообразными продуктами разложения частиц порошка или непосредственно порошковым облаком;
- охлаждающее действие;
- изоляция поверхности горения от окислителя.

При использовании порошковых огнетушащих составов действуют все перечисленные механизмы, но проявляются они в разной степени и с разным вкладом в общий эффект прекращения горения.

Большинство специалистов полагает, что доминирующую роль в порошковом огнетушении играет гетерогенное ингибирование реакций горения, заключающееся в обрыве цепей и гибели активных центров на поверхности частиц порошка [1, 2]. Они не придают должного значения другим механизмам, в частности теплоотводу. Другие считают совершенно очевидным тот факт, что при введении в зону горения порошковые огнетушащие составы отбирают часть теплоты на разогревание и испарение частиц порошка. В качестве примера приводится известный факт, что при замене одного из самых эффективных огнетушащих порошков типа Моппех тонкоразмолотым кирпичом или сухим цементом их требуемый расход будет всего на 20...30 % больше, чем расход дорогостоящего порошка [3].

Один из путей дальнейшего повышения эффективности пожаротушения – создание комбинированных огнетушащих средств, причем правильный подбор и комплексное сочетание компонентов комбинированных составов должно обеспечивать их синергизм.

Анализ последних исследований и публикаций. Первыми попытками создания комбинированных огнетушащих веществ были разработки технологии получения пены, в газовой среде которой находились порошкообразные составы.

При использовании обычной воздушно-механической пены наличие кислорода в ее газовой фазе повышает его концентрацию в очаге пожара. Применение инертно-механической пены на основе азота или диоксида

углерода ограничено из-за малой производительности устройств получения N_2 и CO_2 .

Как оказалось, использование пены одновременно с порошковым огнетушащим составом ухудшает структурно-механические свойства пены и фактически приводит к ее разрушению еще до поступления в очаг пожара.

НИИГД «Респиратор» были проведены эксперименты по тушению модельных очагов пожара класса В [4]. Тушили в различной последовательности: одновременно порошком и воздушно-механической пеной, отдельно порошком и воздушно-механической пеной, последовательно порошком, а затем пеной. При использовании одного порошка было потушено примерно 70...80 % горячей поверхности. При тушении очага пожара одной пеной (кратностью 50...70) было потушено не более 50 % горячей поверхности. Одновременное применение порошка и пены также оказалось нецелесообразным ввиду интенсивного механического разрушения ячеек пены порошком, подаваемым на очаг пожара под высоким давлением. Лишь последовательное применение порошка для тушения пламени, а затем пены для охлаждения бортов и заполнения противня дало положительный результат.

Таким образом, путь создания средств тушения пожаров посредством одновременной подачи порошка и пены – малоэффективен. Нецелесообразным является и способ одновременной подачи порошка и распыленной воды, поскольку капли воды, смачивая частицы порошка, ухудшают их аэродинамические свойства и затрудняют доставку к очагу пожара.

В работе [5] предложено применение комбинированных составов, полученных путем пропитки огнетушащих порошков жидкими хладонами. К ним относятся, например, состав СИ-2 – порошок силикагеля, обработанный хладоном 114В2. Помимо отрицательного воздействия на экологическую обстановку, это еще и дорогостоящее средство.

Весьма перспективным направлением повышения огнетушащей эффективности средств комбинированного пожаротушения является создание «смесевых» огнетушащих порошков, составные компоненты которых обладают разными доминирующими механизмами прекращения горения [6]. Один из вариантов – одновременная подача огнетушащих порошков и аэрозолей.

Цель исследования – обоснование параметров аэрозольно-порошковой установки пожаротушения для обеспечения синергетического эффекта при действии бинарной комбинации огнетушащих веществ.

Материалы и результаты исследования. Наиболее эффективным комбинированным способом объемного пожаротушения является совместное тушение пламени порошками и аэрозольобразующими составами.

Твердые аэрозольобразующие составы – качественно новый вид комбинированного газопорошкового пожаротушения, заключающегося в заполнении защищаемого объема тонкодиспергированным аэрозолем и инертными газами (N_2 , CO_2), образующимися при сжигании твердотопливной композиции.

Наряду с несомненными достоинствами:

- высокая огнетушащая способность;
- широкий диапазон условий эксплуатации (температура от минус 60 до плюс 60 °С, любая влажность и т.д.);
- длительный срок хранения и пригодности к работе, – твердые аэрозольобразующие составы имеют и существенные недостатки:
 - высокая температура образующегося аэрозоля;
 - возможный выброс открытого пламени из генераторов твердых аэрозольобразующих составов;
 - затруднение доставки аэрозоля к очагу пожара вследствие малых размеров и соответственно низкой кинетической энергии наночастиц аэрозоля.

Последний недостаток устраняется совместным применением порошковых и твердых аэрозольобразующих составов. Частицы порошка выполняют роль матрицы, доставляя на себе наночастицы аэрозоля в зону горения, что заметно повышает огнетушащую эффективность порошков. В свою очередь, образующиеся при сгорании твердых аэрозольобразующих составов нейтральные газы можно использовать в качестве энергоносителя для вспушивания порошка и его транспортирования вместе с частицами аэрозоля к очагу пожара. Это позволяет полностью или частично отказаться в средствах пожаротушения от баллонов со сжатым воздухом.

Правильный подбор и количественное соотношение порошковых и твердых аэрозольобразующих составов обеспечивает синергетический эффект, поэтому обоснование параметров аэрозольно-порошковой установки пожаротушения – актуальная задача.

Несмотря на различия в составе, твердые аэрозольобразующие композиции, как правило, содержат неорганический окислитель (KNO_3 , KClO_4) и органическое горючее (например, эпоксидные смолы, синтетические смолы, каучуки и т.п.). Газовая фаза аэрозоля состоит в основном из азота и диоксида углерода, а твердая фаза – из K_2CO_3 , KHCO_4 , KCl .

Огнетушащая способность частиц порошка и аэрозоля повышается пропорционально корню квадратному их дисперсности. Поэтому огнетушащая эффективность твердых аэрозольобразующих составов, размер частиц которых примерно на три порядка меньше размеров частиц обычных порошков, не менее чем в 15...20 раз превышает эффективность обычных порошковых огнетушащих составов [7, 8]:

$$\varphi_{\text{ПОС}} = k\varphi_{\text{ТАОС}}\sqrt{\frac{d_{\text{ПОС}}}{d_{\text{ТАОС}}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{ПОС}}$, $\varphi_{\text{ТАОС}}$ – тушащая концентрация порошкового и твердого аэрозольобразующего состава, кг/м^3 , соответственно;

k – коэффициент пропорциональности;

$d_{\text{ПОС}}$, $d_{\text{ТАОС}}$ – диаметры частиц порошкового огнетушащего состава и твердого аэрозольобразующего состава соответственно, мкм.

Пусть удельная скорость выгорания горючего материала U_0 , кг/(м²·с), площадь поверхности горения S_0 , м². Тогда расходы порошкового и твердого аэрозольобразующего состава для прекращения горения $q_{\text{ПОС}}$, $q_{\text{ТАОС}}$, кг/с, равны

$$q_{\text{ПОС}} = U_0 S_0 \frac{\varphi_{\text{ПОС}}}{\varphi_{\text{Г}}}; \quad (2)$$

$$q_{\text{ТАОС}} = U_0 S_0 \frac{\varphi_{\text{ТАОС}}}{\varphi_{\text{Г}}}, \quad (3)$$

где $\varphi_{\text{Г}}$ – концентрация горючего в стехиометрической смеси, кг/м³.

Предположим, что часть горящей поверхности X тушат порошком, а остальную $(1 - X)$ – аэрозолем. Время тушения $\tau_{\text{Т}}$, с. Тогда количество порошкового и твердого аэрозольобразующего состава $m_{\text{ПОС}}$ и $m_{\text{ТАОС}}$, кг, необходимое для тушения:

$$m_{\text{ПОС}} = U_0 S_0 X \frac{\varphi_{\text{ПОС}}}{\varphi_{\text{Г}}} \tau_{\text{Т}}; \quad (4)$$

$$m_{\text{ТАОС}} = U_0 S_0 (1 - X) \frac{\varphi_{\text{ТАОС}}}{\varphi_{\text{Г}}} \tau_{\text{Т}}. \quad (5)$$

Общий расход порошкового огнетушащего состава и твердого аэрозольобразующего состава равен

$$\begin{aligned} m &= m_{\text{ПОС}} + m_{\text{ТАОС}} = \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}}}{\varphi_{\text{Г}}} [\varphi_{\text{ПОС}} X + \varphi_{\text{ТАОС}} (1 - X)] = \\ &= \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}} \varphi_{\text{ТАОС}}}{\varphi_{\text{Г}}} \left[k \sqrt{\frac{d_{\text{ПОС}}}{d_{\text{ТАОС}}}} + 1 - X \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Выбор количественного соотношения между массами порошкового и твердого аэрозольобразующего состава в средствах комбинированного пожаротушения должен определяться исходя из принципа минимизации времени тушения $\tau_{\text{Т}} \rightarrow \min$, общей массы огнетушащих веществ и как следствие их стоимости:

$$\sum_{i=1} m_i = \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}} \varphi_{\text{ПОС}} X}{\varphi_{\text{Г}}} + \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}} \varphi_{\text{ТАОС}} (1 - X)}{\varphi_{\text{Г}}} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1} m_i c_i = \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}} \varphi_{\text{ПОС}} X c_1}{\varphi_{\text{Г}}} + \frac{U_0 S_0 \tau_{\text{Т}} \varphi_{\text{ТАОС}} (1 - X) c_2}{\varphi_{\text{Г}}} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где c_1, c_2 – себестоимость 1 кг порошкового огнетушащего состава и твердого аэрозольобразующего состава, руб., соответственно.

Предположим, что вытеснение аэрозольно-порошковой смеси из емкости установки (огнетушителя) и ее доставка к очагу пожара производится газами, образующимися при сгорании аэрозольобразующего заряда. Их расход G_T , м³/с, определяют по уравнению [4]

$$G_T = \frac{S_T U_T \gamma_T (1 - Z_T) \bar{P}^v}{\gamma_T}, \quad (9)$$

где S_T – поверхность горения аэрозольобразующего заряда, м²;

U_T – линейная скорость горения аэрозольного заряда, м/с;

v – безразмерный коэффициент;

γ_T – плотность образующегося аэрозоля, кг/м³;

γ_G – плотность образующихся газов, кг/м³;

Z_T – доля конденсированных продуктов сгорания;

$\bar{P} = \frac{P}{P_a}$ – безразмерное давление в емкости установки;

P – фактическое давление в емкости установки, Па;

P_a – атмосферное давление, Па.

Поверхность горения аэрозольобразующего заряда, имеющего форму цилиндра диаметром D , в приближении $D = \text{const}$, определяют по уравнению

$$S_T = \pi D h + \pi D^2 / 4, \quad (10)$$

где h – длина горячей части заряда, определяемая по закону скорости горения:

$$\frac{dh}{d\tau} = U_T \bar{P}^v. \quad (11)$$

Изменение массы газовой смеси в емкости установки со временем τ описывает уравнение [4]

$$\frac{dm_T}{d\tau} = G_T - G_{\text{ТР}}, \quad (12)$$

где m_T – масса газовой смеси, кг;

τ – время, с;

$G_{\text{ТР}}$ – расход газовой смеси, обеспечивающий транспортирование смеси аэрозоля и порошка по выдочной магистрали установки и выброс из распылителя, м³/с.

С другой стороны, состояние газовой смеси в емкости установки, представляющей собой проточную камеру переменного объема V , может быть описано следующим уравнением:

$$\frac{dm_{\Gamma}}{d\tau} = \frac{P}{R_{\text{см}}T_{\text{см}}} \frac{dV}{d\tau} + \frac{V}{kR_{\text{см}}T_{\text{см}}} \frac{dP}{d\tau}, \quad (13)$$

где $R_{\text{см}}$ – постоянная газовой смеси, Дж/(кг·К);

$T_{\text{см}}$ – температура газовой смеси в емкости установки, К.

Расход $G_{\text{тр}}$ выразим через расход аэрозольно-порошковой смеси $G_{\text{па}}$ и ее массовую долю C :

$$G_{\text{тр}} = G_{\text{па}}/c. \quad (14)$$

Результаты исследований работы аэрозольно-порошковых установок [4] показали, что расход смеси порошка и аэрозоля может быть определен по эмпирической формуле

$$G_{\text{па}} = \mu \sqrt{(P + P_a)B}, \quad (15)$$

где μ – коэффициент расхода распылителя;

B – эмпирический коэффициент сопротивления выдачной магистрали.

Массовая доля смеси связана с давлением в емкости установки следующим соотношением:

$$C = 246035(P + P_a)^{-0,576}. \quad (16)$$

Объем, занимаемый газовой смесью в емкости с аэрозольно-порошковым составом, равен

$$V(\tau) = V_0 + \frac{m_{\text{па}}(\tau)}{\rho_{\text{п}}}, \quad (17)$$

где V_0 – начальный свободный объем, м³;

$$V_0 = V_e - \frac{M_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}; \quad (18)$$

V_e – вместимость установки, м³;

$M_{\text{п}}$ – масса заряда порошка в установке, кг;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность порошка, кг/м³;

$m_{\text{па}}(\tau) = \int_0^{\tau} G_{\text{па}} d\tau$ – масса выбрасываемой смеси порошка и аэрозоля, кг.

Приравнивая правые части уравнений (12) и (13), с учетом выражений (14) – (18) получим для описания работы установки следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP}{d\tau} = \left[\frac{S_{\Gamma} U_{\Gamma} \gamma_{\Gamma} (1 - Z_{\Gamma}) \left(\frac{P}{P_a}\right)^{\nu}}{\gamma_{\Gamma}} - \frac{\mu \sqrt{B(P+P_a)} P}{T_{\text{см}} R_{\text{см}} \rho_{\Pi}} - \frac{\mu \sqrt{B(P+P_a)}}{246035 (P+P_a)^{-0.576}} \right] \frac{k R_{\text{см}} T_{\text{см}}}{V(\tau)}; \\ V(\tau) = V_0 + \int \frac{\mu \sqrt{B(P+P_a)}}{\rho_{\Pi}} d\tau; \quad m_{\text{па}}(\tau) = \int_0^{\tau} \mu \sqrt{B(P+P_a)} d\tau \end{cases} \quad (19)$$

с начальными условиями при $\tau = 0$:

$$P = P_a; \quad V = V_0; \quad m_{\text{па}} = 0. \quad (20)$$

Окончание работы установки происходит в момент $\tau_{\text{кон}}$:

$$V = V_e; \quad m_{\text{па}} = M_{\Pi} + M_a,$$

где M_a – масса образующегося при сгорании аэрозольобразующего заряда аэрозоля.

Выдача аэрозольно-порошковой смеси начинается с момента срабатывания обратного клапана, то есть при $P = P_{\text{кл}}$, где $P_{\text{кл}}$ – давление срабатывания обратного клапана, Па. Следовательно, необходимо ввести следующее условие:

$$\mu = \begin{cases} 0, & \text{если } P < P_{\text{кл}}; \\ 309,6 d^{2,7}, & \text{если } P \geq P_{\text{кл}}, \end{cases} \quad (21)$$

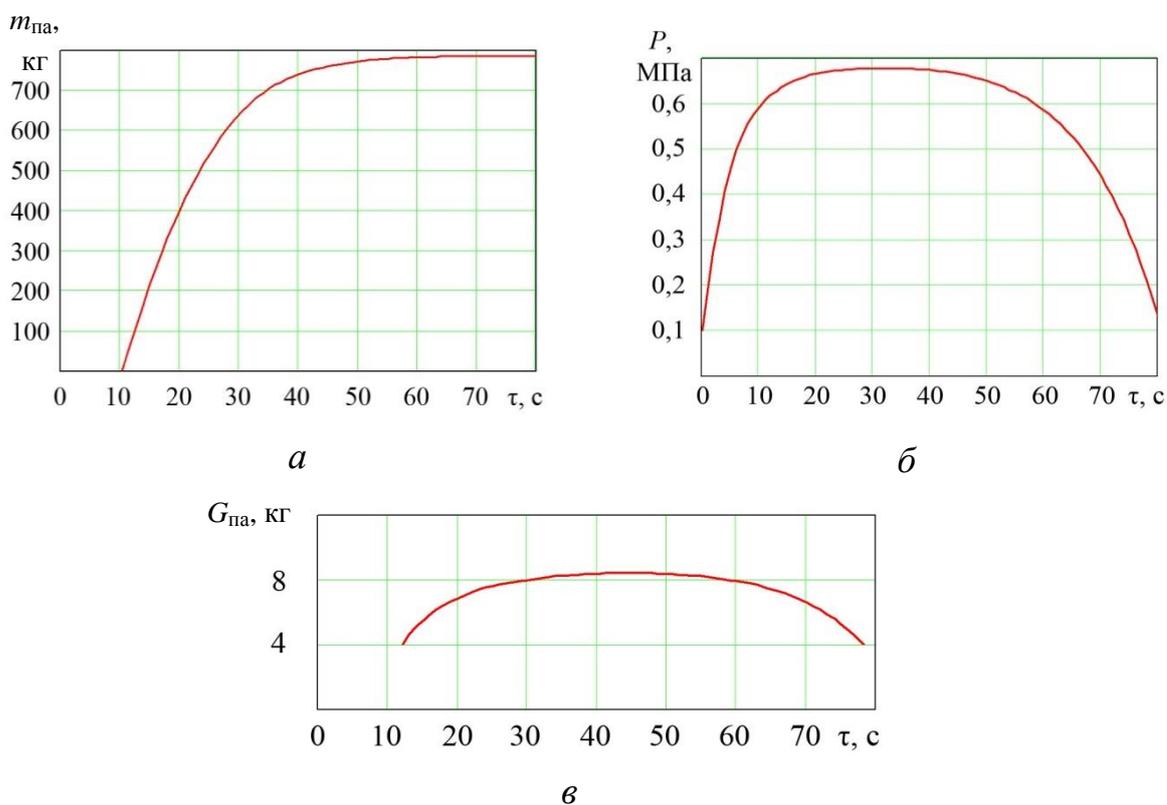
где d – диаметр выдачного отверстия установки, м.

Прекращение горения аэрозольобразующего заряда фиксируется в момент, когда $h(\tau) = L$, где L – длина аэрозольного заряда, м. Варьируя длину L одного заряда или их количество с фиксированной длиной, можно регулировать время работы аэрозольно-порошковой установки.

Для расчета параметров работы установки сделаем допущение, что $T_{\text{см}} \approx T_1$, то есть газы, образующиеся при сгорании твердого аэрозольобразующего состава, охлаждаются при поступлении в емкость с порошковым огнетушащим составом до температуры воздуха T_1 .

Система уравнений (19) с начальными условиями (20) и ограничениями (21) реализовалась на ЭВМ численно по методу Рунге-Кутты второго порядка аппроксимации. Система интегрировалась на отрезке $0 \leq \tau \leq 80$ с с шагом по времени $\tau_h = 1$ с.

На рисунке представлено изменение давления в емкости P , расхода $G_{\text{па}}$ и массы выбрасываемой смеси порошка и аэрозоля $m_{\text{па}}$, если $M_{\Pi} = 800$ кг; $\rho_{\Pi} = 800$ кг/м³; $\gamma_{\Gamma} = 1910$ кг/м³; $Z_{\Gamma} = 0,45$; $U_{\Gamma} = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\nu = 0,37$; $k = 1,41$; $P_a = 1,01 \cdot 10^5$ Па; $R_{\text{см}} = 280$ Дж/(кг·К); $T_1 = 313$ К; $D = 0,100$ м; $d = 0,025$ м.



Изменение параметров работы установки аэрозольно-порошкового пожаротушения во времени:

a – изменение массы выбрасываемой смеси порошка и аэрозоля; *б* – изменение давления в емкости установки; *в* – изменение расхода

Аэрозольобразующий заряд обеспечивает нарастание давления в свободном объеме установки до 0,65 МПа за время 12 с. Концентрация аэрозоля в смеси повышается и огнетушащая эффективность с течением времени возрастает.

Выводы. Полученные результаты исследований позволили оптимизировать соотношение массы порошкового и твердого аэрозольобразующего огнетушащих составов в емкости установки, что позволяет достичь синергетического эффекта при их совместном действии и добиться повышения эффективности объемного аэрозольно-порошкового метода тушения пожаров.

Список литературы / References

1. Порошковое пожаротушение / А.Н. Баратов, Л.П. Вогман, Д.В. Бухтояров, А.Л. Чибисов // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 120 – 122.

Baratov, A.N., Vogman, L.P., Bukhtoyarov, D.V., Chibisov, A.L. *Poroshkovoye pozharotusheniye* [Dry powder fire-extinguishing]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, no. 2, pp. 120 – 122.

2. Баратов, А.Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность / А.Н. Баратов. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.

Baratov, A.N. *Goreniye – Pozhar – Vzryv – Bezopasnost'* [Combustion – Fire – Explosion – Safety]. Moscow, FGU VNIPO MChS Rossii Publ., 2003, 364 p.

3. Абдурагимов, И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения/ И.М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т.21, № 4. – С. 60 – 82.

Abduragimov, I.M. *O mekhanizmax ognetushashchego deystviya sredstv pozharotusheniya* [On fire-fighting mechanisms of fire-extinguishing means]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60 – 82.

4. Булгаков, Ю.Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах / Ю.Ф. Булгаков. – Донецк: НИИГД, 2001. – 280 с.

Bulgakov, Yu.F. *Tusheniye pozharov v ugol'nykh shakhtakh* [Fighting the fires in coal mines]. Donetsk, NIIGD Publ., 2001, 280 p.

5. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, М.П. Миронов, С.Н. Пазникова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 274 с.

Markov, V.F., Maskayeva, L.N., Mironov, M.P., Paznikova, S.N. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physicochemical basic foundation of development and fighting the fires]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009, 274 p.

6. Спичкин, Ю.В. Современное состояние физико-химических представлений об особенностях прекращения горения с использованием дисперсных материалов / Ю.В. Спичкин, А.В. Калач, Ю.Н. Сорокина // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России, 2014. – Вып. 2 (11). – С. 7 – 12.

Spichkin, Yu.V., Kalach, A.V., Sorokina, Yu.N. *Sovremennoye sostoyaniye fiziko-khimicheskikh predstavleniy ob osobennostyakh prekrashcheniya goreniya s ispol'zovaniyem dispersnykh materialov* [The up-to-date state of physicochemical ideas about peculiarities of burn termination with the use of disperse materials]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of the Voronezh institute of the GPS MChS Rossii]. 2014, issue 2 (11), pp. 7 – 12.

7. Корольченко, Д.А. Тушение пламени огнетушащими порошками и аэрозольными составами / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т.23, № 8. – С. 63 – 68.

Korol'chenko, D.A., Sharovarnikov, A.F. *Tusheniye plameni ognetushashchimi poroshkami i aerezol'nyimi sostavami* [Fighting the flame with fire-extinguishing dry powders and aerosol compositions]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 63 – 68.

8. Копылов, С.Н. Эволюция средств объемного пожаротушения: от озоноразрушающих агентов до огнетушащих веществ с коротким временем жизни в атмосфере / С.Н. Копылов, В.В. Агафонов, Н.П. Копылов // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 123 – 130.

Kopylov, S.N., Agafonov, V.V., Kopylov, N.P. *Evolyutsiya sredstv ob'yemnogo požarotusheniya: ot ozonorazrushayushchikh agentov do ognetushashchikh veshchestv s korotkim vremenem zhizni v atmosphere* [Evolution of volumetric fire-fighting means: from ozone-breaking agents up to fire-extinguishing substances with the short lifetime in the atmosphere]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, no. 2, pp. 123 – 130.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 16.02.2018

*Aleksey Aleksandrovich Kostrubitskiy, Minister, e-mail: mchs-dnr@mail.ru
The Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters
283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-28;
Darya Fyodorovna Balta, scientific associate; e-mail: balta_daria@mail.ru;
Igor Felixovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-40*

INCREASE IN THE FIRE-FIGHTING EFFICIENCY OF AEROSOL-DRY POWDER FIRE-EXTINGUISHING MEANS

Purpose. Substantiation of parameters of the aerosol-dry powder fire-extinguishing installation to guarantee the synergetic effect by influence of the binary combination of fire-fighting substances.

Methods. Analytical investigations of the fire-fighting substances and their dominating flame suppression mechanisms; calculation of the operation parameters of the aerosol-dry powder fire-extinguishing means.

Results. The aerosol-dry powder method of extinguishing the fires based on manifestation of several burn termination mechanisms at the same time by the fire-fighting substances was considered. An attempt was made to refuse the compressed air as the energy carrier in the dry powder fire-extinguishing means fully or partially by the use of its substitution for gases generating by combustion of a solid aerosol-formative composition. The calculation of the parameters of the aerosol-dry powder fire-extinguishing installation in the process of outflow of the fire-fighting substance was fulfilled. The design formulae to determine pressure in the volume of the installation, consumption and mass of the mixture of dry powder and aerosol thrown off were obtained.

Scientific novelty. The ratio of the mass of the dry-powder and solid aerosol-formative compositions in the volume of the installation was optimized, what guarantees the appearance of the synergetic effect by their action.

Practical value. The investigation results obtained permit to increase the efficiency of the volume aerosol-dry powder extinguishing of the fires by means of the joint action of the binary combination of the fire-fighting substances.

Key words: *flame extinguishing; fire-extinguishing substance; mechanism of burn termination; combined fire-extinguishing method; synergetic effect; aerosol-dry powder composition; installation; operation parameters.*

УДК [622.822.7:614.844.2 „Завеса”]:001.891.572

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

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

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ В ЛАВАХ

Цель – моделирование подземных экзогенных пожаров в лавах для расчета их параметров и параметров водяных завес, устраиваемых на сопряжении лав с вентиляционными штреками.

Методика основана на использовании математической модели подземных экзогенных пожаров в проветриваемых горных выработках и математической модели охлаждения нагретого газозоудушного потока в водяной завесе.

Результаты. Предложена методика расчета параметров экзогенного пожара в лаве, в которую входят аналитические зависимости для расчета пожарной нагрузки в лаве и температуры газозоудушного потока. В пожарную нагрузку включены: минеральное масло в редукторе и других узлах добычного комбайна и прочих механизмах и оборудовании, входящих в состав механизированного комплекса в лаве, просыпавшийся уголь на почве лавы, электрические гибкие кабели, метан, выделяющийся из поверхности угольного пласта. Рассчитывают: тепловую мощность пожара, длину зон горения и тления, дальность распространения пожара по лаве, температуру в зоне горения и на выходе из лавы на вентиляционный штрек. На основе этих данных определяют количество центробежно-струйных распылителей (установок), которые необходимо разместить на сопряжении лавы с вентиляционным штреком.

Научная новизна. Результаты исследований закономерностей горения горючих материалов в лавах угольных шахт позволяют повысить эффективность локализации пожаров водяными завесами.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при выборе средств локализации подземных пожаров распыленной водой и оценке их эффективности.

Ключевые слова: лава; вентиляционный штрек; сопряжение; локализация; горючая нагрузка; температура; поток; водяная завеса; установка.

Постановка проблемы. В последние годы в угольной промышленности Донецкой Народной Республики (далее – ДНР) и Российской Федерации (далее – РФ) добыча угля на пластах пологого падения осуществляется в механизированных лавах. Это позволило повысить производительность труда в очистных забоях и по шахте в целом, снизить себестоимость добываемого угля, повысить механизацию труда. В то же время это привело к повышению пожарной опасности лав.

Выемочные комплексы характеризуются повышенной экзогенной пожароопасностью из-за большого количества в них горючих материалов и электрооборудования. В качестве рабочих жидкостей в комплексах, особенно предшествующего поколения, в основном применяют минеральные масла, а в качестве маслопроводов используют резиновые шланги высокого давления.

Доставка угля в лавах, оборудованных механизированными выемочными комплексами, производится скребковыми конвейерами с гидромuftами, в которых также применяют минеральное масло. В некоторых лавах для передвижения конвейеров, а также для распора тумб применяют гидродомкраты

и маслостанции, снабженные специальными предохранительными клапанами. При их неисправности происходит разрыв трубопроводов и выброс перегретого масла наружу. Аварии такого вида представляют особенно большую опасность, так как маслостанции размещаются со стороны выработанного пространства и при распространении огня пожары приобретают затяжной характер и наносят значительный материальный ущерб.

Эндогенная пожароопасность действующих выемочных участков на пологих и наклонных пластах угля, склонного к самовозгоранию, определяется следующими факторами:

- количеством разрыхленных потерь угля в отработанном пространстве;
- наличием аэродинамической связи изолированного пространства с отработанными пространствами на выше- или нижележащих сближенных пластах;
- способом проветривания выемочного участка;
- достоверностью контроля газового состава воздуха в лаве [1].

По мере увеличения глубины ведения горных работ и повышения производительности очистных механизированных комплексов при отработке газоносных пластов возникают проблемы с удалением метана, выделяющегося из выработанного пространства в очистные забои, проветриваемые возвратно-точечным способом.

Очаги самовозгорания угля, как правило, обнаруживаются не в ранней стадии и приводят к вспышкам метана в выработанном пространстве. Таким образом, эндогенный пожар переходит в экзогенный, который, в свою очередь, выходит из лавы на вентиляционный штрек и далее распространяется по шахте. Так, пожар, возникший 14.04.2013 в 1-й западной лаве пл. l_4 шахты «Комсомолец Донбасса» (ДНР), вышел на 12-й западный вентиляционный штрек и далее распространился по шахте, причинив ущерб в 5 млн руб. Аналогично пожар в 1-й северной лаве шахты им. А.Г. Стаханова через вентиляционный штрек вышел в смежные выработки и нанес ущерб в 8 млн руб.

29 июня 2011 г. на шахте «Комсомолец Донбасса» в результате нарушения паспорта буровзрывных работ в 3-й восточной лаве пл. l_6 произошло возгорание метановоздушной смеси. Из-за отсутствия завесы на сопряжении пожар не удалось локализовать. Аварийный участок был изолирован и затоплен. Ущерб превысил 5 млн руб.

28 июля 2013 г. произошел пожар на шахте «Большевик» (РФ). Источником воспламенения метановоздушной смеси стал локальный эндогенный очаг самовозгорания угля в деформированной краевой части целика между конвейерным и откатным штреками. Источником образования метановоздушной смеси являлось естественное выделение метана из вмещающего массива и поступление свежего воздуха в закрепное пространство.

Тушение пожара в лавах с углом падения пласта до 30° и мощностью пласта более 0,7 м обычно производят снизу вверх путем активного

воздействия на очаги компактными струями воды. Одновременно с этим для предотвращения выхода огня на вентиляционный штрек на сопряжении его с лавой или вблизи нее на расстоянии 5...15 м устанавливают водяную завесу.

Для безопасного прокладывания пожарных рукавов по вентиляционному штреку и установки водяной завесы производят местное или общешахтное реверсирование вентиляционной струи на аварийном участке (при отсутствии угрозы скопления в районе очага пожара горючих газов взрывоопасной концентрации) с последующим ее закорачиванием через ближайшую выработку на общую исходящую струю крыла или шахты в целом. Если в выработках с исходящей из лавы вентиляционной струей высокая температура отсутствует, то прокладывание рукавов по вентиляционному штреку и установку завес производят при нормальном режиме проветривания, однако подачу воды и других средств пожаротушения на очаг в этот период прекращают во избежание парообразования и повышенной влажности по ходу движения пожарных газов.

В конце XX в. НИИГД «Респиратор» для постановки водяных завес на вентиляционных штреках (на расстоянии не более 50 м от сопряжения с лавой) была разработана автоматическая установка УВЗ-2.

Установку с тросовой системой запуска и полидефлекторными оросителями монтировали на противопожарном трубопроводе, она предназначалась для защиты выработок с площадью сечения от 4 до 9 м² и расходом воды на 1 м² сечения выработки от 5 до 9 м³/ч.

Применение установки регламентировали требования Правил пожарной безопасности на угольных шахтах. Однако в Правилах пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР (2016) требование обязательного оснащения сопряжений лав со штреками водяными завесами по настоянию эксплуатационников было снято.

Таким образом, для локализации пожаров в лавах необходимо устанавливать водяные завесы в оперативном режиме при возникновении пожаров. Для этих целей в НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР разработана установка «Бус-1» с центробежно-струйными распылителями. Однако адекватная методика расчета параметров этих завес в настоящее время отсутствует.

Анализ последних публикаций. В работах [1-3] проанализированы причины возникновения экзогенных и эндогенных пожаров в лавах ряда каменноугольных шахт Российской Федерации, однако каких-либо рекомендаций по локализации этих пожаров водяными завесами или расчетов параметров завес не приведено.

Цель исследования. Необходимо рассчитать параметры пожаров, возникающих в лавах, и на основе результатов расчетов обосновать параметры водяной завесы для оперативной локализации этих пожаров.

Материалы и результаты исследований. Для определения параметров водяной завесы, устанавливаемой для локализации пожара в лаве, необходимо

рассчитать его параметры – дальность и скорость распространения, температуру в зоне горения и на выходе из лавы.

Воспользуемся для этого методикой, разработанной НИИГД «Респиратор» и представленной в Руководстве по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения и локализации (2017).

В состав горючих материалов в лаве входят:

- гибкие силовые электрические кабели;
- минеральное масло в редукторе и других узлах комбайна и прочего оборудования в лаве;
- метан, выделяющийся с обнаженных поверхностей угольного массива (пласта);
- разрыхленный просыпавшийся уголь на почве.

Масса горючих материалов на единицу длины лавы m , кг/м:

$$m = m_{\text{мин}} + m_k + m_{\text{мет}} + m_y, \quad (1)$$

где $m_{\text{мин}}$ – масса минерального масла и других ГСМ на единицу длины лавы, кг/м;

$m_k = \sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,07)$ – суммарная масса гибких электрических кабелей на единицу длины лавы, кг/м;

S_k – площадь сечения k -го кабеля ($k = 1, \dots, N$), мм²;

N – количество кабелей в лаве;

$m_{\text{мет}} = \frac{m_{\text{мет}}^{\circ} S_{\text{пл}}}{L_{\text{л}}}$ – масса метана на единицу длины лавы, кг/м;

$m_{\text{мет}}^{\circ}$ – масса метана, выделяющаяся с единицы обнаженной площади угольного пласта, кг/(м²·с);

$S_{\text{пл}}$ – площадь пласта, с которой выделяется метан, м²;

$L_{\text{л}}$ – длина лавы, м.

Учитывая метановыделение из выработанного пространства лавы, которое не менее метановыделения из пласта, принимаем $m_{\text{мет}} = 2m_{\text{мет}}^{\circ} S_{\text{пл}}/L_{\text{л}}$.

Предполагаем, что весь метан, выделившийся из пласта и выработанного пространства за единицу времени, полностью сгорает за тот же промежуток времени. При отсутствии метановыделения в лаве $m_{\text{мет}} = 0$.

Объем воздуха, необходимый для полного выгорания всех горючих материалов, размещенных на 1 м лавы, м³:

$$q_0 = \sum_{i=1}^Z m_i q_{\text{уд},i}, \quad (2)$$

где m_i – пожарная нагрузка материалов i -го вида на 1 м лавы, кг/м;

$q_{\text{уд},i}$ – удельный расход воздуха на сгорание горючего материала i -го вида, м³/кг;

Z – количество горючих материалов в лаве.

Согласно справочным данным: $q_{уд.мас} = 12 \text{ м}^3/\text{кг}$; $q_{уд.каб} = 10 \text{ м}^3/\text{кг}$;
 $q_{уд.мет} = 13 \text{ м}^3/\text{кг}$; $q_{уд.угл} = 8 \text{ м}^3/\text{кг}$;

Тогда из уравнения (1) получаем

$$q_0 = 8m_{мин} + 10\sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,07) + 26 \frac{m_{мет}S_{пл}}{L_л} + 12m_y. \quad (3)$$

Периметр горячей поверхности в лаве включает: мощность угольного пласта, суммарный периметр силовых и сигнальных кабелей и ширину лавы по почве. Предполагаем, что просыпавшийся уголь распределяется по всей ширине лавы:

$$P = \sum_{k=1}^N 2 \cdot 10^{-6} \sqrt{S_k} + \frac{S_{пл}}{L_л} + B_л, \quad (4)$$

где $B_л$ – ширина лавы (по почве), м.

Тепловая энергия, выделяющаяся при горении, на единицу длины лавы, кДж/м:

$$\Theta = \sum_{i=1}^Z Q_{Hi}^P m_i = 42 \cdot 10^3 m_{мин} + 25 \cdot 10^3 [\sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,07)] \times \\ \times 95 \cdot 10^3 \left(\frac{2m_{мет}S_{пл}}{L_л} \right) + 31 \cdot 10^3 m_y, \quad (5)$$

где Q_{Hi}^P – низшая теплота сгорания i -го горючего материала, кДж/кг.

Рассчитывают параметры пожара в лаве:

- предельная скорость распространения $V_{пр}$, м/с

$$V_{пр} = \frac{VS_л}{q_0}, \quad (6)$$

где V – скорость вентиляционного потока в лаве, м/с;

$S_л$ – площадь поперечного сечения лавы, м^2 ;

- тепловая мощность пожара W , кВт

$$W = V_{пр}\Theta, \quad (7)$$

- предельная температура в очаге пожара T^* , К

$$T^* = T_0 + a \frac{W}{VS_л}, \quad (8)$$

где a – тепловой эквивалент работы, $\text{К} \cdot \text{м}^3/\text{кДж}$; $a = 0,622$;

- предельная длина зоны горения

$$l_{\text{пр}} = V_{\text{пр}}\tau_{\text{г}}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{г}}$ – время выгорания пожарной нагрузки, с.

Скорость распространения пожара по лаве $V_{\text{р}}$, м/с, на момент времени τ , с:

$$V_{\text{р}} = V_{\text{пр}} \frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 + 1,44 \cdot 10^8}}. \quad (10)$$

Дальность распространения пожара при его свободном развитии на момент времени τ , с:

$$L_{\text{п}} = V_{\text{пр}}(\sqrt{\tau^2 + 1,44 \cdot 10^8} - 1,2 \cdot 10^4) + \frac{10}{P}, \quad (11)$$

где $L_{\text{п}}$ – дальность распространения пожара, м;

P – периметр горящих поверхностей, м.

Длина зоны тления:

$$L_{\text{тл}} = V_{\text{пр}}(\sqrt{(\tau - \tau_{\text{г}i})^2 + 1,44 \cdot 10^8} - 1,2 \cdot 10^4) + \frac{10}{P}, \quad (12)$$

где $\tau_{\text{г}i} = \frac{m_i}{V_{\text{г}i}P}$ – продолжительность горения, с, определяемая по наиболее длительно горящему материалу пожарной нагрузки;

$V_{\text{г}i}$ – средняя скорость выгорания i -го компонента пожарной нагрузки, кг/(м²·с).

Длина зоны горения $V_{\text{гор}}$, м:

$$L_{\text{гор}} = L_{\text{п}} - L_{\text{тл}}. \quad (13)$$

Коэффициент нагревания воздушного потока в зоне горения $a_{\text{т}}$, м⁻¹, определяется по формуле

$$a_{\text{т}} = \frac{0,01}{S_{\text{л}}} \left(1,21 + \frac{90,6}{S_{\text{л}}V} \right). \quad (14)$$

Максимальная температура в зоне горения T_{max} , К:

$$T_{\text{max}} = T^* - (T^* - T_0) \exp\left(\frac{-2,821P}{\sqrt{S_{\text{л}}}}\right), \quad (15)$$

где T_0 – температура в лаве до начала пожара, К.

Температура газоздушного потока на выходе из аварийной лавы $T_{\text{к}}$, К:

$$T_{\text{к}} = T_0 + (T_{\text{max}} - T_0) \exp[-a_{\text{т}}(L_{\text{л}} - L_{\text{гор}} - L_{\text{тл}})]. \quad (16)$$

Средняя температура выходящего из лавы газовоздушного потока $T_{\text{ВЫХ}}$, К:

$$T_{\text{ВЫХ}} = T_0 + \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{к}}}{a_{\text{т}}(L - L_{\text{ГОР}} - L_{\text{ТЛ}})} \quad (17)$$

Далее рассчитываем необходимое количество распылителей в установке для создания водяной завесы. Используем методику расчета параметров тушения и локализации подземных пожаров, входящую в Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР.

Температуру газовоздушного потока $T_{\text{г}}$, К, при выходе его из зоны орошения распыленной водой определяем по формуле

$$T_{\text{к}} = T_{\text{ВЫХ}} - \frac{3q_{\text{рас}}N_{\text{рас}}\tau_{\text{к}}\chi\rho_{\text{в}}R}{S_{\text{л}}L_{\text{з}}\rho_{\text{п.г}}C_{\text{п.г}}}, \quad (18)$$

где $q_{\text{рас}}$ – расход воды через один распылитель, м³/с;

$N_{\text{рас}}$ – количество распылителей в зоне орошения;

$\tau_{\text{к}}$ – время полета капли в завесе, с;

χ – доля испарившейся воды;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³; $\rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м³;

R – теплота парообразования воды, Дж/кг; $R = 2502,7 \cdot 10^3$ Дж/кг;

$L_{\text{з}}$ – длина завесы, м; $L_{\text{з}} = V_{\text{к}}\tau_{\text{к}}$;

$V_{\text{к}}$ – скорость капли воды в завесе, м/с;

$\rho_{\text{п.г}}$ – плотность пожарных газов, кг/м³;

$C_{\text{п.г}}$ – удельная теплоемкость пожарных газов, Дж/(кг·К).

Из формулы (18) имеем

$$N_{\text{рас}} = \frac{(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{к}})S_{\text{л}}V_{\text{к}}\rho_{\text{п.г}}C_{\text{п.г}}}{3q_{\text{рас}}\chi\rho_{\text{в}}R}. \quad (19)$$

Долю испарившейся воды χ определяем по эмпирической зависимости

$$\chi = \exp(-ad_{\text{к}}^2/t_{\text{ВЫХ}}), \quad (20)$$

где a – эмпирический коэффициент; $a = 7695$ °С/мм²;

$d_{\text{к}}$ – диаметр капли воды, мм;

$t_{\text{ВЫХ}}$ – температура газовоздушного потока на входе в завесу, К; $t_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{ВЫХ}} - 273$.

Условие эффективности действия завесы:

$$T_{\text{к}} < 473 \text{ К.}$$

Подставляя числовые данные в выражение (19), получаем расчетную формулу

$$N_{\text{рас}} = \frac{(t_{\text{ВЫХ}} - 200) S_{\text{л}} V_{\text{к}} \rho_{\text{п.г}}(t_{\text{ВЫХ}}) C_{\text{п.г}}(t_{\text{ВЫХ}})}{7,51 \cdot 10^3 \chi(t_{\text{ВЫХ}})} \quad (21)$$

В качестве распылителя в установке используем центробежно-струйный распылитель с расходом $q_{\text{рас}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и диаметром капли $d_{\text{к}} = 30 \text{ мкм}$.

Скорость капли определяем по приближенной формуле

$$V_{\text{к}} = \sqrt{120 P_{\text{п}}} - V,$$

где $P_{\text{п}}$ – давление воды в противопожарном трубопроводе, МПа.

В зависимости от температуры и скорости газоздушного потока, выходящего из аварийной лавы с площадью сечения $S_{\text{л}}$ на вентиляционный штрек, и давления воды в противопожарном трубопроводе рассчитывают необходимое количество распылителей для снижения температуры до безопасного в пожарном отношении значения. Значения $\rho_{\text{п.г}}(t_{\text{ВЫХ}})$ и $C_{\text{п.г}}(t_{\text{ВЫХ}})$ определяют по таблицам физических величин в зависимости от температуры потока.

Выводы. Представлена модель расчета параметров водяной завесы для оперативной локализации пожара в лаве. Модель позволяет рассчитать необходимое количество распылителей (установок), размещаемых на сопряжении лав с вентиляционными штреками в зависимости от температуры и скорости газоздушного потока в лаве и ее сечения.

Список литературы / References

1. О результатах расследования аварий на шахтах, отрабатывающих склонные к самовозгоранию пласты / Ли Хи Ун, П.А. Шлапаков, А.И. Кравченко, А.В. Лебедев // Вестник: науч.-техн. журн. – 2013. – № 2. – С. 20 – 28.

Li Khi Un, Shlapakov, P.A., Kravchenko, A.I., Lebedev, A.V. *O rezul'tatakh rassledovaniya avariyy na shakhtakh, otrabatyvayushchikh sklonnyye k samovozgoraniyu plasty* [On results of investigations of accidents at the mines working the seams liable to spontaneous ignition]. *Vestnik: nauch.-tekhn. zhurn. – Bulletin: scientific-technical journal*, 2013, no. 2, pp. 20 – 28.

2. Елизаров, О.Н. Локализация и тушение пожара на выходах угольных пластов и рекультивация провалов шахты «Кадыкчанская» / О.Н. Елизаров, Н.П. Лавров, А.С. Хрулев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 1. – С. 218 – 219.

Yelizarov, O.N., Lavrov, N.P., Khrulyev, A.S. *Lokalizatsiya i tusheniye pozhara na vykhodakh ugol'nykh plastov i rekul'tivatsiya provalov shakhty "Kadykchanskaya"* [Localization and extinguishing the fire at coal bassets and rehabilitation of caves on the day surface of the "Kadykchanskaya" mine]. *Gornyy*

informatsionno-analiticheskiy byulleten' – The mining information-analytical bulletin, 2003, no. 1, pp. 218 – 219.

3. Условия формирования двух крупных аварий на угольных шахтах / А.Ф. Галанин, Е.В. Артамонов, Р.Б. Заугольникова, Е.Г. Зайцева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 87 – 89.

Galanin, A.F., Artamonov, Ye.V., Zaugol'nikova, R.B., Zaytseva, Ye.G. *Usloviya formirovaniya dvukh krupnykh avariy na ugol'nykh shakhtakh* [Conditions of formation of two large-scale accidents at coal mines]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kuzbas state technical university*, 2010, no. 2, pp. 87 – 89.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 21.02.2018

Andrey Yuryevich Kolyada, head of department, e-mail: kolyada1980@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) 332-78-39

LOCALIZATION OF UNDERGROUND FIRES IN LONGWALL FACES

Purpose. Modeling the underground open fires in the longwall faces to calculate their parameters and parameters of water screens being developed at couplings of the longwall faces with the air roadways.

Methods. The methods are based on the use of the mathematical model of the underground open fires in the ventilated mine workings and of the mathematical model of cooling the heated gas-air flow in a water screen.

Results. The methods of calculation of the parameters of the open fire in the longwall face which parts form the analytical dependences to calculate the fire load in the longwall face and the temperature of the gas-air flow are proposed. The fire load includes: mineral oil in a reduction gear and another units of a winning combine and other mechanisms and equipment entering into the composition of a mechanized complex in the longwall face, coal spilled on the floor of the longwall face, flexible electrical cables, methane emitting from the surface of the coal seam. One calculate: thermal capacity of the fire, length of the combustion and smoldering zones, propagation distance of the fire along the longwall face, temperature in the combustion zone and at the outlet from the longwall face to the air roadway.

On the basis of these data one determine a number of centrifugal sprayers (installations) that should be placed at the coupling of the longwall face with the air roadway.

Scientific novelty. The investigation results of conformities of burning the combustible materials in the longwall faces of the coal mines permit to increase efficiency of localization of the fires with the water screens.

Practical value. The results obtained may be used by choice of the means of localization of the underground fires with water sprayed and by evaluation of their efficiency.

Key words: *longwall face; air roadway; coupling; localization; combustible load; temperature; flow; water screen; installation.*

УДК [622.822:536.244]:001.891.572

Артём Алексеевич Диденко, науч. сотр.; e-mail: didenartem89@gmail.com

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ПОЖАРЕ

Цель. Исследование параметров нагревания горного массива при подземном пожаре в зависимости от его теплофизических свойств и расстояния от очага пожара.

Методика. Математическое моделирование процессов теплообмена. Сравнение результатов моделирования с известными экспериментальными данными.

Результаты. Разработана математическая модель в конечно-разностном виде, с помощью которой исследованы теплообменные процессы в образце горного массива песчаника. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Прослеживается очевидная динамика процесса теплообмена.

В результате исследования подтверждено, что при прогревании горного массива с увеличением расстояния от очага пожара скорость нарастания температур снижается; после прекращения нагревания пород очагом пожара рост температуры в глубине массива прекращается не сразу.

Научная новизна. В отличие от существующих аналитических решений, представляющих собой эмпирические или полуматематические формулы, разработанная математическая модель позволяет исследовать динамику изменения температуры горного массива в любой момент времени, используя при этом параметры реально существующих горных выработок.

Практическая значимость. С помощью разработанной математической модели при различных начальных и граничных условиях можно исследовать теплообменные процессы в горном массиве при подземном пожаре. Параметры нагревания горного массива можно использовать при определении времени локализации и тушения пожара, изоляции горных выработок, а также для предупреждения появления вторичных очагов горения, возникающих при мощном и продолжительном нагревании горных пород и прекращении подачи огнетушащих веществ.

Ключевые слова: математическое моделирование; теплообмен; горный массив; подземный пожар; численные методы; метод конечных разностей.

Постановка проблемы. При подземном пожаре уголь, крепь и вмещающие породы интенсивно нагреваются и постепенно остывают после его ликвидации. Сведения о происходящих при этом теплообменных процессах особенно важны при локализации и ликвидации подземных пожаров, а также изоляции аварийных горных выработок. Понимание этих процессов позволит более точно определить время локализации и тушения пожара, изоляции горных выработок, а также предупредить появление вторичных очагов горения, возникающих при мощном и продолжительном нагревании горных пород и прекращении подачи огнетушащих веществ.

Рассматриваемый вопрос является одним из частных случаев процессов теплопередачи. Для его решения необходимо к дифференциальному уравнению, описывающему в общем виде процессы теплопередачи, применить

условия, характеризующие рассматриваемый случай: теплофизические условия, характеризующие свойства горного массива; начальные и граничные условия, характеризующие взаимодействие массива с окружающей средой. Однако существующие в данный момент решения такой задачи, а именно модели нагревания и остывания горного массива, представляют собой эмпирические или полуэмпирические зависимости.

Актуальным и эффективным инструментом для решения подобных задач является численное моделирование с использованием ЭВМ. Численное моделирование процессов теплообмена в настоящее время приобретает все более значительную роль в связи с тем, что для современной науки и техники необходим достоверный прогноз таких процессов. Их экспериментальные исследования в лабораторных или натуральных условиях очень сложны и дороги, а в некоторых случаях просто невозможны.

Анализ последних исследований. Основной вклад в развитие теории теплопередачи при подземном пожаре внесли ученые НИИГД «Респиратор» С.Н. Осипов, В.М. Жадан, П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко, П.П. Петров и др. Ими были проведены экспериментальные исследования, построены модели и выведены зависимости, описывающие процесс теплопередачи в горном массиве. Однако большинство этих моделей имеют эмпирический и полуэмпирический характер. В некоторых случаях решение приходится искать с помощью графиков и номограмм, в связи с чем значительно снижается точность определения искомых параметров. Численным моделированием процесса теплообмена в горном массиве занимались исследователи в работах [1, 2]. Однако авторы моделировали параметры шахтной вентиляции, изоляции при усложнившемся эндогенном пожаре, что не подходит для моделирования теплообмена горного массива при экзогенном пожаре.

В работах [3, 4] приведены общие уравнения и выражения, описывающие процесс теплопередачи, однако отсутствуют какие-либо практические расчеты и результаты.

Цель исследований – изучение параметров нагревания горного массива при подземном пожаре в зависимости от его теплофизических свойств и расстояния от очага пожара.

Материалы и результаты исследований. В настоящее время широкое распространение получило такое понятие, как «численный эксперимент»: когда вместо натуральных или лабораторных исследований условия их проведения моделируют с помощью ЭВМ. Современные технические и программные средства позволяют это сделать с достаточной точностью, однако использование в научных исследованиях экспериментальных данных всегда имеет больший приоритет.

Для исследования влияния допущений, принятых при разработке математической модели теплообмена в горном массиве, примем условия эксперимента, проведенного в НИИГД «Респиратор» под руководством С.Н. Осипова и В.М. Жадана.

В монолитном образце песчаника, имеющем минимальный диаметр 1 м, была пробурена скважина, в которую по центру образца помещали шарообразный спиральный нагреватель наружным диаметром 200 мм.

По трем взаимно перпендикулярным осям к центру образца бурили шпуров, в которые заложили хромель-алюмелевые термопары. Скважины и шпуров заполняли уплотняемой буровой пылью. Температуру нагревателя поддерживали на уровне 600 °С (рис. 1).

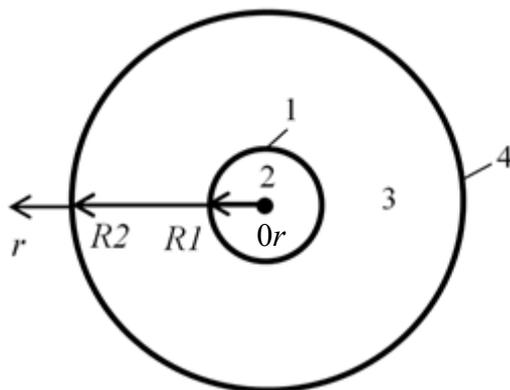


Рис. 1. Рассматриваемая область горного массива (образец песчаника):

1 – зона соприкосновения нагревателя с массивом песчаника; 2 – электрический нагреватель; 3 – образец песчаника; 4 – внешняя граница образца песчаника; 0r – ось экспериментального образца; R1 – радиус нагревателя (0,1 м); R2 – радиус образца песчаника (0,5 м)

Математическая модель прогревания горного массива описывается следующим дифференциальным уравнением теплопередачи бесконечного цилиндра:

$$\frac{dT_{\text{п}}}{d\tau} = a_{\text{п}} \left(\frac{d^2 T_{\text{п}}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{\text{п}}}{dr} \right), \quad (1)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура образца песчаника, °С;

τ – текущее время, с;

$a_{\text{п}}$ – коэффициент температуропроводности песчаника, м²/с;

r – текущий радиус массива, м.

Для шарообразного нагревателя уравнение теплопроводности будет иметь вид

$$\frac{dT_{\text{н}}}{d\tau} = a_{\text{н}} \left(\frac{d^2 T_{\text{н}}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT_{\text{н}}}{dr} \right), \quad (2)$$

где $T_{\text{н}}$ – температура нагревателя, °С;

$a_{\text{н}}$ – коэффициент температуропроводности нагревателя, м²/с.

Уравнения (1) и (2) дополним начальными условиями:

$$T(r, 0) = T_0, \text{ при } 0 \leq r \leq R2, \quad (3)$$

где T_0 – начальные температуры образца песчаника и материала нагревателя, °С (принимая, что они равны).

Уравнение (2) дополним граничным условием симметрии на оси образца (условие симметрии):

$$\frac{dT_H}{dr} = 0, \text{ при } r = 0. \quad (4)$$

При большой длительности прогревания (в течение нескольких часов) поверхность горного массива практически приобретает температуру очага пожара, поэтому принято, что теплопередача на границе массива осуществляется по закону теплопроводности. В связи с этим граничное условие на границе между нагревателем и образцом песчаника можно записать следующим образом [5]:

$$-\lambda_H \frac{dT_H}{dr} = -\lambda_{\Pi} \frac{dT_{\Pi}}{dr}. \quad (5)$$

С целью упрощения примем для внешней стенки образца песчаника граничное условие I рода

$$r = R2; \quad T = T_c, \quad (6)$$

где T_c – температура внешней стенки песчаника, °С.

Граничные условия (3) – (6) должны выполняться в любой момент времени τ .

Функцию нагревания и остывания нагревателя представим в виде эмпирической зависимости

$$T_{\text{нагр}}(\tau) = 9,32 + 0,227\tau. \quad (7)$$

Для численного решения уравнения (2) построим сетку с шагом Δr по пространственной координате r в области $0 \leq r \leq R2$ с шагом по времени $\Delta \tau$ (рис. 2).

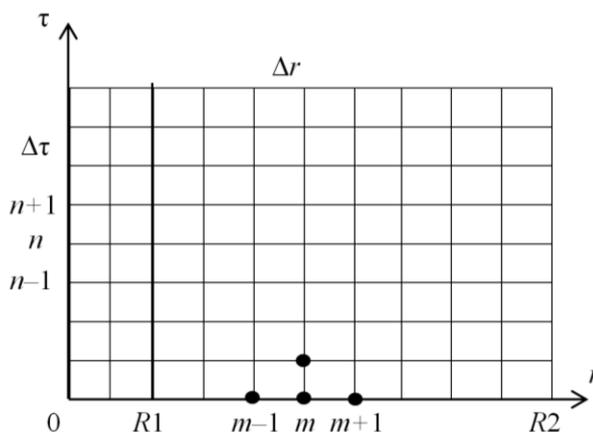


Рис. 2. Разностная схема:

n – номер текущего времени; m – номер центрального узла по радиусу r

Значение температуры $T(r, \tau)$ в точке $r_m = m\Delta r$ ($m = \overline{1, R2}$) в момент времени $n\Delta\tau$, $n = 0, 1, 2, \dots$ будем обозначать как T_m^n .

Для решения дифференциальных уравнений теплопередачи (1) и (2) воспользуемся явной схемой метода конечных разностей. Используем вместо производных в дифференциальном уравнении их конечно-разностные аппроксимации [6]:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta\tau},$$

$$\frac{d^2T}{dr^2} = \frac{T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n}{(\Delta r)^2},$$

$\frac{dT}{dr} = \frac{T_{m+1}^n - T_{m-1}^n}{2\Delta r}$ – центральная разностная производная (применим для песка);

$\frac{dT}{dr} = \frac{T_{m+1}^n - T_m^n}{\Delta r}$ – правая разностная производная (применим для материала нагревателя).

Таким образом, в результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta\tau} = a_{\text{п}} \left(\frac{T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r_m} \frac{T_{m+1}^n - T_{m-1}^n}{2\Delta r} \right). \quad (8)$$

После преобразований получим уравнение, позволяющее по известным значениям температуры на n -м временном слое определить температуру в узлах сетки на временном слое $n+1$:

$$T_m^{n+1} = T_m^n + a_{\text{п}}\Delta\tau \left(\frac{T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n}{(\Delta r)^2} \right) + a_{\text{п}}\Delta\tau \left(\frac{T_{m+1}^n - T_{m-1}^n}{2r_m\Delta r} \right). \quad (9)$$

Уравнение теплопередачи в нагревателе (2) после представления его в конечно-разностном аналоге примет вид

$$\frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta\tau} = a_{\text{н}} \left(\frac{T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{r_m} \frac{T_{m+1}^n - T_m^n}{\Delta r} \right). \quad (10)$$

После преобразования

$$T_m^{n+1} = T_m^n + a_{\text{н}}\Delta\tau \left(\frac{T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n}{(\Delta r)^2} \right) + 2a_{\text{н}}\Delta\tau \left(\frac{T_{m+1}^n - T_m^n}{\Delta r} \right). \quad (11)$$

С помощью эмпирической зависимости (7) зададим функцию изменения температуры нагревателя в точке T_0^{n+1} . Примем температуру в точке T_m^{n+1} для нагревателя согласно уравнению (10), где $m = 1, R1-1$, и для образца песчаника, где $m = R1+1, R2-1$, по формуле (9), в точке $R2$ согласно граничному условию (6) $T_m^{n+1} = T_0$.

В точке $m = R1$ значение температуры на следующем шаге вычисляем согласно граничному условию (5), которое в конечно-разностном виде примет вид

$$T_m^{n+1} = \frac{\lambda_n T_{m-1}^n + \lambda_n T_{m+1}^n}{\lambda_n + \lambda_n}, \quad (12)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности материала нагревателя, Вт/(м·°С);

λ_n – коэффициент теплопроводности образца песчаника, Вт/(м·°С).

Определим исходные данные для моделирования.

В связи с тем, что данные о теплофизических характеристиках нагревателя отсутствуют, принимаем, что материал нагревателя – нихром, имеющий теплофизические характеристики: $a_n = 5,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\lambda_n = 150$ Вт/(м·°С).

Теплофизические характеристики песчаника примем согласно условиям эксперимента: $a_n = 6,9 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\lambda_n = 1,8$ Вт/(м·°С).

Начальная температура нагревателя и образца песчаника, температура стенки образца песчаника будут равны $T_0 = T_c = 20$ °С.

Для определения шага по времени $\Delta\tau$ уравнение было проверено на устойчивость методом гармоник [2]. Представим решение разностной задачи в узле сетки в виде $T_m^n = \lambda^n e^{ik\varphi}$ и подставим в уравнение (8). Получим, что схема устойчива при

$$\Delta\tau \leq \min\left(\frac{\Delta r^2}{2a_n}, \frac{\Delta r^2}{2a_n}\right). \quad (13)$$

Для решения поставленной задачи была создана программа в Excel с сеткой 20×7329 ячеек с шагом по времени $\Delta\tau = 3,93$ с и шагом по расстоянию $\Delta r = 0,025$ м. Результаты численного моделирования представлены на рис. 3.

Исследование показало, что его результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Прослеживается очевидная динамика процесса теплообмена.

По результатам исследования можно сделать выводы:

- при прогревании горного массива с увеличением расстояния от очага пожара скорость нарастания температуры снижается;
- после прекращения нагревания пород очагом пожара рост температуры в глубине массива прекращается не сразу.

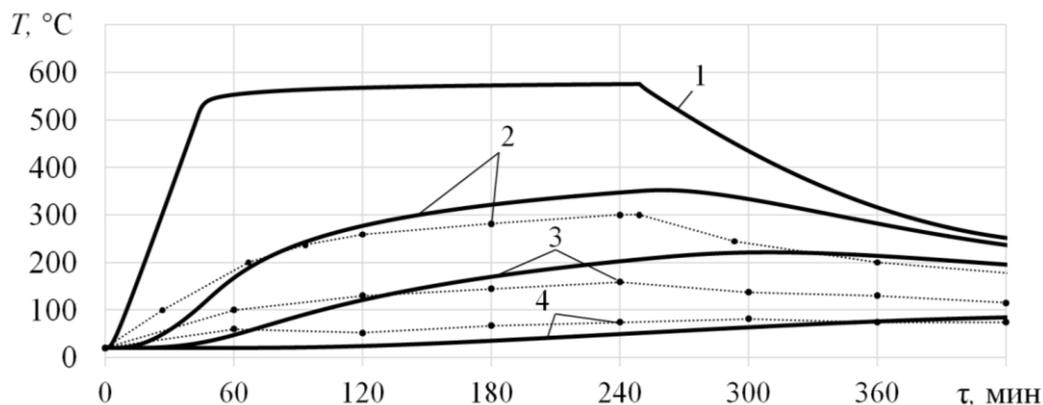


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные данные распределения температуры в образце песчаника в зависимости от времени τ , мин, и расстояния в глубь массива r , м:

1 – при $r = 0,1$ м (на границе сред); 2 – при $r = 0,15$ м; 3 – при $r = 0,2$ м; 4 – при $r = 0,325$ м

Стоит отметить, что данная модель более применима в условиях развившегося пожара, так как в качестве граничного условия на переходе разных сред используют уравнение теплопроводности, однако, применив на границе массива и воздуха горной выработки граничное условие III рода (конвекция), модель можно использовать для моделирования теплообмена в начальной стадии пожара.

Выводы. Разработана математическая модель в конечно-разностном виде, с помощью которой исследованы теплообменные процессы в образце горного массива песчаника.

В отличие от существующих аналитических решений, представляющих собой эмпирические или полуэмпирические формулы, разработанная математическая модель позволяет исследовать динамику изменения температуры горного массива в любой момент времени, используя при этом параметры реально существующих горных выработок.

С помощью разработанной математической модели при различных начальных и граничных условиях можно исследовать теплообменные процессы в горном массиве при подземном пожаре. Параметры нагревания горного массива можно использовать при определении времени локализации и тушения пожара, изоляции горных выработок, а также для предупреждения появления вторичных очагов горения, возникающих при мощном и продолжительном нагревании горных пород и прекращении подачи огнетушащих веществ.

Список литературы / References

1. Гайдай, К.О. Математичне моделювання руху теплової енергії у гірському масиві / К.О. Гайдай, С.В. Жолудев // Вісник Дніпропетровського університету. Геологія, географія. – 2012. – Вип. 12, №7. – С. 11 – 20.

Gayday, K.O., Zholudiev, S.V. *Matematychni modeliuvannia rukhu teplovoi energii u girs'komu masyvi* [The mathematical modeling of movement of the heat energy in the massif]. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo universytetu. Geologiya, Geografiia* [Bulletin of the Dnipropetrovsk university. Geology. Geography]. 2012, issue 12, no. 7, pp. 11 – 20.

2. Куцев, А.Р. Моделирование нестационарного процесса сопряженного теплообмена горного массива и рудничного воздуха с применением технологии вычисления на графических процессорах NVIDIA CUDA / А.Р. Куцев // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – № 4 (22). – С. 111 – 117.

Kutsev, A.R. *Modelirovaniye nestatsionarnogo protsessa sopryazhyennogo teploobmena gornogo massiva i rudnichnogo vozdukha s primeneniym tekhnologii vychisleniya na graficheskikh protsessorakh NVIDIA CUDA* [Modeling the non-stationary process of the conjugated heat exchange of the massif and mine air with the use of the calculation technology at the NVIDIA CUDA graphics processing units]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Fizika* [Bulletin of the Perm university. Series: Physics]. 2012, no. 4 (22), pp. 111 – 117.

3. Бойко, В.А. О математическом описании процесса теплообмена между горным массивом и потоком проветривающего горную выработку воздуха и решении прикладных задач нормализации рудничного микроклимата / В.А. Бойко, О.А. Бойко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2010. – № 35(2). – С. 81 – 90.

Boyko, V.A., Boyko, O.A. *O matematicheskom opisani protsessu teploobmena mezhdu gornym massivom i potokom provetrivayushchego gornuyu vyrabotku vozdukha i reshenii prikladnykh zadach normalizatsii rudnichnogo mikroklimate* [On the mathematical description of the heat exchange process between the massif and the air flow ventilating a mine working and on solving the application-specific problems of normalization of the mine microclimate]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'nogo girnychogo universytetu* [Collection of scientific papers of the National mining university]. 2010, no. № 35(2), pp. 81 – 90.

4. Рахимжанов, Д.Ю. / Исследование процессов теплообмена и распространения тепла в угле и вмещающих породах // Вестник Кокшетауского технического института МЧС Республики Казахстан. – 2013. – №2. – С.43 – 48.

Rakhimdzhанov, D.Yu. *Issledovaniye protsessov teploobmena i rasprostraneniya tepla v ugle i vmeshchayushchikh porodakh* [Investigation of the processes of heat exchange and heat conduction in coal and deads]. *Vestnik Kokshetauskogo tekhnicheskogo instituta MChS Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the Kokshetau technical institute of the Ministry of Emergencies of Kazakhstan]. 2013, no. 2, pp. 43 – 48.

5. Кузнецов, Г.В., Разностные методы решения задач теплопроводности / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

Kuznetsov, G.V., Sheremet, M.A. *Raznostnyye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference methods of solving the thermal conductivity problems]. Tomsk, TPU Publ., 2007, 172 p.

6. Меркулова, Н.Н. Разностные схемы для обыкновенных дифференциальных уравнений / Н.Н. Меркулова, М.Д. Михайлов. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2014. – 122 с.

Merkulova, N.N., Mikhaylov, M.D. *Raznostnyye skhemy dlya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Difference schemes for ordinary differential equations]. Tomsk, Izdatel'skiy dom TGU Publ., 2014, 122 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 31.01.2018

Artyom Alekseyevich Didenko, scientific associate; e-mail: didenartem89@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) 332-78-40

SIMULATION OF THE HEAT EXCHANGE IN A MASSIF BY AN UNDERGROUND FIRE

Purpose. Investigation of parameters of heating the massif by the underground fire depending on its thermal properties and distance from a seat of fire.

Methods. Mathematical modeling the heat exchange processes. Comparison of the results of the modeling with the experimental data known.

Results. The mathematical model in the finite-difference form, with the help of which the heat exchange processes were investigated in a specimen of the sandstone massif, had been worked out. The calculation results conform satisfactorily to the experimental data. The obvious dynamics of the heat exchange process is traced.

It is confirmed as a result of the investigation that the temperature rise rate decreases by the warming-up of the massif with increase in the distance from the seat of fire; after termination of the warming-up of the rocks with the seat of fire the temperature increase in the depth of the massif ceases not immediately.

Scientific novelty. In contrast to existing analytical solutions representing the empirical or semiempirical formulae the mathematical model worked out allows investigating the dynamics of change of the massif temperature at any time using the parameters of the really existing mine workings in so doing.

Practical value. With the use of the mathematical model worked out one can investigate the heat exchange processes in the massif by the underground fire at various initial and boundary conditions. One can use the parameters of the massif warming-up by determination of the time of localization and fighting the fire, isolation of the mine workings as well as for prevention of appearance of the secondary seats of combustion arising by the powerful and prolonged warming-up the rocks and loss of supply of fire-extinguishing substances.

Key words: *mathematical modeling; heat exchange; massif; underground fire; numerical methods; finite-difference method.*

УДК [622.822.7:614.842.612]:622.014.5

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

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

**ОБОСНОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ
НАДШАХТНЫХ ЗДАНИЙ**

Цель. Определить закономерность, отражающую зависимость гидравлических параметров противопожарного водоснабжения от характеристик существующей трубопроводной арматуры, применяемого пожарного оборудования, а также от строительных параметров и функционального назначения защищаемых зданий и сооружений надшахтного комплекса.

Методика. Аналитические исследования гидравлических процессов, возникающих в противопожарном трубопроводе при пожаротушении.

Результаты. Получена зависимость для определения гидравлических параметров с учетом протяженности, диаметра, удельных гидравлических сопротивлений трубопровода (рукавной линии) и требований нормативно-технической документации.

Научная новизна. По результатам проведенных аналитических исследований уточнена зависимость, которая позволяет повысить точность определения гидравлических параметров противопожарного водоснабжения объектов поверхностного комплекса шахт.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для рационального выбора пожарного оборудования при соблюдении требований по обеспечению необходимого уровня пожарной безопасности защищаемых объектов.

Ключевые слова: *противопожарный трубопровод; пожарные насосы; пожарные рукава; гидравлические параметры; поверхностный комплекс шахты; удельные гидравлические сопротивления; компактная струя.*

Постановка проблемы. Система водоснабжения составляет основу противопожарной защиты объектов поверхностного комплекса угольных шахт.

На территории ДНР вышел ряд новых нормативных документов по пожарной безопасности, поэтому возникла необходимость в обосновании гидравлических параметров противопожарного водоснабжения с учетом требования пожарной безопасности к объектам поверхностного комплекса угольных шахт.

Анализ последних исследований и публикаций. До настоящего времени расчет гидравлических параметров противопожарного водоснабжения объектов поверхностного комплекса шахт выполняли в соответствии с требованиями КД 12.07.403-96 «Разработка проекта противопожарной защиты. Методика». В указанном документе не учтены требования новых стандартов, в том числе не определено значение напора воды для создания компактной струи.

В России согласно «Руководству по составлению проектов противопожарной защиты рудных шахт» в расчете не учитывают потери давления после гидрантов в противопожарном трубопроводе внутри здания и не установлены зависимости по определению напора для создания компактной струи.

Цель исследования. Обосновать гидравлические параметры противопожарного водоснабжения для эффективного пожаротушения объектов поверхностного комплекса шахт.

Материалы и результаты исследования. Тушение объектов поверхностного комплекса угольных шахт производят с учетом нормативных требований при помощи наружного оборудования (пожарные гидранты, пожарные машины) и внутреннего оборудования (пожарные краны на этажах-отметках внутри зданий).

Необходимый расход воды Q , м³/ч, на пожаротушение – переменная величина, которую определяют для зданий с наибольшим расходом воды на пожаротушение и вычисляют как сумму расходов на наружное пожаротушение $Q_{нар}$, м³/ч, в соответствии с требованиями ДБН В.2.5-74:2013 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Основные положения проектирования», внутреннее пожаротушение $Q_{вн}$, м³/ч, ДБН В.2.5-64:2012 «Внутренний водопровод и канализация. Часть I. Проектирование. Часть II. Строительство», Правил пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Донецкой Народной Республики и работу систем противопожарной защиты $Q_{спз}$, м³/ч, по формуле

$$Q = Q_{нар} + Q_{вн} + Q_{спз}. \quad (1)$$

Общий напор воды определяют по формуле [1]

$$H = H_{пов} + H_{м} + H_{с} + H_{д}, \quad (2)$$

где H – общий напор воды, м;

$H_{пов}$ – напор воды для преодоления сопротивления в поворотах трубопровода, м;

$H_{м}$ – напор воды для преодоления местного сопротивления, м;

$H_{с}$ – напор воды для преодоления сопротивления по длине трубопровода (рукавной линии), м;

$H_{д}$ – дополнительные значения напора воды, м;

$$H_{д} = H_{г} + H_{о} + H_{н}, \quad (3)$$

H_T – разница геодезических отметок насосной станции и расчетной точки, м;

H_0 – высота защищаемого объекта, м;

H_n – нормативные значения напора воды в расчетной точке, м.

Допустимы суммарные значения $H_{пов}$ и H_m 10...20 % от значения H_c .

Потерю давления воды по длине трубопровода вычисляют по формуле Дарси-Вейсбаха

$$H_c = \eta \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} l, \quad (4)$$

где η – коэффициент сопротивления трению внутренней поверхности труб;

D – диаметр трубы, м,

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,785v}}; \quad (5)$$

v – средняя скорость движения потока воды, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

l – длина трубопровода, м.

Однако ввиду использования в расчетах расхода воды, а не скорости движения потока воды удобнее использовать следующую формулу:

$$H_c = k_m \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2, \quad (6)$$

где k_m – коэффициент, учитывающий потери давления на местные сопротивления; $k_m = 1,1$;

A_i – удельное гидравлическое сопротивление i -го участка трубопровода (рукавной линии), с²/м⁶;

l_i – длина i -го участка трубопровода (рукавной линии), м;

Q – расход воды на тушение пожара, м³/с.

При использовании формулы (6) противопожарный трубопровод (рукавная линия) от насосной до расчетной точки разбивают на участки одинакового диаметра. Первоначально определяют напор воды, необходимый для преодоления гидравлических сопротивлений трубопровода от насосной до ближайшего пожарного гидранта защищаемого объекта, самого гидранта и рукавной линии. Расчет для рукавной линии (количество, длина, диаметр

пожарных рукавов) выполняют в соответствии с требованиями работы [2]. Далее выполняют расчет напора воды, необходимого для преодоления гидравлических сопротивлений по длине трубопровода от насосной до защищаемого объекта, внутри объекта и пожарного рукава для диктующей точки внутри здания.

Нормативные значения напора H_n в расчетной точке определяют исходя из высоты компактной струи, формируемой пожарным стволом, которую в общем случае определяют по формуле [3]

$$H_B = H_{ст} \left(1 - \int_0^l \frac{\lambda}{d_H} \cos \alpha dx \right), \quad (7)$$

где H_B – высота компактной струи, м;

$H_{ст}$ – напор воды у пожарного ствола, м, $H_{ст} = H_n$;

λ – коэффициент сопротивления воздуха;

$$\lambda = \frac{0,25}{d_H + (0,1d_H)^3}, \quad (8)$$

l – длина струи, м;

x – высота компактной струи, м;

α – угол наклона струи к горизонту, ...°;

d_H – диаметр выходного сечения насадка, мм.

Вычисляя H_n из формулы (7), получим

$$H_n = \frac{H_B}{\left(1 - \lambda \cos \alpha \frac{l}{d_H} \right)}. \quad (9)$$

При подстановке в формулу (2) выражений (3), (6) и (9) получают зависимость для расчета необходимого напора воды для тушения пожара:

$$H = k_M \sum_{i=1}^n A_i l_i Q^2 + H_{Г} + H_{О} + \frac{H_B}{\left(1 - \lambda \cos \alpha \frac{l}{d_H} \right)}. \quad (10)$$

Значения Q и H обеспечивают путем выбора пожарного насоса исходя их соотношений (11), (12):

$$Q_{\min} < Q < Q_{\max}, \quad (11)$$

где Q_{\min} и Q_{\max} – минимальный и максимальный расход насоса, определяемый по верхней и нижней границам рабочей характеристики пожарного насоса соответственно, м³/ч;

$$H_{\min} < H < H_{\max}, \quad (12)$$

H_{\min} и H_{\max} – минимальный и максимальный напоры насоса, развиваемые пожарным насосом на верхней и нижней границах рабочей характеристики соответственно, м.

Для проверки гидравлических характеристик ранее установленного пожарного насоса можно воспользоваться формулой отображения зависимости напора насоса от его подачи:

$$H_{\text{пн}} = z(H_0 + A Q_{\text{пн}} - B Q_{\text{пн}}^2), \quad (13)$$

где $H_{\text{пн}}$ – напор воды пожарного насоса согласно технической характеристике завода-изготовителя, м;

z – количество рабочих колес;

$Q_{\text{пн}}$ – расход воды пожарного насоса согласно технической характеристике завода-изготовителя, м³/ч;

H_0, A, B – коэффициенты, определяемые по зависимостям, изложенным в книге «Стационарные установки шахт» Б.Ф. Братченко (М.: Недра, 1977. – 438 с.).

Рабочий режим установленного пожарного насоса определяют путем решения системы уравнений (10) и (13).

На примере шахты, работающей в режиме водоотлива, обоснуем гидравлические параметры противопожарного водоснабжения надшахтных зданий промплощадки (см. таблицу).

Необходимый расход воды определяют по надшахтному зданию скипового ствола и он равен: на наружное пожаротушение 10 л/с (36 м³/ч), на внутреннее (расход воды на пожаротушение внутри здания, на работу водяной завесы в устье ствола) 29 л/с (104 м³/ч). Таким образом, необходимый расход воды, определяемый по формуле (1), равен 39 л/с (140 м³/ч).

Противопожарное водоснабжение надшахтных зданий

Здание	Степень огнестойкости здания	Категория здания по взрывопожарной и пожарной опасности	Объем здания, м ³	Высота здания, м	Длина трубопровода от насосной до здания, м	Длина трубопровода внутри здания (до диктующей точки), м	Необходимый напор в пожарных гидрантах, м	Необходимый напор в диктующей точке здания, м
Надшахтное здание скипового ствола (площадь сечения ствола 12 м ²)	I	B	3200	16	120	30	33	33
Надшахтное здание клетового ствола (площадь сечения ствола 11 м ²)	I	B	2700	12	110	25	29	29
Здание вентиляторных установок	II	Г	1100	8	60	14	25	22
Здание материального склада (несгораемых материалов)	III	Д	1700	5	290	23	22	31
Инструментальный цех	III	Д	1400	7	210	21	24	29
Административно-бытовой комбинат	II	Д	1050	10	220	28	27	32

Расчетные значения должен обеспечивать насос с расходом воды не менее 140 м³/ч, напором 33 м.

Выводы. В результате проведенных аналитических исследований гидравлических процессов, возникающих в противопожарном трубопроводе при пожаротушении, получена закономерность, позволяющая повысить точность расчетов для определения гидравлических параметров противопожарного водоснабжения объектов поверхностного комплекса шахт. Полученные результаты могут быть использованы для рационального выбора пожарного оборудования при соблюдении требований по обеспечению необходимого уровня пожарной безопасности защищаемых объектов.

Список литературы / References

1. Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д.Ф. Гуревич. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 476 с.

Gurevich, D.F. *Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoy armatury* [Calculation and design of the pipe fitting]. Moscow, LENAND Publ., 2008, 476 p.

2. Терещнев, В.В. Расчет параметров насосно-рукавных систем / В.В. Терещнев, Т.Н. Атаманов // Пожаровзрывобезопасность: науч.-техн. журн. – М., 2011. – Вып. 10. – С. 48 – 56.

Terebnev, V.V., Atamanov, T.N. *Raschet parametrov nasosno-rukavnykh sistem* [Calculation of parameters of pump-hose systems]. *Pozharovzryvobezopasnost': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Fire and explosion safety: scientific-technical journal*, Moscow, 2011, issue 10, pp. 48–56.

3. Душкин, А.Л. Особенности распространения жидкостной струи в атмосфере / А.Л. Душкин, А.В. Карпышев, С.Е. Ловчинский // Пожаровзрывобезопасность: науч.-техн. журн. – М., 2011. – Вып. 12. – С. 45 – 48.

Dushkin, A.L., Karpyshev, A.V., Lovchinskiy, S.Ye. *Osobennosti rasprostraneniya zhidkostnoy strui v atmosphere* [Peculiarities of propagation of the fluid stream in the atmosphere]. *Pozharovzryvobezopasnost': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Fire and explosion safety: scientific-technical journal*, Moscow, 2011, issue 12, pp. 48 – 56.

Dmitry Sergeyevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru

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

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

SUBSTANTIATION OF HYDRAULIC PARAMETERS OF THE FIRE WATER SUPPLY OF DECKHEAD BUILDINGS

Purpose. To determine the conformity representing the dependence of hydraulic parameters of the fire water supply on characteristics of the existing pipe fitting, fire equipment being used as well as on construction parameters and function of buildings and structures of the pit head complex being protected.

Methods. Analytical investigations of the hydraulic processes arising in the fire pipeline by extinguishing the fire.

Results. The dependence for determination of the hydraulic parameters with due regard for length, diameter, specific hydraulic resistances of the pipeline (hose pipeline) and requirements of the normative-technical documentation was obtained.

Scientific novelty. The dependence that allows raising the accuracy of determination of the hydraulic parameters of the fire water supply of the surface complex objects of the mine was specified by results of the analytical investigations carried out.

Practical value. The results obtained may be used for the rational choice of the fire equipment by compliance with the requirements on guaranteeing the necessary fire safety level of the objects being protected.

Key words: *fire pipeline; fire pumps; fire hoses; hydraulic parameters; surface complex of the mine; specific hydraulic resistances; compact stream.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.868.42:[534.222.2+622.831.3]

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

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

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

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

Иван Филиппович Марийчук, канд. техн. наук, доц.; e-mail: rpm2000avanek@mail.ru

Донецкий национальный технический университет

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВЗРЫВОУСТОЙЧИВУЮ ПЕРЕМЫЧКУ

Цель. Определить влияние проемных металлических труб на напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки в горной выработке угольной шахты, их прочность и устойчивость.

Методы. Экспериментальный метод исследований с использованием моделирования методом эквивалентных материалов, который широко применяют для исследования вопросов, связанных с проявлением горного давления в горных выработках при разработке месторождений полезных ископаемых, а также при изучении вопросов, связанных с породами, перемещениями массивов, в том числе с учетом металлической крепи и анкерным креплением.

Результаты. Получены зависимости перемещений глубинных реперов и относительных деформаций в горных породах кровли, боков и почвы выработки от расстояния до ее контура в моделях перемычки с проемными трубами и без них. Установлено, что максимальная погрешность их перемещений и деформаций составляет 7,1 и 6,1 % соответственно. Максимальные тангенциальные напряжения проемных труб не превышают соответствующих допустимых значений, а значения перемещений являются малыми.

Научная новизна. Впервые методом физического моделирования, в частности методом эквивалентных материалов, установлено, что влиянием проемных труб на напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки можно пренебречь при расчете их прочности и устойчивости.

Практическая значимость. Приведенные результаты будут использованы для теоретических исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возводимой из материалов на основе цементно-шлаковых смесей, которая находится под действием горного давления, воздушных ударных волн и температуры без учета влияния проемных металлических труб, что значительно упростит решение задачи.

Ключевые слова: *взрывоустойчивая перемычка; модель; проемные трубы; перемещение; деформация; напряжения; прочность; устойчивость.*

Постановка проблемы. Наиболее тяжелые по своим последствиям среди опасностей горного производства – аварии, связанные с воспламенением метана и угольной пыли, которые в большинстве случаев носят характер катастроф. Максимально возможное ограничение области распространения фронта пламени и ударно-воздушной волны производят путем локализации

взрывов метана и угольной пыли в подземных горных выработках, изоляции пожаров в шахтах, опасных по взрывам газа и угольной пыли, взрывоустойчивыми перемычками, которые создают методом литья с проемными металлическими трубами для проветривания аварийной выработки [1].

Основная техническая характеристика взрывоустойчивой перемычки, от которой зависит трудоемкость ее возведения и безопасность горноспасателей при ликвидации аварий, – толщина, которую необходимо определить на основании теоретических исследований с учетом применения новых материалов [2].

Анализ последних исследований. В работе [3] приведена расчетная схема взрывоустойчивой перемычки с проемными металлическими трубами в виде плиты с радиусом, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, с защемленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней ее части, которая находится под воздействием нормальной нагрузки от действия воздушных ударных волн и сжимающей – под массой разрушенных пород кровли.

Решение задачи приведено в виде трех функций: перемещений от изгиба и сдвига, усилий с использованием вариационного метода теории упругости, в результате чего получена номограмма для оперативного определения толщины взрывоустойчивой перемычки, изготовленной из строительного или высокопрочного гипсов, в зависимости от глубины возведения и площади сечения выработки.

В работе [3] не учтено воздействие на взрывоустойчивую перемычку горного давления, принято влияние отверстий на напряженно-деформированное состояние как концентраторов, без учета крепления металлическими трубами, их прочность и устойчивость.

Цель исследования. Определить влияние проемных металлических труб на напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки в горной выработке угольной шахты, их прочность и устойчивость.

Материалы и результаты исследований. Для решения этого вопроса используем один из основных методов моделирования физических процессов в горном деле – метод эквивалентных материалов, разработанный во ВНИМИ Г.Н. Кузнецовым [4].

Этот метод широко применяют для исследования процессов, связанных с проявлением горного давления в выработках при разработке месторождений полезных ископаемых; изучении вопросов, связанных с породами, перемещениями массивов, в том числе с учетом металлической крепи и анкерным креплением.

В основе метода лежит теория механического подобия Ньютона, которая предполагает геометрическое, кинематическое и динамическое подобия модели (рис. 1).

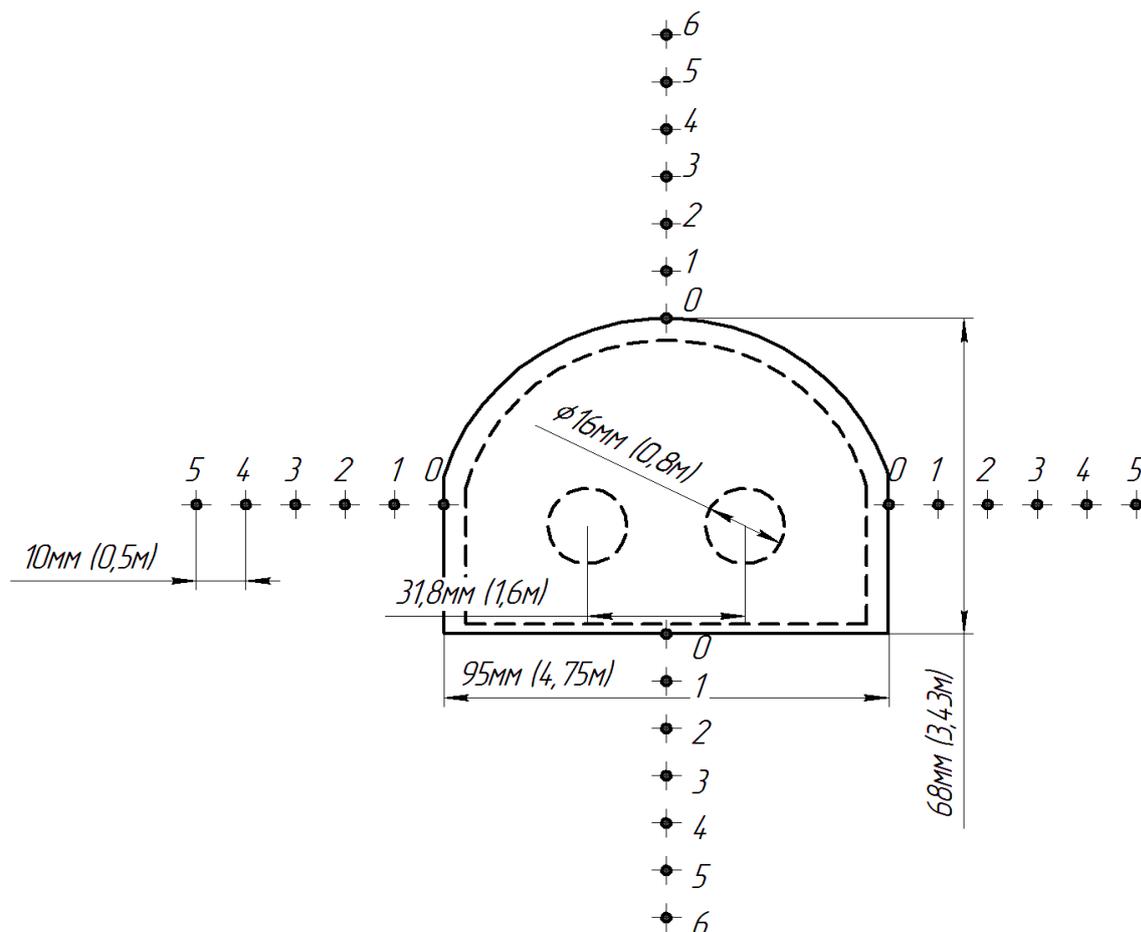


Рис. 1. Схема расположения реперов в моделях: 0...5 – номера реперов

В данном случае соблюдены следующие равенства: условие подобия внешних сил и напряжений при сжатии соответственно (индекс «м» – модель, «н» – натура)

$$q_M = \frac{\gamma_M R_M^3}{\gamma_H R_H^3} q_H; \quad (1)$$

$$\sigma_{сжм} = \frac{R_M \gamma_M}{R_H \gamma_H} \sigma_{сжн}, \quad (2)$$

а критерием подобия является безразмерное число

$$K = \frac{\sigma_{сжм}}{\gamma_M R_M} = \frac{\sigma_{сжн}}{\gamma_H R_H} = idem, \quad (3)$$

где γ , R – объемный вес, Н/м^3 , и радиус выработки (перемычки) соответственно, м, меняющийся в основном по параболической зависимости [3]

$$R = R_o \bar{R}; R_o = \frac{B}{8t}; \bar{R} = \left(1 + 16t^2 (1 - 2\bar{y})^2 \right)^{\frac{3}{2}}; t = \frac{f}{B}, \quad (4)$$

где \bar{R} – безразмерная величина, а \bar{y} меняется в пределах от 0 до 1;
 B, f – ширина и максимальная высота перемычки соответственно, м.
 Тогда выражение (2) примет вид

$$\sigma_{сжм} = \frac{B_M^2 f_H \gamma_M}{B_H^2 f_M \gamma_H} \sigma_{сжн}. \quad (5)$$

Для приведения в подобие процессов в области упругих деформаций соблюдаем равенства соответственно модулей упругости и коэффициентов Пуассона:

$$E_M = \frac{\gamma_M B_M^2 f_H}{\gamma_H B_H^2 f_M} E_H; \quad \nu_M = \nu_H. \quad (6)$$

Характеристика моделей из эквивалентных материалов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические и жесткостные параметры материалов моделей
и натурной перемычки

Модель	Ширина выработки B , м		Высота выработки f , м		Толщина перемычки h , м		Значение нагрузки, МПа
	натуры	модели	натуры	модели	натуры	модели	
Монолитная и с проемными трубами	4,75	0,095	3,44	0,068	1,0	0,02	0,18
С проемными трубами	Параметры проемных труб						
	натуры		модели		натуры		модели
	Внутренний диаметр, м		Внутренний диаметр, м		Жесткость на сжатие $E_H H_0^*$, МПа·м		Жесткость на сжатие $E_M H_0^*$, МПа·м
0,8		$1.6 \cdot 10^{-2}$		10^3		20	

* H_0 – толщина проемной трубы, м.

Деформации определим, используя данные перемещений перемычек в двух направлениях (табл. 2).

Таблица 2

Механические характеристики материалов моделей и натурной перемиčky

Материал	Модуль упругости E , МПа		Коэффициент Пуассона, ν	Примечание
	модели	натуры		
Пенопласт П35	$0,6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	0,34	Основная часть перемиčky
	$6 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^5$		
Полиэтилен НД ВП	$6 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^5$	0,32	Проемные трубы

В связи с тем, что не удалось обеспечить масштабность по модулям упругости полиэтилена, это условие выполняется по жесткости на сжатие проемной трубы. Действие максимальной нормативной равномерно распределенной нагрузки по внутреннему контуру устройства передается на породы (эквивалентные деревянные элементы) и перемиčku с помощью полиэтиленовых трубок со сжатым воздухом, подаваемым из баллона (рис. 2).



Рис. 2. Состояние выработки с моделями до испытаний:
а – без проемных труб; б – с проемными трубами

Перемещения выработки с моделями, измеряемые с помощью индикаторов часового типа, визуально определить практически невозможно, поэтому аналогичного состояния выработки после испытаний не приведено.

Используя данные перемещений перемиček, по известным зависимостям определили деформации (рис. 3).

Сравнение приведенных выше результатов моделирования перемещений и деформации перемиček (табл. 3) показывают, что максимальные погрешности первых не превышают 7,1 %, вторых 6,1 %.

Следовательно, с помощью физического моделирования перемещений и деформаций в моделях перемиček установлено, что влиянием проемных труб на их напряженно-деформированное состояние можно пренебречь.

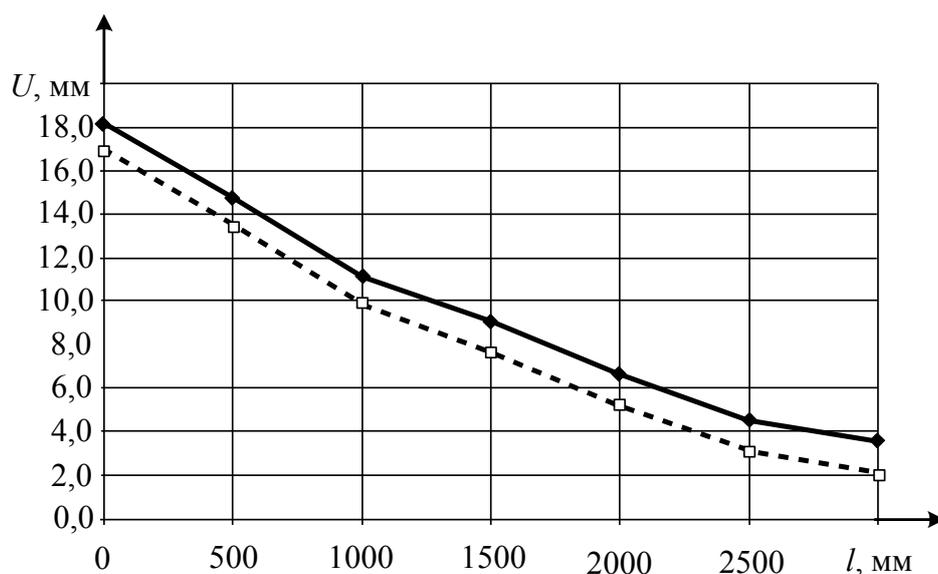


Рис. 3. Зависимости перемещений глубинных реперов в кровле выработки от расстояния до ее контура l в моделях:

—◆— — с трубами; —□— — без труб

Таблица 3

Результаты перемещений и деформаций моделей перемычек без проемных труб и с ними

Перемещение реперов, мм						Деформация реперов $\varepsilon \cdot 10^{-3}$, %					
Кровля (по вертикали)		Левая, правая боковая поверхность (по горизонтали)		Почва (по вертикали)		Кровля (по вертикали)		Левая, правая боковая поверхность (по горизонтали)		Почва (по вертикали)	
Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами
0,34	0,36	0,20	0,21	0,13	0,14	6,6	6,8	3,1	3,3	2,4	2,5
Погрешность, %											
5,6		4,8		7,1		3,0		6,1		4,0	

В данном случае нельзя определить напряжение в перемычке без проемных труб с переходом к натуре и последующего сравнения с результатами теоретических исследований их напряженно-деформированного состояния по зависимости (5) ввиду следующих основных недостатков:

- выполнить условия подобия внешних сил затруднительно;
- мелкомасштабные модели позволяют определить перемещения и деформации перемычек для их сравнения в некоторых точках и в одном из направлений.

Однако можно определить напряжения и перемещения в проемных трубах с точки зрения их прочности и устойчивости.

Действующее на модели перемычек горное давление равномерно распределено по их контуру, а некоторую часть нагрузки, которая неизвестна, воспринимают проемные трубы как цилиндрические оболочки со свободными краями.

Допустим, что трубы находятся под действием вышеприведенной нагрузки $q = 0,18$ МПа, они имеют ребра жесткости, которые увеличивают неучтенные прочность и устойчивость, что является существенным запасом.

Тогда радиальные σ_R , тангенциальные σ_θ напряжения и радиальные перемещения U , возникающие в одной трубе, под действием внешней нагрузки $q = 0,09$ МПа определяют из выражений [5]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_R &= -\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) q; & \sigma_\theta &= -\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) q; \\ U &= -q \left(\frac{1-\nu}{E_M} \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} r - \frac{1+\nu}{E_M} \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где R_1, R_2 – внутренний и наружный радиусы трубы, м;
 r – текущий радиус, м.

При $R = R_1$ (у внутренней поверхности трубы)

$$\sigma_R = 0; \quad \sigma_\theta = -\frac{2}{1-k^2} q; \quad U = -\frac{2}{E_1} \frac{R_1}{(1-k^2)} q. \quad (8)$$

При $R = R_2$ (у наружной поверхности трубы)

$$\sigma_R = -q; \quad \sigma_\theta = -\frac{1+k^2}{1-k^2} q; \quad U = -\frac{R_2}{E_M} \left(\frac{1+k^2}{1-k^2} - \nu \right) q; \quad k = \frac{R_1}{R_2}. \quad (9)$$

Из выражений (8), (9) следует, что максимальные значения напряжения σ_θ и перемещения U достигают у внутренней поверхности трубы.

Используя исходные данные: $R_1 = 8 \cdot 10^{-2}$ м; $R_2 = 8,1 \cdot 10^{-2}$ м; $k = 0,94$; $E_M = 6 \cdot 10^2$ МПа, – получим $\sigma_\theta = -18$ МПа; $U = -1,2 \cdot 10^{-2}$ мм.

Для пенопласта низкого давления высокой плотности предельные значения напряжений на сжатие равны 20...36 МПа, то есть максимальные напряжения, возникающие в проемных трубах, не достигают предельных значений, а их перемещения малы. Следовательно, выполняются условия прочности и устойчивости проемных труб модели и натурной перемычки.

Выводы

1. На основании результатов моделирования методом эквивалентных материалов установлено, что максимальная погрешность перемещений и деформаций перемычек с проемными трубами и без них составляет не более 7,1 и 6,1 % соответственно, максимальные напряжения проемных труб не превышают предельных значений, перемещения малы, обеспечивая прочность и устойчивость перемычек.

2. Приведенные результаты будут использованы в дальнейшем при теоретических исследованиях напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возводимой из материалов на основе цементно-шлаковых смесей, под действием горного давления, воздушных ударных волн и температуры, что значительно упростит решение задачи.

Список литературы / References

1. Смоланов, С.Н. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки / С.Н. Смоланов, В.И. Голинько, М.С. Мартиненко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 260 с.

Smolanov, S.N., Golin'ko, V.I., Martinenko, M.S. *Izolatsionnyye, ventilatsionnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Isolation, ventilation and explosion-stable stoppings]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye Publ., 2002, 260 p.

2. Пейтибай, Г.И. Применение современных материалов для возведения изолирующих взрывоустойчивых сооружений / Г.И. Пейтибай, Э.Г. Чайковская, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 25 – 34.

Peftibay, G.I., Chaykovskaya, E.G., Luganskiy, A.M. *Primeneniye sovremennykh materialov dlya vozvedeniya izoliruyushchikh vzryvoustoychivykh sooruzheniy* [Use of modern materials for erection of isolating explosion-stable structures]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2010, issue 47, pp. 25 – 34.

3. Агеев, В. Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В.Г. Агеев. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

Ageyev, V.G. *Vzryvozashchita pri izolatsii pozharov v ugol'nykh shakhtakh* [Explosion protection by isolation of fires in coal mines]. Donetsk, Arpi Publ., 2014, 338 p.

4. Моделирование физических процессов в горном производстве / С.В. Борщевский, С.А. Калякин, И.Ф. Марийчук и др. – Донецк, 2016. – 250 с.

Borshchevskiy, S.V., Kalyakin, S.A., Mariychuk, I.F. etc. *Modelirovaniye fizicheskikh protsessov v gornom proizvodstve* [Simulation of physical processes in the mining production]. Donetsk, 2016, 250 p.

5. Клименко, Ю.В. Разработка технических средств индивидуальной противотепловой защиты и метода подготовки горноспасателей для работы в экстремальных микроклиматических условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / НИИ горноспасательного дела. – Донецк, 2003. – 189 с.

Klimenko, Yu.V. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv individual'noy protivoteplovoy zashchity i metoda podgotovki gornospasateley dlya raboty v ekstremal'nykh mikroklimaticeskikh usloviyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.26.01 / NII gornospasatel'nogo dela* [Working-out the individual heat protective technical means and the method of training of mine rescuers for the labor under extreme microclimatic conditions: dr. tech. sci. diss.: 05.26.01/ The Scientific Research Institute of Mine-rescue Work]. Donetsk, 2003, 189 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 08.02.2018

*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
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;
Ivan Filippovich Mariychuk, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: rpm2000avanek@mail.ru
The Donetsk State Technical University
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 301-03-09*

MODELLING THE INFLUENCE OF THE ROCK PRESSURE ON AN EXPLOSION-STABLE STOPPING

Purpose. To determine the influence of aperture metal pipes on the deflected mode of the explosion-stable stopping in a mine working of a coal mine, their strength and steadiness.

Methods. The experimental method of investigations with the use of the modeling by the method of equivalent materials that is widely applied to study the questions associated with demonstration of the rock pressure in the mine workings by development of minerals as well as by examination of the problems connected with rocks, movement of massifs including subject to steel timbering and anchorage.

Results. The dependences of the movement of deep benchmarks and relative strains in the mine rocks of the roof, walls and floor of the working on the distance up to its contour in the models of the stopping with the aperture pipes and without them were obtained. It is ascertained that the maximum error of their movements and deformations makes up 7.1 % and 6.1 % accordingly. The maximum tangential stresses of the aperture pipes don't exceed the corresponding allowed values, and the movement values are small.

Scientific novelty. It is ascertained by the method of the physical modeling, in particular by the method of equivalent materials, for the first time that one can neglect the influence of the aperture tubes on the deflected mode of the explosion-stable stopping when calculation of their strength and steadiness.

Practical value. The results adduced will be used for theoretical investigations of the deflected mode of the explosion-stable stopping being erected on the basis of cement-slag mixtures that is exposed to rock pressure, air shock waves and temperature with no account taken of the aperture metal pipes, what will considerably simplify the solution of the problem.

Key words: *explosion-stable stopping; model; aperture tubes; movement; deformation; stresses; strength; stability.*

УДК 614.844.2: 532.525.2

Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по научной работе;

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

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

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

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

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЗГОННОМ СОПЛЕ ПОЖАРОТУШАЩЕГО УСТРОЙСТВА

Цель. Получение математических зависимостей газодинамических параметров для обоснования конструкции разгонного сопла и камеры смешения устройства для тушения пожаров тонкораспыленной водой.

Методы. Аналитические исследования одномерного стационарного осесимметричного двухфазного течения в разгонном сопле. Использование законов неразрывности массового расхода газа и пожаротушащей жидкости, сохранения импульса и энергии при теплопередаче между фазами потока – газом и каплями, применение уравнения истечения газа и жидкости через дроссельные отверстия, уравнения состояния идеального газа.

Результаты. Построена математическая модель газодинамических процессов двухфазного потока в сопле пожаротушащего устройства, учитывающая конструктивные параметры всего пожаротушащего устройства: камеры смешения, разгонного сопла, режима истечения газа в камеру смешения.

Научная новизна. Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений, связывающая конструктивные и режимные параметры камеры смешения и разгонного сопла с газодинамическими параметрами двухфазного потока пожаротушащего устройства. Установлено влияние режима истечения газа в камеру смешения и дроссельного отверстия на газодинамические характеристики в разгонном сопле. Показано влияние конструктивных параметров распылительной втулки (диаметра отверстия, количества отверстий, коэффициента расхода) на скорость истечения газа в распылительную камеру, температуры, скорости и плотности газового и капельного потока. Обоснованы граничные условия газодинамических уравнений.

Практическая значимость. Моделирование приведенных газодинамических зависимостей позволяет расчетным путем обосновать конструктивные параметры основных узлов пожаротушащего устройства (разгонного сопла и камеры смешения), что может быть использовано для оптимизации пожаротушащего устройства по критериям эффективности (интенсивности подачи огнетушащего вещества, дальности, угла раскрытия струи воды). Газодинамические характеристики, полученные на срезе сопла с использованием предложенной системы уравнений, являются начальными условиями (начальные скорости и температуры капель и газа, плотность газа) для нахождения другого типа характеристик пожаротушащего устройства – внешнебаллистических, например дальности полета капель и их взаимодействия с конвективными потоками пламени, оценки способности проникновения в очаг пожара (путем сравнения импульсов капель и восходящих тепловых потоков горящего вещества).

Ключевые слова: *пожаротушащее устройство; двухфазный поток; газодинамические параметры; сопло; камера смешения.*

Постановка задачи. Значительное повышение эффективности подавления пламени за счет более тонкого распыления воды известно давно [1–4].

Теоретические и экспериментальные исследования генерации тонкораспыленной воды послужили основой для развития новой технологии пожаротушения. В рамках этой технологии наибольшее практическое применение получили импульсные и газодинамические устройства со специфическими требованиями к стабилизации рабочего давления, быстрдействию клапанных механизмов, тонкости фильтрации воды, конструкционным материалам, нехарактерным в традиционных устройствах пожаротушения. В связи с этим на смену конструктивным узлам – «оросители» и «распылители» – приходят новые узлы пожаротушащих устройств – «газодинамические сопла» и «форсунки». Газодинамические разгонные сопла играют ключевую роль в создании газокапельного потока, истекающего с большой скоростью. Физические процессы, протекающие в двухфазном потоке газового канала, динамически и температурно неравновесны (скорости и температуры каждой из фаз – газа и воды – не совпадают), а закон изменения статического давления по длине сопла – падающий, что приводит к изменению объемного расхода газа. Поэтому уравнения движения и истечения для несжимаемого газа не приемлемы. Учитывая актуальность разработки новых эффективных средств тушения пожаров тонкораспыленной водой, исследование физических процессов в разгонном сопле – важная задача.

Анализ последних исследований. Вопросы эффективности механизмов тушения пожаров тонкораспыленной водой рассмотрены в работе [5], где отмечено, что скорость подачи огнетушащего вещества – один из важнейших критериев эффективности устройств пожаротушения тонкораспыленной водой. Сравнение и анализ четырех моделей двухфазных струй различных научных школ на базе экспериментальных данных приведены в статье [6]. Определены области наиболее эффективного применения каждой модели. В работе [7] описаны критериальные исследования высококонцентрированных двухфазных течений и параметрические исследования турбулентной неравновесной монодисперсной осесимметричной струи без фазовых переходов, коагуляции и дробления капель. В ходе эксперимента измерены поля импульса и расходов фаз. Даны рекомендации по выбору параметров и проектированию пожарных систем различной мощности. В монографии [8] рассмотрены течения двухфазных потоков в каналах переменного сечения с прямой и криволинейной осью в абсолютном и относительном движении.

Цель работы. Получение математических зависимостей газодинамических параметров, обосновывающих конструктивные параметры устройства для тушения пожаров тонкораспыленной водой.

Материалы исследования. Течение газокапельного потока вдоль соплового канала описывается совокупностью уравнений количества движения, теплопередачи, сохранения энергии, неразрывности потока, идеального газа. При выводе уравнений приняты следующие допущения [8]:

- поток капель монодисперсный;

- течение одномерное и стационарное;
- фазовые переходы отсутствуют;
- капли сферические, равномерно распределены в объеме газового канала и не взаимодействуют между собой и стенкой канала.

Из курса гидродинамики сплошной среды известно, что изменение количества движения некоторой материальной системы равно главному вектору всех внешних сил, приложенных к системе. Применительно к конструкции камеры смешения и разгонного сопла пожаротушающего устройства (см. рисунок) уравнения, описывающие обмен количества движения между газовой и жидкостной фазами в проекциях на продольную ось сопла, выглядят следующим образом:

- для газовой фазы $G_{\Gamma} du_{\Gamma} = -S_{\Gamma} dP - dF_c - dF_{\text{тр}}$; (1)

- для капельной фазы $G_{\text{к}} du_{\text{к}} = -S_{\text{к}} dP - dF_c$; (2)

где G_{Γ} , $G_{\text{к}}$ – массовые расходы газа и жидкости, кг/с;

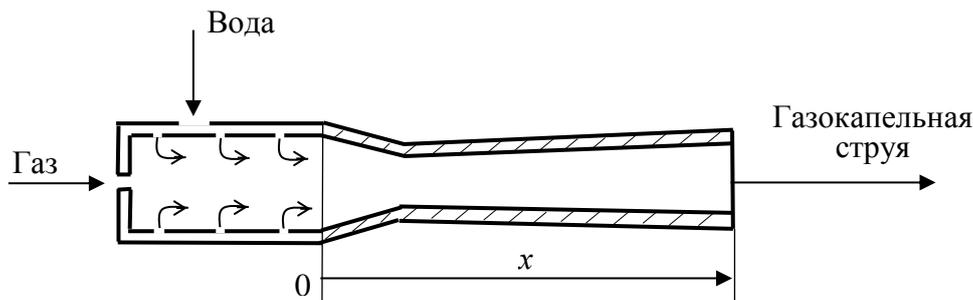
u_{Γ} , $u_{\text{к}}$ – скорости газа и капли, м/с;

S_{Γ} , $S_{\text{к}}$ – площади сечения газового и капельного потоков, м²;

P – статическое давление, Па;

F_c – сила аэродинамического сопротивления, Н;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения газа о стенки канала, Н.



Камера смешения и разгонное сопло пожаротушающего устройства

Сила аэродинамического сопротивления капель находится по формуле

$$F_c = n C_x \pi d_{\text{к}}^2 \rho_{\Gamma} (u_{\Gamma} - u_{\text{к}}) |u_{\Gamma} - u_{\text{к}}| / 8,$$

где n – количество капель;

$C_x = 24/\text{Re}_{\text{к}} + 4,4/\sqrt{\text{Re}_{\text{к}}} + 0,32$ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$d_{\text{к}}$ – диаметр капли, м;

$$\text{Re}_k = \frac{\rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) d_k}{\mu_\Gamma} \text{ — число Рейнольдса;}$$

ρ_Γ — плотность газа, кг/м³;

μ_Γ — коэффициент динамической вязкости газа, Па/с.

Силу трения газа о стенки канала найдем по формуле $F_{\text{тр}} = \tau S_\Gamma$,

где $\tau = c_f \frac{\rho_\Gamma u_\Gamma^2}{2}$ — касательное напряжение на стенке канала, Па;

$c_f = 0,079 / \text{Re}_\Gamma^{0,25}$ — коэффициент трения;

$S_\Gamma = \pi d_k x$ — площадь поверхности трения, м²;

x — осевая координата, м.

Количество капель в элементарном объеме $S_k dx$ найдем по формуле

$$n = S_k dx / v_k,$$

где S_k — площадь сечения капельного потока, м²;

v_k — объем капли, м³;

dx — элементарный участок сопла, м.

Подставляя полученные выражения для F_c , $F_{\text{тр}}$ в уравнения (1) и (2), получим

$$G_\Gamma du_\Gamma = -S_\Gamma dP - \frac{S_k}{v_k} \frac{C_x \pi d_k^2 \rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) \left| u_\Gamma - u_k \right|}{8} dx - c_f \frac{\rho_\Gamma u_\Gamma^2}{2} \pi d_k dx; \quad (3)$$

$$G_k du_k = -S_k dP - \frac{S_k}{v_k} \frac{C_x \pi d_k^2 \rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) \left| u_\Gamma - u_k \right|}{8} dx. \quad (4)$$

Перейдем от уравнений в приращениях к дифференциальным уравнениям движения газового и капельного потоков:

$$G_\Gamma \frac{du_\Gamma}{dx} = -S_\Gamma \frac{dP}{dx} - \frac{S_k}{v_k} \frac{C_x \pi d_k^2 \rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) \left| u_\Gamma - u_k \right|}{8} - c_f \frac{\rho_\Gamma u_\Gamma^2}{2} \pi d_k; \quad (5)$$

$$G_k \frac{du_k}{dx} = -S_k \frac{dP}{dx} - \frac{S_k}{v_k} \frac{C_x \pi d_k^2 \rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) \left| u_\Gamma - u_k \right|}{8}. \quad (6)$$

Уравнения неразрывности потока для газа и жидкости имеют вид

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} S_{\Gamma} u_{\Gamma} = \text{const}; \quad (7)$$

$$G_{\kappa} = \rho_{\kappa} S_{\kappa} u_{\kappa} = \text{const}. \quad (8)$$

Между S_{Γ} и S_{κ} существует связь

$$S = S_{\Gamma} + S_{\kappa}, \quad (9)$$

где S – площадь сечения канала сопла, м^2 .

Для нахождения температуры газа и капель можно использовать интегральный закон сохранения энергии двухфазного потока или законы сохранения энергии (мощности) при теплопередаче для каждой из фаз. Уравнения баланса мощности при теплопередаче от газа к частицам являются более простыми:

$$G_{\kappa} di_{\kappa} = \alpha (T_{\Gamma} - T_{\kappa}) dA, \quad (10)$$

где i_{κ} – удельная энтальпия капель, Дж/кг;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

T_{Γ}, T_{κ} – температуры газа и капель, К;

dA – приращение площади поверхности капель, заключенных в элементарном объеме $S_{\kappa} dx$, м^2 .

Коэффициент теплоотдачи для фаз, движущихся со скольжением ($u_{\Gamma} \neq u_{\kappa}$), определяют по следующей эмпирической формуле:

$$\alpha = \left(2 + 0,6 \text{Re}_{\kappa}^{0,5} \text{Pr}_{\Gamma}^{0,33} \right) \lambda_{\Gamma} / d_{\kappa},$$

где λ_{Γ} – коэффициент теплопередачи газа, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$\text{Pr}_{\Gamma} = \nu / a$ – число Прандтля;

ν – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$;

a – коэффициент температуропроводности газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

Величину dA можно найти, используя ранее полученное выражение для количества частиц n , которые заключены в элементарном объеме $S_{\kappa} dx$, путем его умножения на площадь поверхности одной капли πd_{κ}^2 , то есть

$$dA = \frac{S_{\kappa} dx \pi d_{\kappa}^2}{v_{\kappa}} = \frac{6 S_{\Gamma} dx}{d_{\kappa}}.$$

Подставляя dA в уравнение (10) и производя дифференцирование по длине x сопла, получаем дифференциальное уравнение теплопередачи от газа к частицам воды:

$$G_k \frac{di_k}{dx} = \frac{6S_\Gamma}{d_k} \alpha (T_\Gamma - T_k). \quad (11)$$

Правая часть уравнения (11) показывает удельную мощность, переданную каплям и отнесенную к единице длины газового канала (имеет размерность ватт на метр). С другой стороны, газовый поток приобретает тепловую мощность, равную правой части уравнения (11) со знаком минус, то есть имеет место уравнение

$$G_\Gamma \frac{di_\Gamma}{dx} = -\frac{6S_\Gamma}{d_k} \alpha (T_\Gamma - T_k), \quad (12)$$

где i_Γ – удельная энтальпия газа, Дж/кг.

Удельные энтальпии капель и газа найдем по формулам

$$i_k = C_k T_k \text{ и } i_\Gamma = C_{p\Gamma} T_\Gamma, \quad (13)$$

где $C_{p\Gamma}$ – теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

C_k – теплоемкость капель определенного вещества, Дж/(кг·К).

Давление P в газовом канале определим из уравнения состояния идеального газа:

$$P = \rho_\Gamma R_\Gamma T_\Gamma, \quad (14)$$

где R_Γ – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В полученной системе уравнений (5) – (9), (11) – (14) искомыми функциями являются: статическое давление P , скорости газа и капель u_Γ, u_k соответственно, температуры газа и капель T_Γ, T_k , плотность газа ρ_Γ .

Для решения прямой задачи – нахождения газодинамических параметров – известными считаются все остальные величины, входящие в соответствующие уравнения. Также считается, что задан профиль газового канала – закон изменения его диаметра $D(x)$ от длины канала. Задаваемый закон изменения диаметра канала связан с формулой (9) соотношением

$$D = \sqrt{4S/\pi}.$$

Для решения обратной задачи – синтеза профиля газового канала – диаметр D в функции от длины сопла считается искомой величиной. При этом задается закон изменения давления $P(x)$ вдоль газового канала.

Экспериментальные исследования, проведенные на разгонных соплах, показали плавное изменение давления от максимального в начале сопла до атмосферного на срезе сопла. На основании этого одним из способов (графическим или аппроксимирующим выражением) задают плавный закон изменения давления. Кривая закона изменения давления должна содержать два экстремума (максимум в начале сопла и минимум в конце сопла), то есть $\frac{dP}{dx} = 0$ при $x = 0$ и $\frac{dP}{dx} = 0$ при $x = l$.

Поскольку таких кривых изменения давления можно привести бесконечное множество, то обратная задача синтеза профиля сопла не однозначна. В первом приближении изменение статического давления газа вдоль сопла можно взять аналогично закону изменения давления в хорошо изученных соплах Лаваля:

$$P = P_0 / \left[\left(\frac{P_0}{P_{cp}} - 1 \right) \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right],$$

где P_0 – давление в начале сопла, Па;

P_{cp} – давление на срезе сопла, Па.

Оптимальность геометрического профиля проверяется только экспериментальным путем в соответствии с выбранным критерием эффективности пожаротушающего устройства, например дальностью заброса пожаротушающего вещества.

Для решения дифференциальных уравнений задают граничные условия в начале и в конце сопла, то есть $u_{\Gamma} = u_{\Gamma 0}$; $u_{\kappa} = u_{\kappa 0}$; $T_{\Gamma} = T_{\Gamma 0}$; $T_{\kappa} = T_{\kappa 0}$; $S = S_0$ при $x = 0$ и $S = S_l$ при $x = l$.

Решение приведенной системы уравнений возможно только приближенными численными методами с помощью ПЭВМ.

Граничное условие в начале сопла $u_{\Gamma 0}$ можно найти из уравнения Сен-Венана для скорости истечения газа через входное дроссельное отверстие:

$$u_{\Gamma 0} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_p}{\rho_{\Gamma}} \left[1 - \left(\frac{P_{\kappa}}{P_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (15)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха;

P_p – давление на выходе редукционного клапана, Па;

P_k – давление в камере смешения. Па.

Поскольку величина P_k не известна, то не известен режим истечения газа, а следовательно, невозможно определить и $u_{го}$. Однако в камере смешения соединяются два потока: газовый и жидкостный, а следовательно, в ней устанавливается общее (одинаковое) давление для обоих потоков. Эта специфическая особенность конструкции пожаротушающего устройства позволяет найти давление в камере смешения, используя формулу расхода жидкости через распылительные отверстия во втулке:

$$Q = \mu n f \sqrt{2/\rho_k} \sqrt{P_p - P_k},$$

где Q – объемный расход жидкости, м³/с;

$\mu = 0,65$ – коэффициент расхода распылительного отверстия;

$n = 20$ – количество отверстий;

f – площадь отверстия, м².

$$\text{Отсюда имеем } P_k = P_p - \frac{\rho_k Q^2}{2\mu^2 n^2 f^2}. \quad (16)$$

Подставляя P_k из (16) в уравнение (15), получаем

$$u_{ог} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p}{\rho_g} \left[1 - \left(1 - \frac{\rho_k Q^2}{2\mu^2 n^2 f^2 P_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (17)$$

При объемном расходе жидкости, равном $0,32 \cdot 10^{-3}$ м³/с, и давлении $P_p = 0,7$ МПа скорость газа в камере смешения, а следовательно, и на входе в сопло равна $u_{ог} = 56,6$ м/с.

Исходя из конструкции устройства очевидно, что давление P_k в камере смешения – граничное условие для газового сопла, т.е. уравнение (16) можно переписать в виде

$$P_k = P_{ог} = P_p - \frac{\rho_k Q^2}{2\mu^2 n^2 f^2}.$$

Учитывая, что диаметр отверстий распылителей равен 1,6 мм, находим площадь $f = 2 \cdot 10^{-6}$ м².

Следовательно, граничное значение давления на входе в газовое сопло равно $P_{ог} = 0,62 \cdot 10^6$ Па.

Так как вектор скорости впрыска жидкости в камеру смешения перпендикулярен продольной оси сопла, то скорость частиц жидкости в начале сопла близка к нулю. Поскольку камера смешения имеет определенную небольшую длину, то считается, что частицы жидкости не успевают набрать осевую скорость. В таком случае частицам жидкости в качестве граничного условия на входе в сопло задается некоторое минимальное значение скорости, равное $u_{к0} = 0,1$ м/с. Температуру жидкости и газа выбираем одинаковой и равной $T_{го} = T_{к0} = 293$ К.

Выводы. Приведенная система дифференциальных и алгебраических уравнений позволяет найти распределение газодинамических параметров вдоль газового канала сопла, включая и значения на срезе сопла, устанавливает связь между конструктивными параметрами сопла и камеры смешения с выходными характеристиками пожаротушающего устройства. Полученные на срезе сопла значения скоростей и температур газокапельного потока – исходные данные (начальные значения) для расчета внешнетраекторных характеристик потока, например, дальности.

Список литературы / References

1. Андрюшкин, А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением / А.Ю. Андрюшкин. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. – 400 с.

Andryushkin, A.Yu. *Formirovaniye dispersnykh sistem sverkhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniyem* [Forming of disperse systems by the supersonic gas-dynamic atomization]. Saint Petersburg, Balt. gos. techn. un-t Publ., 2012, 400 p.

2. Установки пожаротушения тонкораспыленной водой УПТВ [Электронный ресурс]. URL: http://npo-prostor.ru/wa-data/public/site/pdf/UPTV_for_site.pdf (дата обращения: 06.02.2018).

Ustanovki pozharotusheniya tonkoraspylennoy vodoy UPTV [The УПТВ installations for extinguishing the fires with the fine-air water] (Electronic resource). Available at: http://npo-prostor.ru/wa-data/public/site/pdf/UPTV_for_site.pdf (accessed: 06.02.2018).

3. Андрюшкин, А.Ю. Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением / А.Ю. Андрюшкин, М.Т. Пелех // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. – С. 53 – 58.

Andryushkin, A.Yu., Pelekh, M.T. *Polucheniye tonkoraspylennoy vody gazodinamicheskim raspyleniyem* [Processing of the fine-air water by the gas-dynamic atomization]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii – Bulletin of the Saint-Petersburg university*

of the state fire service of the Ministry of Emergency Situations (Russia), 2012, no. 1, pp. 53 – 58.

4. Цой, А.С. Режимы и механизмы подавления пламени распыленной водой : дис. ... канд. техн. наук / ФГАОУ ВО «Санкт-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого». – СПб., 2016. – 177 с.

Tsoy, A.S. *Rezhimy i mekhanizmy podavleniya plameni raspylyennoy vodoy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Conditions and mechanisms of the flame suppression with the sprayed water: cand. tech. sci. diss.]. FGAOU VO “Sankt-Peterburg. politekhn. un-t Petra Velikogo” Publ., Saint Petersburg, 2016, 177 p.

5. Пахомов, Г.А. Новейшая технология пожаротушения тонкораспыленной водой / Г.А. Пахомов [Электронный ресурс]. URL: <https://nachkar.ru/taktika/novie-tehnologii-tushenia.htm> (дата обращения: 06.02.2018).

Pakhomov, G.A. *Noveyshaya tekhnologiya pozharotusheniya tonkoraspylyennoy vodoy* [The most sophisticated technology of extinguishing the fire with the fine-air sprayed water] (Electronic resource). Available at: <https://nachkar.ru/taktika/novie-tehnologii-tushenia.htm> (accessed: 06.02.2018).

6. Моделирование двухфазных струйных течений. Сравнение моделей / Ю.В. Зуев, И.А. Лепешинский, А.В. Ципенко и др. // Аэрозоли: наука, вычислительные программы в России и странах СНГ. – 1996. – № 12. – С. 23.

Zuyev, Yu.V., Lepeshinskiy, I.A., Tsipenko, A.V. etc. *Modelirovaniye dvukhfaznykh struynykh techeniy. Sravneniye modeley* [Simulation of two-phase jet streams / Comparison of models]. *Aerosoli: nauka, vychislitel'nyye programmy v Rossii i stranakh SNG – Aerosols: science, calculating programs in Russia and CIS lands*, 1996, no. 12, p. 23.

7. Воронежский, А.В. Экспериментальные и теоретические исследования двухфазных газокапельных течений в соплах и струях с высокой массовой концентрацией жидкости в газе: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Воронежский. – М., 2000 [Электронный ресурс]. URL: <http://tekhnosfera.com/eksperimentalnye-i-teoreticheskie-issledovaniya-dvuhfaznyh-gazokapelnyh-techeniy-v-soplah-i-struyah-s-vysokoy-massovoy-ko> (дата обращения: 06.02.2018).

Voronetskiy, A.V. *Eksperimental'nyye i teoreticheskiye issledovaniya dvukhfaznykh gazokapel'nykh techeniy v soplakh i struyakh s vysokoy massovoy kontsentratsiyey zhidkosti v gaze: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Experimental and theoretical investigations of the two-phase gas-drop currents in the nozzles and streams with the high mass concentration of fluid in gas: author's abstract of the cand. tech. sci. diss.]. (Electronic resource). Moscow, 2000. Available at: <http://tekhnosfera.com/eksperimentalnye-i-teoreticheskie-issledovaniya-dvuhfaznyh-gazokapelnyh-techeniy-v-soplah-i-struyah-s-vysokoy-massovoy-ko> (accessed: 06.02.2018).

8. Барилевич, В.А. Основы термогазодинамических двухфазных потоков и их численное решение / В.А. Барилевич. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 425 с.

Barilovich, V.A. *Osnovy termogazodinamicheskikh dvukhfaznykh potokov i ikh chislennoye resheniye* [Basic foundations of thermogasdynamical two-phase flows and their numerical solution]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta Publ., 2009, 425 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Сынковым.
Дата поступления рукописи 06.02.2018

Pyotr Semyonovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

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

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

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

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

GASDYNAMIC PROCESSES IN AN OVERSPEED NOZZLE OF A FIRE-EXTINGUISHING DEVICE

Purpose. Obtaining the mathematical dependences of gas-dynamic parameters to substantiate the construction of the overspeed nozzle and mixing chamber of the device for extinguishing the fires with the fine-air water sprayed.

Methods. Analytical investigations of the one-dimensional stationary axisymmetric two-phase current in the overspeed nozzle. Use of the laws of continuity of mass consumption of the gas and fire-extinguishing fluid, momentum and energy conservation by heat transfer between the flow phases, i.e. gas and drops, application of the equation of gas and fluid outflow through throttle openings, that one of the perfect gas equation.

Results. The mathematical model of the gas-dynamic processes of the two-phase flow in the nozzle of the fire-extinguishing device was built. It takes into account the design parameters of the whole fire-extinguishing device, i.e. mixing chamber, overspeed nozzle, conditions of the gas outflow into the mixing chamber.

Scientific novelty. The set of differential and algebraic equations connecting the design and conditions parameters of the mixing chamber and the overspeed nozzle with the gas-dynamic parameters of the two-phase flow of the fire-extinguishing device was obtained. The influence of the conditions of the gas outflow into the mixing chamber and of the throttle opening on the gas-dynamic characteristics in the overspeed nozzle was established. The influence of the design parameters of the spray-type bushing (diameter of the opening, number of openings, discharge coefficient) on the gas cleanup rate into the spray chamber, of temperature, rate and density of the gas and drop flow was shown. The boundary conditions of the gas-dynamic equations were substantiated.

Practical value. The modeling of the gas-dynamic dependences adduced allows substantiating the design parameters of the principal units of the fire-extinguishing device (i.e. overspeed nozzle and mixing chamber) by a calculation way, what may be used for optimization of the fire-extinguishing device according to criteria of efficiency (intensity of feed of a fire-extinguishing substance, range, opening angle of a water stream). The gas-dynamic characteristics obtained on the nozzle exit section with the use of the set of equations proposed are the initial conditions (initial speeds and temperatures of drops and gases, gas density) for finding of another type of characteristics of the fire-extinguishing device, i.e. of the outward ballistic characteristics, for example of flight range of the drops and their interaction with convective flame streams, of estimation of ability of penetration into a seat of fire (by means of comparison of drop pulses and ascending thermal currents of the burning substance).

Key words: *fire-extinguishing device; two-phase flow; gas-dynamic parameters; nozzle; mixing chamber.*

УДК 622.812.2:621.31

*Александр Петрович Ковалев, д-р техн. наук, проф.; e-mail: abrecap@mail.ru;
Ирина Игоревна Москвина, канд. техн. наук, доц.; e-mail: iriwka-gt@inbox.ru
Донецкий национальный технический университет
283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. +38 071 378 19 99*

**ВЕРОЯТНОСТЬ ВЗРЫВОВ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ШАХТАХ**

Цель. Определить вероятность взрывов метановоздушной смеси в течение времени при эксплуатации электрооборудования угольных шахт.

Методы. Теоретические исследования процесса формирования взрывов метановоздушной смеси при эксплуатации электрооборудования на участке угольной шахты проводили с использованием марковских процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

Результаты. Для конкретного участка угольной шахты определена вероятность появления взрывов метановоздушной смеси при эксплуатации электрооборудования. Определены параметры (частота появления опасного загазования участка угольной шахты; длительность нахождения взрывоопасной смеси в выработке; интенсивность появления опасного электрического источника и длительность его существования), воздействуя на которые при эксплуатации электрооборудования и средств газовой защиты в тупиковой выработке можно обеспечить нормируемый (ГОСТ 12.1.10.76) уровень взрывобезопасности.

Научная новизна. Впервые получены формулы, с помощью которых предоставляется возможность оценить вероятность взрывов в угольной шахте при эксплуатации электрооборудования.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы для прогнозирования возможности взрывов метановоздушных смесей на участке угольной шахты при эксплуатации электрооборудования и разработки организационно-технических мероприятий по их предупреждению.

Ключевые слова: авария; взрывоопасность; газозоодушная смесь; искра; угольная шахта.

Постановка проблемы. Аварии с тяжкими последствиями, которые ежегодно происходят в различных странах мира, привели к тому, что ООН была разработана «Конвенция о трансграничном воздействии промышленных аварий», в которой говорится, что государства ЕЭС, по мере необходимости, выступают с предложениями о сотрудничестве в проведении исследований и разработке методов и технологий, способных предотвратить аварии техногенного характера, обеспечить готовность к ним и ликвидацию их последствий.

По данным МакНИИ, за период с 08.02.1997 и по 22.02.2007 на угольных шахтах произошло 36 взрывов и вспышек метановоздушной смеси. Приведенные данные свидетельствуют о том, что проблема обеспечения взрывобезопасности в угольных шахтах до сих пор полностью не решена.

Состояние вопроса. Марковские процессы с дискретным числом состояний и непрерывным временем нашли широкое применение при моделировании процессов, объясняющих формирование взрывов и пожаров в газифицированных помещениях на поверхности при эксплуатации сетей 0,4/0,22 кВ [1-4].

Преимущество используемых марковских моделей по сравнению с логико-вероятностными в том, что они позволяют учитывать длительность нахождения элементов системы в опасных состояниях, что дает более точные прогнозы уровня взрывобезопасности и живучести технологических объектов.

Цель исследования – определить вероятность появления взрывов метановоздушной смеси в течение времени при эксплуатации электрооборудования угольных шахт.

Результаты исследования. Предположим, что взрыв на участке угольной шахты происходит при совпадении в пространстве и времени двух случайных событий: появления взрывоопасной метановоздушной смеси и опасного источника её зажигания [5].

Под опасным состоянием газовой смеси будем понимать случайную загазованность выработки угольной шахты с течением времени до взрывоопасной концентрации. Опасный источник зажигания – электрическая искра (дуга), мощность и длительность которой достаточна для воспламенения метановоздушной смеси во взрывоопасной концентрации, случайно появившейся в выработке.

Представим изменение состояния воздуха в выработке шахты с помощью случайной функции $\xi(t)$, которая может принимать два значения: 0 – в выработке отсутствует опасная метановоздушная смесь; 1 – в выработке образовалась опасная концентрация метановоздушной смеси.

Характер изменения функции $\xi(t)$ с течением времени представляет собой чередующиеся отрезки времени $\xi_1^{(0)}, \xi_2^{(0)}, \dots, \xi_n^{(0)}$ и $\xi_1^{(1)}, \xi_2^{(1)}, \dots, \xi_n^{(1)}$, для которых последовательно $\xi(t) = 0$ и $\xi(t) = 1$, где $\xi_i^{(0)}, i = \overline{1, n}$ – случайные интервалы времени между появлением опасной концентрации метановоздушной смеси, а $\xi_i^{(1)}, i = \overline{1, n}$ – случайные отрезки времени нахождения газовой смеси в опасной концентрации.

Появление в выработке опасного источника зажигания метановоздушной смеси можно представить в виде случайной функции $\alpha(t)$, характер изменения которой с течением времени представляет чередующиеся интервалы времени $\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_m^{(0)}$ и $\alpha_1^{(1)}, \alpha_2^{(1)}, \dots, \alpha_m^{(1)}$, для которых последовательно $\alpha(t) = 0$ и $\alpha(t) = 1$, где промежутки $\alpha_j^{(0)}, j = \overline{1, m}$ – интервалы времени между появлением опасного источника зажигания, а $\alpha_j^{(1)}, j = \overline{1, m}$ – длительность существования опасного источника зажигания.

В этом описании взрыв метановоздушной смеси в выработке шахты произойдет в момент наложения промежутков времени $\xi_i^{(1)}$ и $\alpha_j^{(1)}$. Возникновение взрыва в выработке не зависит от длины общей части

наложившихся промежутков времени $\xi_i^{(1)}$ и $\alpha_j^{(1)}$, а зависит только от того, соприкоснулись они или нет.

О статистической природе функции $\xi(t)$ предположим следующее: вероятность загазованности выработки до взрывоопасной концентрации за промежуток времени Δt равна $\lambda_1 \Delta t + o(\Delta t)$, где $o(\Delta t)$ – значение высшего порядка малости по сравнению с Δt . Вероятность того, что за время Δt опасная концентрация метановоздушной смеси в тупиковой выработке станет неопасной, равна $\mu_1 \Delta t + o(\Delta t)$. Величины λ_1 и μ_1 являются параметрами процесса $\xi(t)$.

Параметр λ_1 характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасная концентрация газовой смеси в выработке переходит во взрывоопасное состояние; μ_1 – интенсивность или скорость, с которой опасная концентрация газовой смеси в выработке переходит в безопасное состояние.

Аналогична природа и функции $\alpha(t)$. Предположим, что вероятность появления опасного источника зажигания метановоздушной смеси за промежуток времени Δt равна $\lambda_2 \Delta t + o(\Delta t)$. Вероятность того, что за время Δt опасный источник зажигания метановоздушной смеси перейдет в безопасное состояние, будет равна $\mu_2 \Delta t + o(\Delta t)$. Величины λ_2 и μ_2 являются параметрами процесса $\alpha(t)$, λ_2 – характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени между появлением источника зажигания сменяются опасными; μ_2 – интенсивность или скорость, с которой опасные промежутки времени существования источника зажигания сменяются безопасными.

Принятые допущения означают, что $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ можно рассматривать как два независимых марковских процесса с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

Взрыв в выработке произойдет в момент случайного нахождения процессов в состоянии 1, т.е. когда $\xi(t) = 1$ и $\alpha(t) = 1$. Будем считать, что в начальный момент времени $\xi(t) = 0$ и $\alpha(t) = 0$.

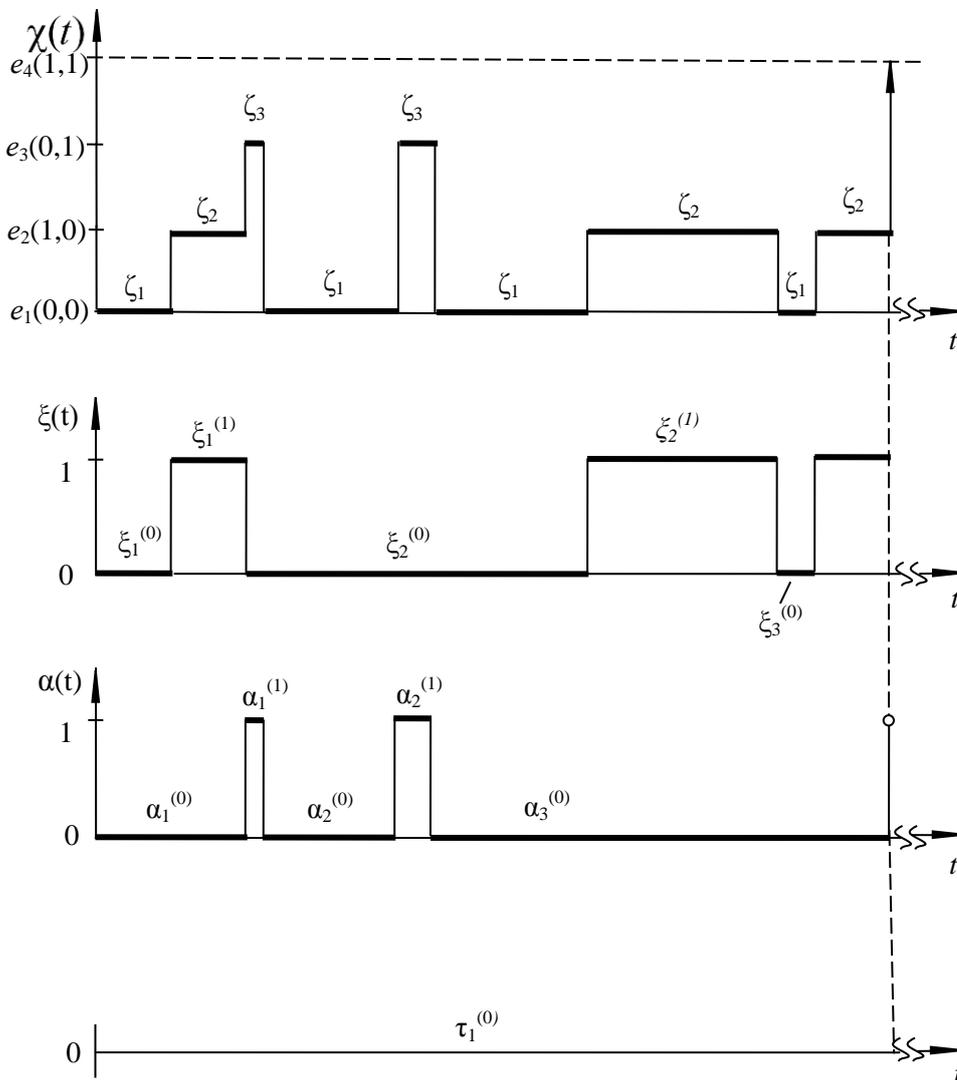
Задача состоит в том, что, зная параметры процессов: $\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$, необходимо определить вероятность $Q(t)$ взрывов в тупиковой выработке; среднее время до первого взрыва τ_1 , дисперсию D_1 .

Совокупность процессов $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ рассмотрим как один марковский процесс с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем.

В любой момент времени система «источник-среда» может находиться в одном из четырех несовместных (события e_i , $i = \overline{1,4}$ называются несовместными, если никакие два из них не могут появиться вместе) состояний: $E\{e_1(0,0); e_2(1,0); e_3(0,1); e_4(1,1)\}$, где $e_1(0,0)$ означает, что в

выработке отсутствует опасная метановоздушная смесь и отсутствует опасный источник зажигания метановоздушной смеси; $e_2(1,0)$ – в выработке образовалась опасная метановоздушная смесь и в электрооборудовании, которое находится в выработке, отсутствует опасный источник зажигания метановоздушной смеси; $e_3(0,1)$ – в выработке отсутствует опасная метановоздушная смесь и в электрооборудовании выработки появился опасный источник зажигания метановоздушной смеси; $e_4(1,1)$ – в выработке образовалась опасная метановоздушная смесь и появился источник её зажигания.

При случайном попадании процесса в поглощающее состояние $e_4(1,1)$ происходит взрыв метановоздушной смеси в выработке (см. рисунок).



Возможная реализация марковского случайного процесса с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем, где $e_1(0,0)$; $e_2(1,0)$; $e_3(0,1)$; $e_4(1,1)$ – состояния системы «источник-среда»; ζ_k – время нахождения системы в одном из трех возможных состояний; $k = \overline{1,3}$ $\tau_1^{(0)}$ – время до первого взрыва в выработке угольной шахты

Среднее время до взрывов в выработке найдем из общей системы алгебраических уравнений:

$$\tau = N\xi, \quad (1)$$

где ξ – вектор-столбец, все три элемента которого равны 1;
 τ – вектор-столбец, который состоит из трёх элементов τ_1, τ_2, τ_3 .
 Матрица N в данном случае имеет вид

$$N = \begin{pmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1 + \mu_2 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

Подставим матрицу (2) в систему алгебраических уравнений (1) и получим формулы для определения среднего времени до взрыва метановоздушной смеси:

$$\tau_1 = \frac{(\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(\mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \quad (3)$$

$$\tau_2 = \frac{\mu_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_2) + \lambda_2\mu_1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}; \quad (4)$$

$$\tau_3 = \frac{\mu_2(\mu_1 + \lambda_2) + \lambda_1\mu_2 + \lambda_2(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)}, \quad (5)$$

где τ_i – среднее время до взрыва метановоздушной смеси в выработке угольной шахты, если в начальный момент времени система «источник-среда» находится в одном из состояний $e_1(0,0)$, $e_2(1,0)$, $e_3(0,1)$ соответственно $i = \overline{1,3}$.

Дисперсию времени до взрывов найдем из общей системы алгебраических уравнений для поглощающей цепи Маркова:

$$D = (2N - I)\tau - \tau_{sq}, \quad (6)$$

где I – единичная матрица;

τ_{sq} – вектор-столбец из элементов τ_1^2 ; τ_2^2 ; τ_3^2 ;

D – вектор-столбец из элементов D_1 , D_2 и D_3 .

Подставив в систему уравнений (6) матрицу (2), находим

$$D_1 = \left[\frac{2(\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \mu_2)}{\Delta} - \tau_1 - 1 \right] \tau_1 + \frac{2}{\Delta} [\lambda_1(\lambda_1 + \mu_2)\tau_2 + \lambda_2(\lambda_2 + \mu_1)\tau_3], \quad (7)$$

где $\Delta = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)$;

D_1 – дисперсия времени до взрыва метановоздушной смеси в выработке угольной шахты, если в начальный момент времени система «источник-среда» находилась в состоянии $e_1(0,0)$.

В том случае, если

$$\tau_1 = \sqrt{D_1}, \quad (8)$$

тогда вероятность взрывов на участке угольной шахты можно определить по формуле

$$Q(t) = 1 - e^{-t/\tau_1}. \quad (9)$$

В том случае, если условие (8) не выполняется, тогда вероятность взрывов метановоздушной смеси в выработке определяют из выражения

$$Q(t) = 1 - [P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)], \quad (10)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ находят из решения системы линейных дифференциальных уравнений вида

$$P'(t) = P(t)A. \quad (11)$$

Система дифференциальных уравнений (11) решается при начальных условиях: $P_1(0) = 1$; $P_2(0) = 0$; $P_3(0) = 0$, где $P'(t)$ – вектор-строка $[P'_1(t), P'_2(t), P'_3(t)]$; $P(t)$ – вектор-строка $[P_1(t), P_2(t), P_3(t)]$.

$$A = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Используя матрицу (12) системы уравнений (11), находим $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и, подставив их значения в формулу (10), получим

$$Q(t) = 1 - \left(\frac{s_1^2 + as_1 + c_1}{3s_1 + 2as_1 + b} e^{s_1 t} + \frac{s_2^2 + as_2 + c_1}{3s_2 + 2as_2 + b} e^{s_2 t} + \frac{s_3^2 + as_3 + c_1}{3s_3 + 2as_3 + b} e^{s_3 t} \right), \quad (13)$$

где S_1, S_2, S_3 – корни кубического уравнения:

$$S^3 + aS^2 + bS + c = 0, \quad (14)$$

коэффициенты

$$\begin{aligned} a &= 2\lambda_1 + 2\lambda_2 + \mu_1 + \mu_2; \\ b &= \lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1); \\ c &= \lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2); \\ c_1 &= \lambda_1(\lambda_1 + \mu_2) + \lambda_2(\lambda_2 + \mu_1) + (\lambda_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_1). \end{aligned}$$

Корни S_1, S_2, S_3 кубического уравнения (14) находим по формуле Кардано [3].

Параметры процессов $\beta(t)$ и $\alpha(t)$ находим следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{T}; \quad (15)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{t_1}; \quad (16)$$

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{T}; \quad (17)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{t_2}; \quad (18)$$

где n_1 – количество опасных загазований выработки угольной шахты в течение времени наблюдения за эксплуатацией электрооборудования участка;

t_1 – средняя длительность существования взрывоопасной метановоздушной среды в выработке;

n_2 – количество случаев появления опасных в отношении воспламенения метановоздушной смеси электрических источников зажигания в течение времени наблюдения за эксплуатацией электрооборудования;

t_2 – средняя длительность существования электрического источника, мощность и длительность которого позволяет зажигать опасную метановоздушную смесь;

T – время наблюдения за эксплуатацией участка угольной шахты и его электрооборудованием.

Формулы (3)-(7), (9), (13) позволяют оценить взрывобезопасность любой выработки угольной шахты, опасной в отношении взрывов.

Пример. Определить вероятность взрывов $Q(t)$ в течение года в тупиковой выработке угольной шахты, если известно: $n_1 = 12$; $t_1 = 0,27$ ч; $n_2 = 5$; $t_2 = 0,2$ с.

Решение

Используя формулы (15) – (18), находим параметры случайных процессов $\beta(t)$ и $\alpha(t)$:

$$\lambda_1 = \frac{12}{8760} = 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$\mu_1 = \frac{1}{0,27} = 3,7 \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda_2 = \frac{5}{8760} = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

$$\mu_2 = \frac{3600}{0,2} = 18000 \text{ ч}^{-1}.$$

По формулам (3) и (7) находим

$$\tau_1 = 4,74 \cdot 10^6 \text{ ч}; D_1 = 2,24 \cdot 10^{13} \text{ ч}^2.$$

Поскольку $\tau_1 = \sqrt{D_1}$, вероятность взрывов метановоздушной смеси на участке угольной шахты в течение $t = 8760$ ч находим, используя формулу (9):

$$Q(8760) = 1 - e^{-\frac{8760 \cdot 10^{-6}}{4,74}} = 1,85 \cdot 10^{-3}.$$

Нормируемый уровень взрывобезопасности участка угольных шахт $Q_0(8760) \leq 1 \cdot 10^{-6}$ (ГОСТ 12.1.010-76).

Из расчета видно, что уровень взрывобезопасности исследуемой тупиковой выработки выше нормируемого в 158 раз ($K = \frac{1,58 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 158$ раз).

Если за счет организационных и технических мероприятий удастся уменьшить частоту загазования тупиковой выработки до $\lambda_1 \leq 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, среднее время срабатывания газовой защиты будет равно $t_1=1$ мин ($\mu_1 \geq 60 \text{ ч}^{-1}$), частота появления опасного в отношении взрыва метановоздушной смеси электрического источника будет $\lambda_2 \leq 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, а среднее время срабатывания максимальной токовой защиты будет $t_2 = 0,2$ с ($\mu_2 = 18000 \text{ ч}^{-1}$), то уровень взрывобезопасности тупиковой выработки будет обеспечен, т.е., используя формулу (9), находим

$$Q(8760) = 1 - e^{-\frac{8760 \cdot 10^9}{8,74}} = 1 \cdot 10^{-6}.$$

Выводы

1. Изменение состояния газовой смеси в выработке угольной шахты и появление электрического источника зажигания, мощность и

длительность которого достаточны для воспламенения взрывоопасной метановоздушной смеси, целесообразно представить в виде двух независимых марковских процессов $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ с двумя дискретными состояниями («0» – безопасное состояние, «1» – опасное) и непрерывным временем.

2. Каждый из процессов $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ характеризуется двумя параметрами: λ_1 , μ_1 и λ_2 , μ_2 , которые определяют по экспериментальным данным.

3. Для уменьшения вероятности взрывов метановоздушной смеси в выработке следует разрабатывать такие организационные и технические мероприятия, которые позволяют снижать значения λ_1 и λ_2 и увеличивать μ_1 и μ_2 до тех пор, пока не окажется, что $Q(8760) \leq 1 \cdot 10^{-6}$.

Список литературы / References

1. Ковалёв, А.П. Об оценке взрывобезопасности квартир, эксплуатирующих бытовой газ / А.П. Ковалёв, И.И. Лехтман, В.П. Вьюнов // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк, 2009. – Вип. 9 (158). – С. 127 – 134.

Kovalyev, A.P., Lekhtman, I.I., V'yunov, V.P. *Ob otsenke vzryvobezopasnosti kvartir, ekspluatiruyushchikh bytovoy gaz* [On evaluation of the explosion safety of flats exploiting the domestic gas]. *Zbirnyk naukovykh prats' Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu. Seriiia "Elektrotekhnika i energetyka"* [Collection of scientific papers of the Donetsk national technical university. Series "Electrical engineering and energetics"]. Donetsk, 2009, issue 9 (158), pp. 127 – 134.

2. Белоусенко, И.В. Влияние надёжности оборудования газораспределительных пунктов на взрывобезопасность газифицированных объектов / И.В. Белоусенко, А.П. Ковалев, И.И. Лехтман // Промышленная энергетика. – 2011. – №11. – С. 48 – 54.

Belousenko, I.V., Kovalyev, A.P., Lekhtman, I.I. *Vliyaniye nadyezhnosti oborudovaniya gazoraspredelel'nykh punktov na vzryvobezopasnost' gazifitsirovannykh ob'yektov* [Influence of reliability of the equipment of gas-distributing points on the explosion safety of objects supplied with gas]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2011, no. 11, pp. 48 – 54.

3. Калякин, С.А. Взрывоопасность бытового газа и способы взрывозащиты квартир / С.А. Калякин, А.П. Ковалёв, И.И. Лехтман // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк, 2012. – № 1(12) – 2(13). – С. 107 – 113.

Kalyakin, S.A., Kovalyev, A.P., Lekhtman, I.I. *Vzryvoopasnost' bytovogo gaza i sposoby vzryvozashchity kvartir* [Explosion hazard of the domestic gas and methods of explosion protection of flats]. *Zbirnyk naukovykh prats' Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu. Seriiia "Elektrotekhnika i energetyka"*

[Collection of scientific papers of the Donetsk national technical university. Series “Electrical engineering and energetics”]. Donetsk, 2012, no. 1(12) – 2(13), pp. 107 – 113.

4. Ковалев, А.П. Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ в промышленных электрифицированных помещениях / А.П. Ковалев, О.Я. Солёная // Промышленная энергетика. – 2013. – № 11. – С. 43 – 46.

Kovalyev, A.P., Solyenaya, O.Ya. *Otsenka pozharnoy opasnosti seti 0,4/0,22 kV v promyshlennykh elektrifitsirovannykh pomeshcheniyakh* [Evaluation of the fire hazard of the net 0.4/0.22 kV in industrial electrified premises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2013, no. 11, pp. 43 – 46.

5. Ковалев, А.П. Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при ее эксплуатации / А.П. Ковалев, О.Я. Солёная // Электричество. – 2014. – № 11. – С. 36 – 44.

Kovalyev, A.P., Solyenaya, O.Ya. *Otsenka pozharnoy opasnosti seti 0,4/0,22 kV pri yeye ekspluatatsii* [Evaluation of the fire hazard of the net 0.4/0.22 kV by its operation]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no. 11, pp. 36 – 44.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 05.09.2017

Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), prof.; e-mail: abrecap@mail.ru;

Irina Igorevna Moskvina, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: iriwka-gt@inbox.ru

The Donetsk National Technical University

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone 071 378 19 99

PROBABILITY OF METHANE-AIR MIXTURE EXPLOSIONS BY OPERATION OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT IN MINES

Purpose. To determine the probability of methane-air mixture explosions in the course of time by operation of the electrical equipment of the coal mines.

Methods. The theoretical investigations of the process of formation of the methane-air mixture explosions by operation of the electrical equipment in a district of the coal mine were carried out with the use of the Markovian processes with the digital number of states and continuous time.

Results. The probability of appearance of the methane-air mixture explosions by operation of the electrical equipment was determined for the concrete district of the coal mine. The parameters (frequency of appearance of the hazardous gas pollution of the district of the coal mine; duration of presence of the explosive mixture in a mine working; intensity of appearance of the hazardous electrical source and duration of its existence) were determined. It is possible to guarantee the rated explosion safety level (State Standard 12.1.10.76) when their influencing by operation of the electrical equipment and gas protection means in a blind drift.

Scientific novelty. The formulae, with the help of which an opportunity is allowed to evaluate the probability of the explosions in the coal mine by operation of the electrical equipment, were obtained for the first time.

Practical value. The results of the investigations may be used to forecast the possibility of the methane-air mixture explosions in the district of the coal mine by operation of the electrical equipment and to work out the organizational and technical measures on their prevention.

Key words: *accident; explosion hazard; gas-air mixture; spark; coal mine.*

УДК 614.841.245:621.313.012.5

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

Евгений Олегович Зинченко, мл. науч. сотр.; e-mail: evgeniy.zintchenko@yandex.ru

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

ПРИЗНАКИ БОЛЬШИХ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Цель. Установление аварийного режима работы по оплавлениям поверхностей контактных соединений, изъятых с места пожара.

Методы. Исследования контактных соединений со следами оплавлений.

Результаты. Определение причины оплавлений контактных соединений, изъятых с места пожара.

Научная новизна. Представлены характерные признаки аварийного режима работы – большое переходное сопротивление в контактных соединениях электроустановок при визуальном осмотре.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют определить причастность аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара.

Ключевые слова: *аварийные режимы работы; большое переходное сопротивление; контактное соединение; инструментальные исследования; пожар.*

Постановка проблемы. С потребностью человека в автоматизации различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и быта непосредственно связано увеличение источников пожарной опасности. В большинстве промышленно развитых стран в связи с неисправностью или неправильной эксплуатацией электротехнических устройств ежегодно происходит от 20 до 25 % пожаров, причем наблюдается тенденция роста количества таких пожаров [1].

Пожары при эксплуатации электроустановок происходят, главным образом, из-за короткого замыкания, нарушения правил эксплуатации электроустановок, перегрузки электрических сетей, образования больших переходных сопротивлений в контактных соединениях, электрических искр, дуг и др. (см. таблицу).

Пожарная опасность больших переходных сопротивлений повышается при длительных устойчивых тепловых режимах в контактных соединениях, что приводит к термическому разрушению изоляции и защитных оболочек электроустановок. Источниками зажигания являются нагретые проводники, электрическая дуга, раскаленные или горящие частицы металла, при этом происходит оплавление изоляции проводов и контактных соединений.

Пожары при неправильной эксплуатации электроустановок в ДНР в 2015 г.

Причина пожара	Доля пожара, %
Короткое замыкание	69,2
Перегрев электроустановок	20,8
Большое переходное сопротивление	7,1
Перегрузка по току электроустановок	2,9
Итого	100

Причинами возникновения больших переходных сопротивлений как пожароопасного режима работы электроустановок являются [2]:

- недостатки конструкции и изготовления;
- несоответствие применяемых материалов и комплектующих условиям эксплуатации;
- несовершенство противопожарных и нормативных требований;
- неправильная эксплуатация;
- некачественный монтаж;
- старение изоляционных материалов;
- скрытые заводские дефекты;
- значительный износ электрооборудования;
- рост энергопотребления без пропорционального ввода новых энергетических мощностей.

Пожарная опасность электрического соединения в режиме больших переходных сопротивлений проявляется при номинальных значениях электрического тока или при значениях тока меньше номинального, при этом нагревание участка с переходным сопротивлением происходит только вследствие увеличения сопротивления.

Анализ последних исследований. В работе [3] исследованы физические процессы и пожарная опасность аварийного режима работы – большое переходное сопротивление, но не представлены характерные признаки. В данной статье изложены результаты визуального осмотра оплавлений контактных соединений и их связь с возникновением пожара.

Результаты исследований. Исследования по установлению причастности аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара в настоящее время проводятся совместно специалистами НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР и Испытательной пожарной лаборатории Республиканского спасательного центра МЧС ДНР.

Для этих целей в НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР разработаны Методические рекомендации по определению признаков большого переходного сопротивления и температуры нагревания электроустановок.

При визуальном осмотре для предварительной оценки наличия аварийного режима работы применяли биноклярную лупу с подсветкой MP244L с увеличением в 1,5...6 раз и цифровой фотоаппарат Canon PowerShot SX410 IS для фиксации признаков аварийных режимов работы электросети.

Исследованиями установлено, что тепловыделение в контактных соединениях при безыскровом режиме больших переходных сопротивлений приводит:

- к старению (и как следствие – пробою), карбонизации и дальнейшему оплавлению изоляционного материала. При термическом воздействии в месте контактных соединений поверхность изоляции тускнеет и имеет цвет от светло-коричневого до черного с образованием продольных складок с последующим плавлением (около 210 °С), при этом твердость поверхности изоляции повышается (рис. 1);

- к повышению температуры и образованию на фрагментах контактных соединений локальных оплавлений и наплывов со слоем копоти (рис. 2, 3).

При искровом режиме больших переходных сопротивлений под воздействием электрического поля промежутки между контактами ионизируются и при достаточном напряжении происходит разряд – электрическая искра, которая переходит в электрическую дугу с деформацией (износом) и оплавлением металла контактов. При исследовании образца, изъятых с места пожара – латунного винтового контактного соединения, – было установлено оплавление его поверхности и наплыв меди на винте (рис. 4, 5). Изменение структуры поверхности контактного соединения свидетельствует о воздействии температуры значительно выше температуры плавления латуни (950 °С). Возникновение электрической дуги между контактирующими элементами приводит к разлету искр и вкраплению горящих частиц металла на ближайшие поверхности горючих материалов, их прожогу и последующему воспламенению.

При исследовании образца – штепсельной электроколодки с включенной штепсельной электровилкой, изъятых с места пожара, было установлено, что в месте соединения не обеспечивалась достаточная площадь контакта, что привело к локальному выделению теплоты и термодеструкции (потемнению) фрагмента корпуса электровилки и изменению шероховатости поверхности фрагмента электроколодки (рис. 6).

При исследовании образца – штепсельной электровилки – было установлено, что в месте винтовых контактных соединений присутствуют следы химической коррозии металла в результате взаимодействия с окружающей средой, при этом образовалась на поверхности металла оксидная пленка, которая обладает большим переходным контактным сопротивлением. При локальном повышении температуры в месте контактного соединения интенсивность окисления металла увеличивалась.



Рис. 1. Оплавление изоляционного материала на поверхности контактного соединения «в скрутку»

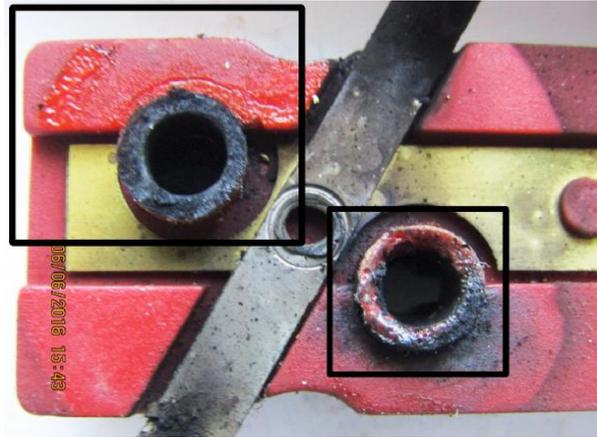


Рис. 2. Оплавление и наплывы на корпусе штепсельных гнезд электроколодки



Рис. 3. Слой копоти на поверхности штепсельной электроколодки

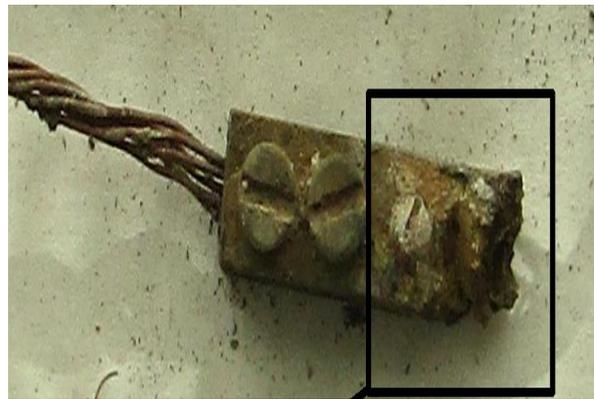


Рис. 4. Оплавление поверхности винтового контактного соединения



Рис. 5. Наплыв меди на поверхности винта винтового контактного соединения



Рис. 6. Потемнение и оплавление на поверхности фрагментов штепсельной электровилки

При исследовании контактного соединения «в скрутку» медного и алюминиевого проводников установлено несоблюдение технологии соединения проводников, что привело к образованию гальванической пары (материалы проводников обладают различными коэффициентами теплового расширения). В результате алюминий начинает течь, уменьшается площадь сечения провода, увеличивается теплообмен между проводниками и они сплавляются (рис. 7).



Рис. 7. Сплавление медного и алюминиевого проводников в винтовом контактном соединении

Выводы

1. Для предварительной оценки аварийных режимов работы электроустановок исследованы и систематизированы признаки, характерные для больших переходных сопротивлений в контактных соединениях при визуальном осмотре.

2. Окончательный вывод о наличии признаков большого переходного сопротивления в контактных соединениях устанавливается по результатам морфологического анализа при помощи оптической микроскопии.

Список литературы / References

1. Лебедев, К.Б. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений: методические рекомендации / К.Б. Лебедев, А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко. – СПб.: ВНИИПО, 2008. – 27 с.

Lebedev, K.B., Mokryak, A.Yu., Cheshko, I.D. *Ekspertnoye issledovaniye posle pozhara kontaktnykh uzlov elektrooborudovaniya v tselyakh vyyavleniya priznakov bol'shikh perekhodnykh soprotivleniy: metodicheskiye rekomendatsii* [The expert investigation after a fire of contact joints of the electrical equipment with the purpose of revealing the signs of large transient resistances: guideline]. Saint Petersburg, VNIPO Publ., 2008, 27 p.

2. Черкасов, В.Н. Пожарная безопасность электроустановок / В.Н. Черкасов, Н.П. Косторев – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. – 377 с.

Cherkasov, V.N., Kostorev, N.P. *Pozharnaya bezopasnost' elektroustanovok* [Fire safety of electrical installations]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2002, 377 p.

3. Косенко, Д.В. Методика анализа аварийных режимов работы контактных соединений электросети автотранспортных средств: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. – СПб., 2015. – 142 с.

Kosenko, D.V. *Metodika analiza avariynykh rezhimov raboty kontaknykh soyedineniy elektroseti avtotransportnykh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.26.03* [Methods of analysis of emergency operations of contact connections of the power supply network of vehicles: cand. tech. sci. diss.: 05.26.03]. Saint Petersburg, 2015, 142 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 25.01.2017

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

Yevgeny Olegovich Zinchenko, research assistant; e-mail: evgeniy.zintchenko@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) 322-78-80

SIGNS OF LARGE TRANSIENT RESISTANCES IN CONTACT CONNECTIONS

Purpose. Ascertainment of the emergency operation on washings of the surfaces of the contact connections withdrawn from the fire place.

Methods. Investigations of the contact connections with the traces of washings.

Results. Ascertainment of the cause of washings of the contact connections withdrawn from the fire place.

Scientific novelty. The characteristic signs of the emergency operation, i.e. the large transient resistance in the contact connections of the electrical installations by the visual examination, are presented.

Practical value. The results of the investigations permit to determine the belonging of the emergency operations of the electrical installations to origin of the fire.

Keywords: *emergency operations; large transient resistance; contact connection; instrumental investigations; fire.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 614.841.22:001.891.57

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Кристина Валериевна Глушенко, мл. науч. сотр.; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru;

Виктория Викторовна Волюнец, техник; 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*

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЧАГОВОГО САМОНАГРЕВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Совершенствование методов математического описания температурных полей при очаговом самонагревании насыпи дисперсных органических веществ.

Методика. Анализ математических моделей очагового самонагревания дисперсных веществ органического происхождения и предложения по их совершенствованию и использованию.

Результаты. Выполнен анализ существующих математических моделей описания температурных полей при самонагревании органических веществ. Для практических расчётов предложено использовать полученную в НИИГД «Респиратор» аналитическую модель с учётом критериев генерации и отвода теплоты внутри дисперсной среды вещества.

Научная новизна. В качестве источника теплоты при очаговом самонагревании предложено использовать уравнение, описывающее реакцию окисления дисперсного вещества кислородом, которое также учитывает отвод теплоты за счёт теплоотдачи. Показано, что при образовании теплового напора внутри самонагревающегося дисперсного вещества неучёт конвективно-диффузионной теплопередачи может существенно повлиять на распределение температуры в скоплении.

Практическая ценность. Предложенный теоретический метод определения температурного поля дисперсного вещества с внутренним источником теплоты может быть использован для разработки способа раннего обнаружения пожароопасной ситуации при хранении растительного сырья.

Ключевые слова: *дисперсное вещество; самонагревание; математическое моделирование; критерий Био; реакционная поверхность; теплообмен.*

Постановка проблемы. Самовозгорание мелкодисперсных органических веществ относится к одному из распространённых явлений, наблюдаемых при их хранении, переработке и транспортировании. Это явление возникает за счёт реакции гетерогенного окисления в больших объёмах продукта при относительно низких температурах окружающей среды.

Теория самовозгорания веществ для гетерогенных систем была сформулирована в работе В.С. Веселовского (1990), в которой изложены основные физические условия самовозгорания: способность вещества быстро окисляться при низких температурах, приток кислорода, затруднённая теплоотдача.

Математическое описание тепловых процессов, происходящих в насыпях растительного сырья, весьма актуально, поскольку знание распределения температуры по всему объёму насыпи с течением времени необходимо для построения оптимальных схем размещения термодатчиков с целью контроля температуры в этой насыпи. Попытка решения проблемы прогнозирования температуры в скоплении дисперсного вещества предпринята в 1990-х годах. Рассмотрены математические модели температурных полей и задача решается численно в декартовых и сферических координатах, что является существенным недостатком данного решения.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] насыпь дисперсного органического вещества, состоящая из двух фаз – твёрдых частиц и воздуха в межкусковом пространстве, – рассматривается как гетерогенная термодинамическая система. Фазы отличаются друг от друга химическим составом и физическими свойствами. На границах их раздела происходит изменение свойств макроскопического тела, в данном случае – разрыхлённой массы вещества.

В работах [2 – 13] для описания динамики температуры в скоплении дисперсного органического вещества предложены математические модели температурного поля в декартовых и сферических координатах с постоянным или переменным источником теплоты и представлены их численно-аналитические решения. Вследствие изотропности дисперсной среды считается, что теплофизические характеристики вещества постоянны и равны во всех направлениях. Тогда теплообмен в насыпи растительного сырья предлагается описывать дифференциальным уравнением теплопроводности, где в правой части уравнения в качестве источника теплоты принята функция f , К/с [2]:

$$f = \left[\frac{a}{\lambda} q(\bar{r}) \right], \quad (1)$$

где a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·К);

$q(\bar{r})$ – удельная мощность источника тепловыделения, Вт/м³.

В то же время автором [4] функцию источника тепловыделения предложено определять по эмпирической зависимости $q(x)$, Вт/м³,

$$q(x) = \frac{Ab^2}{b^2 + x^2}, \quad (2)$$

где $b = 0,3$ м; $A = 200$ Вт/м³ – эмпирические коэффициенты;

x – геометрический параметр, характеризующий локализацию пластового очага самонагрева, м.

Анализ расчётов показал [4], что предложенная зависимость (2) для определения удельной мощности источника тепловыделения ведёт к незначительному изменению значений температуры в центре скопления по сравнению с формулами, предложенными другими авторами [2, 3], т. е. при построении моделей допустимо применение различных законов распределения теплоты. В случае применения при расчётах биологического источника тепловыделения при различных энергиях активации получаем численные результаты, сложные в интерпретировании [2 – 4].

Приняв теплофизические характеристики вещества скопления постоянными, исследователи [5 – 7] описывают прирост температуры $T = T(r, t)$ по радиальной координате r и времени t дифференциальным уравнением вида

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\rho c} q(r) \omega(t), \quad (3)$$

где $\alpha = \lambda/\rho c$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

λ – коэффициент теплопроводности сырья, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

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

c – удельная теплоёмкость вещества, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$\omega(t)$ – функция Хевисайда;

$q(r)$ – плотность источников теплоты, убывающая с ростом r , $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Решение уравнения (3) получено в виде простых аналитических зависимостей для вычисления прироста температуры T_{Π} , К:

$$T_{\Pi} = \frac{q_0 R^3}{2\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + 4at_{\Pi}}} \right), \quad (4)$$

и времени достижения скоплением вещества критической температуры t_{Π} , с:

$$t_{\Pi} = \frac{R^2}{4a} \left[\left(1 - \frac{2\lambda T_{\Pi}}{q_0 R^2} \right)^{-2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Недостаток зависимостей – использование источника тепловыделения постоянным и равным $q_0 = 100 \text{ Вт}/\text{м}^3$, который по мере развития процесса окисления вещества меняется в зависимости от параметров адсорбента и температуры.

При решении задачи очагового самонагрева вещества авторами [11, 12] рассмотрено стандартное уравнение теплопроводности с источниками выделения теплоты в виде экспоненциальной зависимости

$$l^{\theta} = \exp \left[\frac{E}{RT_{\text{H}}^2} (T_0 - T_{\text{H}}) \right], \quad (6)$$

где T_{H} – начальная температура очага, К;

T_0 – температура окружающей среды, К.

При замене экспоненты на полином второй степени

$$\theta = A + b\xi + c\xi^2 \quad (7)$$

получено решение уравнения (6) в интегральном виде.

После детального обзора публикаций сделан вывод, что результаты цитированных работ сложны для практического применения. Поэтому предпринята попытка получить упрощённое аналитическое решение задачи самонагрева дисперсного вещества.

Выделение не решённых ранее частей общей проблемы. Рядом исследователей предложены различные модели теплового самовозгорания органических веществ и получены аналитические решения задачи, дающие значительные расхождения в результатах расчётов, что послужило причиной для их сравнительного анализа и постановки задачи исследования.

Цель исследования – совершенствование методов математического описания температурных полей при очаговом самонагревании насыпи дисперсных органических веществ.

Материалы и результаты исследований. В работе [12] сформулирована задача очагового самовозгорания органического вещества и получено её аналитическое решение исходя из совместного рассмотрения уравнений адсорбции кислорода и теплопроводности:

$$\frac{T(\text{Fo})}{T_0} = 1 + \frac{1 - \left[\exp \Gamma_{\text{T}} \text{Fo} \right]^{-\Gamma_{\text{V}}}}{\Gamma_{\text{V}}}; \quad (8)$$

$$\Gamma_{\text{V}} = \frac{\mu_1^2}{\Gamma_{\text{T}}} - 1; \quad (9)$$

$$\text{tg} \mu = - \frac{1}{\text{Bi} - 1} \mu; \quad (10)$$

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R_1, \quad (11)$$

где Γ_v – показатель скорости нагревания скопления вещества;

μ_1 – первый корень уравнения (10);

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

λ – коэффициент теплопроводности сырья, Вт/(м·К);

R_1 – радиус, м.

Выражение для $\Gamma_T Fo$ может быть записано в виде

$$\Gamma_T Fo = \frac{\xi k_1 a_1 q_1}{\rho c_v T} \frac{R_1^2}{a_T} \frac{a_T}{R_1^2} t, \quad (12)$$

где ξ – доля реакционной поверхности, вступающей в реакции окисления;

k_1 – константа скорости химической реакции, с⁻¹;

a_1 – концентрация кислорода, моль/м³;

q_1 – теплота реакции окисления, Дж/моль;

ρ – плотность сорбента, кг/м³;

c_v – удельная теплоемкость сорбента, Дж/(кг·К);

a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Решение уравнения (8) относительно времени t имеет вид

$$t = - \frac{\ln \left[- \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 - \frac{1}{\Gamma_v} \right) \Gamma_v \right]}{\Gamma_v} \frac{1}{A}, \quad (13)$$

где $T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания вещества, К.

Сравнивая выражения (8) – (11), можно заключить, что динамика относительных температур сорбента $T(Fo)/T_0$ при его нагревании имеет сложную зависимость параметров Γ_T от Bi (μ), так как Γ_T одновременно входит в экспоненту и в выражение для Γ_v . Для одной и той же температуры может быть сколько угодно значений соотношений Γ_T и Bi . Например, для относительных температур $T/T_0 = 1,082$ и $1,113$ (при $T_0 = 300$ К и $T = 317$ и 326 К) эта связь имеет вид кривых 1 и 2 (рис. 1).

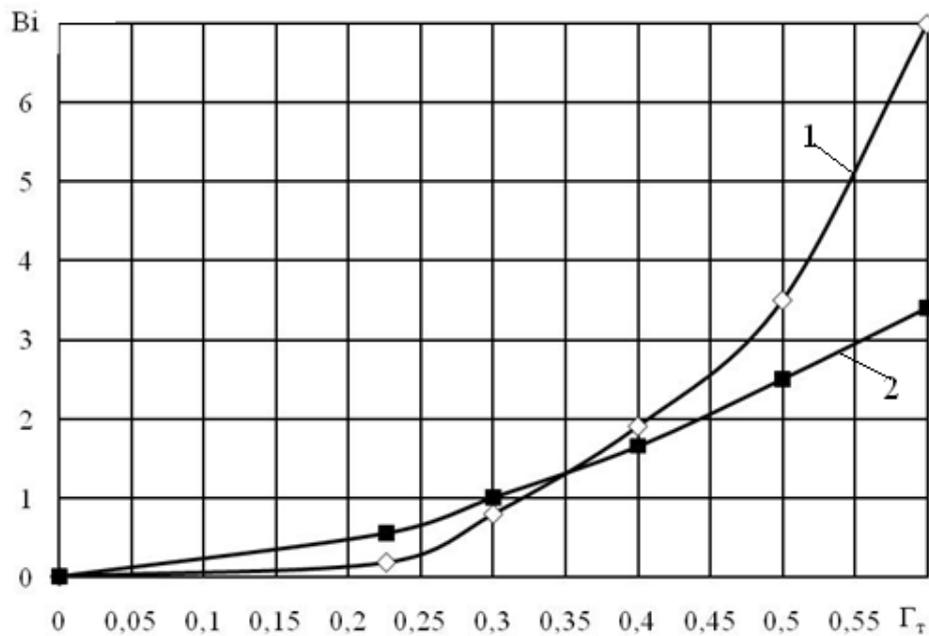


Рис. 1. Зависимость критерия Bi от комплексного критерия генерации теплоты Γ_T при разных температурах: кривая 1 – $T = 317$ К; кривая 2 – $T = 326$ К

В связи с этим для расчёта динамики температур конкретного самовозгорающегося вещества необходимо заранее экспериментально (либо расчётом) определить коэффициент теплообмена при его нагревании в скоплении и рассчитать параметр Γ_T на основании свойств вещества. В случае же расчёта времени наступления заданного порога температуры (например, критической) возможно его рассчитать, пользуясь формулой (13).

Для анализа влияния параметра теплоотдачи Bi на динамику температур самонагревающегося вещества выполним моделирование процесса при различных значениях произведения $\Gamma_T Fo$ и Bi . Результаты расчётов безразмерных температур T/T_0 представлены в виде графиков на рис. 2.

Анализ данных показывает значительное влияние параметра теплоотдачи Bi на рост температур со временем. При этом с ростом параметра Γ_T (сравним рис. 2,а и 2,в) влияние теплоотдачи снижается.

Подводя итог анализу литературных источников с описанием исследований динамики температур при очаговом самонагревании дисперсных веществ в насыпи, приведём таблицу используемых различными авторами математических зависимостей и полученных значений времени достижения одним и тем же веществом температуры, равной 100 °С.

Расчетные формулы динамики температуры и времени достижения заданной температуры при очаговом нагревании дисперсных органических материалов¹⁾

Автор	Расчетная зависимость вычисления динамики температур	Расчетные зависимости порогового времени (индукции)	$t_{п _{T=100^{\circ}\text{C}}}$, сут
1	2	3	4
Ольшанский В.П. [6]	$\Delta T = \frac{q_0 R^3}{2\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + 4at}} \right)$	$t_{п} = \frac{R_1^2}{4a} \left[\left(1 - \frac{2\lambda\Delta T_n}{q_0 R_1^2} \right)^{-2} - 1 \right], \text{ с}$	14
Соколов Д.Н., Вогман Л.П., Зуйков В.А. [13], Горшков В.И. ²⁾	-	$\tau = \frac{\bar{\tau}_c R T_0^2}{Q k_0 E} \exp \left[\frac{E}{RT_0} \right], \text{ с}$	1140
Корольченко А.Я. [8]	<p>Численно-аналитическое решение уравнения теплопроводности и скорости химической реакции</p> $c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \rho \frac{dq}{dt} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{n}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right);$ $\frac{dq}{dt} = K_0^m C_0^m Q \left(1 - \frac{q}{Q} \right)^v e^{-E/RT}$	-	-

Окончание

Автор	Расчетная зависимость вычисления динамики температур	Расчетные зависимости порогового времени (индукции)	$t_{п _{T=100\text{ }^{\circ}\text{C}}}$, сут
1	2	3	4
Абрамов Ю.А. ³⁾ , Кирочкин А.Ю. [4]	$\theta(\tau, \tau) = \varphi(t_0, \tau) + \frac{2R}{\pi^2 \lambda r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n r}{R}}{n^2} \left[1 - \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 a t_0}{R^2} \tau \right) \right] \times$ $\int_0^R y q(y) \sin \frac{\pi n r}{R} dy + \frac{2R t_0}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin \frac{\pi n r}{R}}{n} \times$ $\exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 a t_0}{R^2} \tau \right) \int_0^{\tau} \varphi'(t_0, \xi) \exp \left(\frac{\pi^2 n^2 a t_0}{R^2} \xi \right) d\xi$	-	25
Пашковский П.С. ⁴⁾ , Греков С.П., Орликова В.П., Всякий А.А.	$\frac{T(r_1 Fo)}{T_0} = 1 + \frac{1 - \left[\exp \Gamma_{\tau} Fo \right]^{-\Gamma_v} \sin \left(\mu_1 \frac{r}{R} \right)}{\Gamma_v} \frac{r}{\mu_1 R};$ $\Gamma_v = \frac{\mu_1^2}{\Gamma_{\tau}} - 1, \Gamma_{\tau} = \frac{\xi k_1 c_{o_2} q R_1^2}{\rho c_v T a_{\tau}}$	$t_{п} = \frac{\left[\ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 - \frac{1}{\Gamma_v} \right) \right] \Gamma_v}{\frac{\rho c_v T_0}{\xi k_{ко} c_{o_2} q}} \times$	21

Примечания: ¹⁾ Расчёты в графе 4 выполнены для $R = 1$ м; $q_v = Q = q = 100$ Вт/м², дисперсное вещество – травяная мука.

²⁾ Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО. 2003. – 446 с.

³⁾ Прочерк в графе 3 означает, что температура не достигает 100 °С.

⁴⁾ Универсальный комплексный показатель эндогенной пожароопасности органических материалов / С.П. Греков, П.С. Пашковский, А.А. Всякий, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2016. – № 4 (55). – С. 24 – 36.

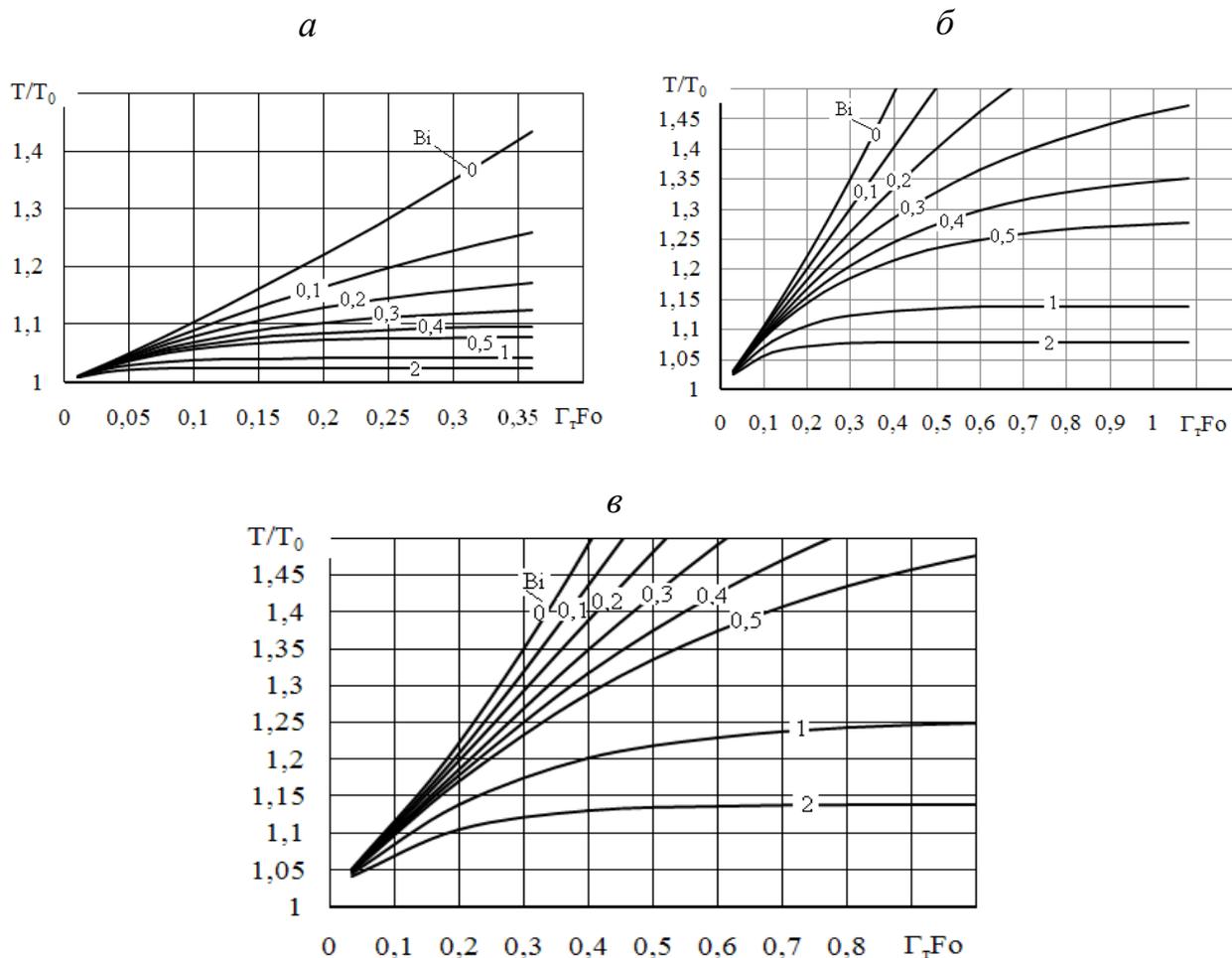


Рис. 2. Зависимость относительной температуры самонагрева органического материала от безразмерного параметра $\Gamma_T Fo$ при различных теплоотводе Bi и значениях Γ_T :
 $a - \Gamma_T = 0,1$; $б - \Gamma_T = 0,3$; $в - \Gamma_T = 0,5$

Результаты вычислений показывают, что данные Ю.А. Абрамова [4] и НИИГД «Респиратор» [12] близки (25 суток и 21). Данные В.П. Ольшанского [8] занижены, поскольку аналитическая зависимость не учитывает изменения тепловыделения вещества во время окисления. Данные Д.Н. Соколова [13] и А.Я. Корольченко [9] слишком завышены, возможно, из-за неучёта конвективной диффузии, возникающей в результате появления подъёмных сил при самонагревании вещества.

Выводы

1. Проанализированы математические модели описания температурных полей при очаговом самонагревании дисперсного вещества, предложенные российскими и украинскими исследователями. Показано, что для решения задачи используют уравнение теплопроводности в декартовых или сферических координатах с постоянным или переменным источником теплоты и получают его численное или аналитическое решение.

2. Обнаружено, что ни одна из проанализированных математических моделей температурного поля не учитывает напорной температурной фильтрации газа в межкусковом пространстве при самонагревании дисперсного вещества, которая влияет на теплопередачу на порядок выше, чем теплопроводность.

3. Расчёт времени достижения пожароопасной температуры ($T_n = 100$ °С) дисперсным веществом (на примере травяной муки) по предложенным зависимостям показал существенные различия в получаемых значениях. Причиной тому могут быть, во-первых, различные граничные условия, во-вторых, игнорирование внутренней теплопередачи от более нагретых частей дисперсного вещества к менее нагретым.

4. Для теоретического исследования температурного поля в скоплении самонагревающегося вещества рекомендуется учитывать коэффициент внутренней теплоотдачи (как совместное действие теплопроводности и концентрированной диффузии), который находят лабораторным путём для каждого исследуемого дисперсного вещества.

Список литературы / References

1. Торро, В.О. Исследование закономерностей протекания аэротермодинамических процессов при самовозгорании угольного скопления / В.О. Торро, А.В. Релизов, Г.Н. Рут // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 37 – 43.

Torro, V.O., Relizov, A.V., Rout, G.N. *Issledovaniye zakonmernostey protekaniya aerotermodynamicheskikh protsessov pri samovozgoranii ugol'nogo skopleniya* [Investigation of conformities of behavior of aerothermodynamic processes by spontaneous ignition of a coal accumulation]. *Vestnik Kuzbasskogo gos. tekhn. un-ta* [Bulletin of the Kuzbas state technical university]. 2016, no. 3, pp. 37 – 43.

2. Абрамов, Ю.А. Математическая модель теплового поля зерновой насыпи / Ю.А. Абрамов, А.Ю. Кирочкин, Д.Н. Откидач // Пожарная безопасность. – 1999. – № 2. – С. 25 – 29.

Abramov, Yu.A., Kirochkin, A.Yu., Otkidach, D.N. *Matematicheskaya model' teplovogo polya zernovoy nasypi* [A mathematical model of the heat field of a grain embankment]. *Pozharnaya bezopasnost'* – Fire safety, 1999, no. 2, pp. 25 – 29.

3. Абрамов, Ю.А. Распределение температуры в пластовом органическом веществе / Ю.А. Абрамов, А.Ю. Кирочкин, Д.Н. Откидач // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков: ХИПБ, 1999. – Вып. 5 – С. 7 – 10.

Abramov, Yu.A., Kirochkin, A.Yu., Otkidach, D.N. *Raspredeleniye temperatury v plastovom organicheskom veshchestve* [Temperature distribution in a layer organic substance]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [Problems of fire safety: collected scientific papers]. Kharkov, KhIPB, 1999, issue 5, pp. 7 – 10.

4. Абрамов, Ю.А. Математические модели тепловых полей насыпи растительного сырья с учетом температуры окружающей среды / Ю.А. Абрамов, А.Ю. Кирочкин // Пожарная безопасность. – 2000. – № 3. – С. 21 – 27.

Abramov, Yu.A., Kirochkin, A.Yu. *Matematicheskiye modeli teplovykh poley nasypi rastitel'nogo syr'ya s uchetom temperatury okruzhayushchey sredy* [Mathematical models of the heat fields of an embankment of the vegetable raw material with due regard for the environmental temperature]. *Pozharnaya bezopasnost'* – *Fire safety*, 2000, no. 3, pp. 21 – 27.

5. Системы автоматизированного контроля температур в силосах элеваторов / В. Гусев, Ю. Мазалов, С. Мирошин, Р. Огнев // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 24 – 27.

Gusev, V., Mazalov, Yu., Miroshin, S., Ognev, R. *Sistemy avtomatizirovannogo kontrolya temperatur v silosakh elevatorov* [Automated control systems of temperatures in silos of grain elevators]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii – Up-to-date technologies of automation*, 2008, no. 1, pp. 24 – 27.

6. Ольшанский, В.П. Температурное поле гнездового самонагрева насыпи в силосе / В.П. Ольшанский // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 134 – 139.

Ol'shanskiy, V.P. *Temperaturnoye pole gnezdovogo samonagrevaniya nasypi v silose* [The temperature field of the nest spontaneous heating of the embankment in a silo]. *Fizika goreniya i vzryva – Physics of combustion and explosion*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 134 – 139.

7. Ольшанский, В.П. К расчету температуры самонагрева сырья гнездовым сферическим очагом / В.П. Ольшанский, В.К. Тригуб // Вестн. Харьковского государственного политехнического ун-та: сб. науч. тр. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 118. – С. 43 – 45.

Ol'shanskiy, V.P., Trigub, V.K. *K raschyetu temperatury samonagrevaniya syr'ya gnezdovym sfericheskim ochagom* [To the calculation of the temperature of spontaneous heating the raw material with the nest spherical seat]. *Vestn. Kharkovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo un-ta: sb. nauch. tr.* [Bulletin of the Kharkov state polytechnic university: collected scientific papers]. Kharkov, KhGPU, 2000, issue 118, pp. 43 – 45.

8. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.

Korol'chenko, A.Ya. *Protsessy goreniya i vzryva* [Combustion and explosion processes]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007, 266 p.

1. Горшков, В.И. Способ расчета времени индукции при очаговом самовозгорании материалов. Ч. 1 / В.И. Горшков, И.А. Корольченко // Пожарная безопасность. – 2009. – № 3. – С. 72 – 77.

Gorshkov, V.I., Korol'chenko, I.A. *Sposob raschyeta vremeni induktsii pri ochagovom samovozgoranii materialov. Ch. 1* [Method of calculation of the

induction time by the seat spontaneous ignition of materials. Part 1]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2009, no. 3, pp. 72 – 77.

2. Горшков, В.И. Способ расчета времени индукции при очаговом самонагревании материалов. Ч. 2 / В.И. Горшков, И.А. Корольченко // *Пожарная безопасность*. – 2010. – № 4. – С. 59 – 63.

Gorshkov, V.I., Korol'chenko, I.A. *Sposob raschyeta vremeni induktsii pri ochagovom samonagrevanii materialov. Ch. 2* [Method of calculation of the induction time by the seat spontaneous heating of materials. Part 2]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2010, no. 4, pp. 59 – 63.

3. Пашковский, П.С. Неизотермическая кинетика хемосорбции газов микропористыми сорбентами / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // *Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр.* – Донецк: Арпи, 2012. – С. 50 – 57.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Neizotermicheskaya kinetika khemosorbtsii gazov mikroporistymi sorbentami* [Non-isothermal kinetics of chemical absorption of gases with microcellular sorbates]. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya: sb. nauch. tr.* [Topical questions of control of the spontaneous ignition of coal: collected scientific papers]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, pp. 50 – 57.

4. Агеев, В.Г. Низкотемпературная кинетика очагового окисления дисперсных органических веществ / В.Г. Агеев, С.П. Греков, К.В. Глушенко // *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*. – 2017. – № 1 (54). – С. 14 – 27.

Ageyev, V.G., Grekov, S.P., Hlushenko, K.V. *Nizkotemperaturnaya kinetika ochagovogo okisleniya dispersnykh organicheskikh veshchestv* [The low-temperature kinetics of the seat oxidation of disperse organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" – Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"*, 2017, no. 1 (54), pp. 14 – 27.

5. Соколов, Д.Н. Микробиологическое самовозгорание / Д.Н. Соколов, Л.П. Вогман, В.А. Зайков // *Пожарная безопасность*. – 2012. – №1. – С. 35 – 48.

Sokolov, D.N., Vogman, L.P., Zaykov, V.A. *Mikrobiologicheskoye samovozgoraniye* [The microbiological spontaneous ignition]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, no. 1, pp. 35 – 48.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым
Дата поступления рукописи 08.12.2017

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

Kristina Valeryevna Hlushenko, research assistant; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru;

Viktoriya Viktorovna Volynets, technician; 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

MATHEMATICAL MODELS OF THE SEAT SPONTANEOUS HEATING OF DISPERSE SUBSTANCES

Purpose. Improvement of methods of mathematical description of the temperature fields by the seat spontaneous heating of an embankment of disperse organic substances.

Methods. Analysis of the mathematical models of the seat spontaneous heating of the disperse substances of organic origin and offers concerning their improvement and use.

Results. The analysis of the existing mathematical models of description of the temperature fields by the spontaneous heating of the organic substances was fulfilled. It was proposed to use the analytical model worked out in the NIIGD “Respirator” for practical calculations taking into account the generation and heat elimination criteria inside of the disperse medium of the substance.

Scientific novelty. It is proposed to use an equation describing the oxidation reaction of the disperse substance with oxygen as a heat source by the seat spontaneous heating; this equation takes into account the heat elimination at the expense of the heat emission, too. It is shown that not taking into account the convective-diffusive heat transfer may have an essential effect on the temperature distribution in the accumulation by formation of the heat pressure inside of the self-heating disperse substance.

Practical value. The theoretical method of determination of the temperature field of the disperse substance with the internal heat source proposed may be used to work out the method of early detection of the fire-hazardous situation when storage of the vegetable raw material.

Key words: *disperse substance; spontaneous heating; mathematical modeling; Bio criterion; reactionary surface; heat exchange.*

УДК 621.311.22:504.5

Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com;

Сергей Александрович Князев, магистр; e-mail: droi.2013@yandex.ua

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. (+38 0623) 22-74-71

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Цель. Обоснование факторов, влияющих на экологические параметры процесса генерации электрической энергии на тепловых электростанциях, и оценка возможности выбора альтернативных методов снижения эмиссии диоксида серы.

Методика. Аналитические исследования процессов предотвращения эмиссии загрязнителей за счет очистки дымовых газов от продуктов сгорания топлива.

Результаты. Рассмотрено влияние основных факторов на эффективность процесса очистки газов с использованием мокрой известняковой технологии. Обосновано использование альтернативной технологии предотвращения эмиссии диоксида серы за счет магнитной сепарации серосодержащих примесей.

Научная новизна. Получены новые аналитические зависимости влияния плотности орошения, pH поглотительной суспензии и концентрации присадок на степень улавливания диоксида серы.

Практическая значимость. В условиях отсутствия или дефицита инвестиций в природоохранную деятельность обоснование выбора и совершенствования технологий предотвращения эмиссии диоксида серы имеет важное значение.

Ключевые слова: эмиссия диоксида серы; очистка газов; плотность орошения; поглотительная суспензия, магнитная сепарация; pH; улавливание пыли.

Постановка проблемы. Выработка электрической энергии на современных ТЭС осуществляется в основном на энергетических блоках 200 и 300 МВт. При сжигании в котле энергоблока 200 МВт 136 т/ч твердого топлива в окружающую среду поступают 0,93 млн м³/ч влажных дымовых газов. Концентрация загрязнителей в дымовых газах следующая: зола 50 г/м³; NO_x 579 мг/м³; SO₂ 2343 мг/м³; CO₂ 221 г/м³ и пары воды 55,4 г/м³. Расход указанных загрязнителей: зола 14 кг/с; NO_x 150 г/с; SO₂ 610 г/с; CO₂ 57,2 кг/с и H₂O 55,4 кг/с. Кроме этого, в систему гидрозолоудаления поступает 5,59 т/ч шлаков из нижней части топки котла.

Анализ последних исследований. Наиболее распространенными методами очистки газов от диоксида серы являются мокрые и полусухие методы очистки с использованием в качестве поглотителей, соответственно, суспензий известняка и извести и сухие (аддитивные) методы с использованием подачи в зону пережима аэросмеси измельченного известняка. Аддитивная технология в большей степени применена на отечественных ТЭС вследствие ограниченности возможностей инвестиций в природоохранную деятельность. Мокрую известняковую технологию используют на большинстве (до 80 %)

зарубежных ТЭС, а полусухая технология нашла широкое применение на ТЭС Европейского Союза, особенно в скандинавских странах. Выбор технологии осуществляется в зависимости от доли соединений серы в топливе, стоимости известняка и извести, требований к степени очистки [1].

Массовая доля серы в топливе, а также доля сгораемых компонентов оказывают основное влияние на концентрацию диоксида серы в дымовых газах. Повышение концентрации диоксида серы, с одной стороны, увеличивает скорость химической реакции в установках очистки газов от диоксида серы, а с другой стороны – это увеличивает общую массу удаляемых соединений. Действие последнего фактора превалирует над первым и отрицательно сказывается на эффективности процесса десульфуризации. На степень удаления соединений серы оказывает влияние значительное количество факторов. Основными являются:

- нагрузка котлоагрегата. Нагрузка влияет на общий объем дымовых газов, их скорость и количество образующегося диоксида серы;
- плотность орошения. Увеличение плотности орошения обеспечивает увеличение поверхности контакта дымовых газов с погашающей жидкостью. Большое значение имеет концентрация поглотителя в орошающей жидкости (или ее рН) и размер частичек (капель) орошающей жидкости, который зависит от конструкции распределительных устройств и давления жидкости перед форсунками;
- избыток воздуха, подаваемого в топку котлоагрегата, с одной стороны, увеличивает полноту сгорания топлива и соответственно снижает потери топлива с недожогом, уменьшает эмиссию оксида углерода, а с другой стороны – увеличивает затраты энергии на подачу воздуха и общий объем продуктов сгорания, что сказывается на эффективности удаления диоксида серы;
- теплота сгорания топлива и его состав оказывают влияние на общий объем дымовых газов, концентрацию диоксида серы в газах;
- активность поглотителя, которую определяют по рН. Например, при использовании в качестве поглотителя раствора извести с $\text{pH} \approx 12$ и суспензии известняка с $\text{pH} \approx 4$ активность поглотителя в первом случае больше в 100 миллионов раз. С учетом этого в соответствии с законом Фика создается возможность применения прямоточной технологии десульфуризации при использовании в качестве поглотителя известкового молока и соответственно уменьшении времени контакта поглотительного раствора с дымовыми газами в полусухой технологии (dry- или semi-dry-процесс). Однако при этом приходится использовать более дорогой по сравнению с известняком поглотитель – известь и получать менее востребованные продукты отхода. Кроме этого, существуют проблемы при хранении отходов вследствие их повышенной растворимости и опасности загрязнения поверхностных вод.

Учитывая изложенные обстоятельства, в мировой практике отдано предпочтение использованию мокрой технологии десульфуризации дымовых

газов с использованием в качестве поглотителя известняковой суспензии.

Цель статьи – определение факторов, влияющих на эмиссию диоксида серы при сжигании твердого топлива, и оптимальных условий ее сокращения.

Изложение основного материала исследований. Рассмотрим процесс сорбции диоксида серы в адсорбционной колонне – скруббере. Здесь принято определение процесса сорбции как адсорбция (поглощение поверхностью), учитывая малую растворимость сорбента и соответственно сорбцию не объемом, а поверхностью. Для описания процесса выделяем объем скруббера dV , который равен на участке dh

$$dV = F dh = \pi r^2 dh, \quad (1)$$

где F – площадь сечения адсорбера, m^2 ;

r – радиус адсорбера, m .

Соответственно масса диоксида серы в объеме dV :

$$G = C dV = C \pi r^2 dh, \quad (2)$$

где C – концентрация диоксида серы, mg/m^3 .

Количество диоксида серы, сорбируемого поглотителем в единицу времени dt объемом dV , равно

$$dG = C W k dt dV, \quad (3)$$

где W – удельный расход орошающей суспензии, подаваемой в скруббер;

k – коэффициент, учитывающий скорость адсорбции (соотношение прироста концентрации диоксида серы в жидкости к концентрации его в дымовых газах).

При сорбции диоксида серы поглотителем его концентрация в объеме скруббера уменьшается на dC . Соответственно:

$$dC = -dG/dV = C W k dt; \quad (4)$$

$$dC/C = -Wkd\tau. \quad (5)$$

Примем граничные условия. Концентрация диоксида серы изменяется от C_0 до C . Длительность процесса сорбции изменяется от 0 до τ . В таком случае

$$\int_{C_0}^C dC/C = -\int_0^\tau Wkd\tau. \quad (6)$$

После интегрирования получаем

$$C/C_0 = e^{-Wkd\tau}. \quad (7)$$

Время нахождения газов в скруббере или длительность процесса сорбции равна

$$\tau = H / S, \quad (8)$$

где H – высота скруббера, м;

S – скорость дымовых газов в скруббере, м/с.

Таким образом, подставляя (8) в уравнение (7), получаем

$$C / C_0 = e^{-\rho k H / S}. \quad (9)$$

Эффективность или КПД процесса удаления диоксида серы из дымовых газов выражается формулой

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} = 1 - \frac{C}{C_0}. \quad (10)$$

Так как с одной стороны $\pi r^2 H = V$, а с другой стороны $\pi r^2 S = Q$, то

$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_0} = 1 - e^{-\rho k \frac{V}{Q}}. \quad (11)$$

Из уравнений (3) и (11) получаем

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{V}{Q}\right)k}. \quad (12)$$

Преобразуя выражения (12), получаем

$$1 - \eta = e^{-\frac{V_c}{Q}k}; \quad (13)$$

$$\ln \frac{1}{1 - \eta} = \ln \frac{C_0}{C} = \frac{V_c}{Q}k = \frac{M}{\rho Q}k, \quad (14)$$

где M – массовый расход поглотительной суспензии известняка, т/с;
 V_c – объемный расход поглотительной суспензии известняка, м³/с;
 ρ – плотность поглотительной суспензии, т/м³.

На рис. 1 показана зависимость эффективности улавливания диоксида серы от плотности орошения при изменении последней от 18 до 28 л суспензии на 1 м³ газа. Зависимость получена при обработке экспериментальных данных из работы [2].

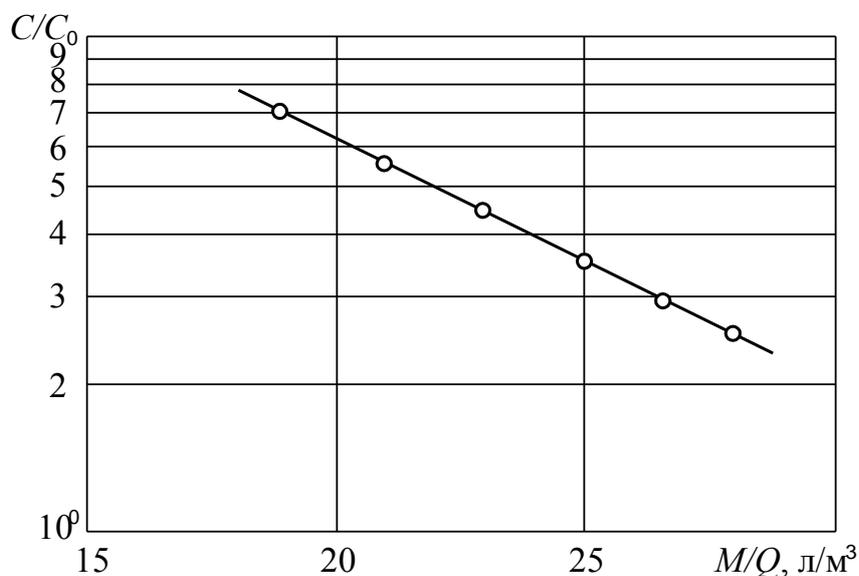


Рис. 1. Влияние соотношения расходов поглотительной суспензии и дымовых газов на степень улавливания диоксида серы

Зависимость описывается следующей формулой:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \eta - 5,62 \exp\left(-0,11 \frac{V_c}{Q}\right); R^2 = 0,99. \quad (15)$$

Предэкспоненциальный и экспоненциальный множители зависят соответственно от концентрации поглощаемого газа и концентрации или активности поглотителя.

Рассмотрим основные пути совершенствования процесса очистки дымовых газов от диоксида серы реагентными методами (рис. 2). Перед поступлением дымовых газов в скруббер, орошаемый суспензией известняка, происходит их захлаживание до температуры примерно 70 °С в регенеративном газоохладителе. Аккумулированную теплоту на чугунной насадке в последующем используют для подогревания очищенного газового потока перед поступлением в дымовую трубу.

В скруббере предусматривается установка прескруббера для очистки дымовых газов от паров соляной и фтористоводородной кислот при пониженных значениях рН (2,5...3). Сорбция указанных кислот осуществляется технической водой. Предварительная очистка от указанных кислот обеспечивает повышение эффективности очистки от диоксида серы в основном скруббере.

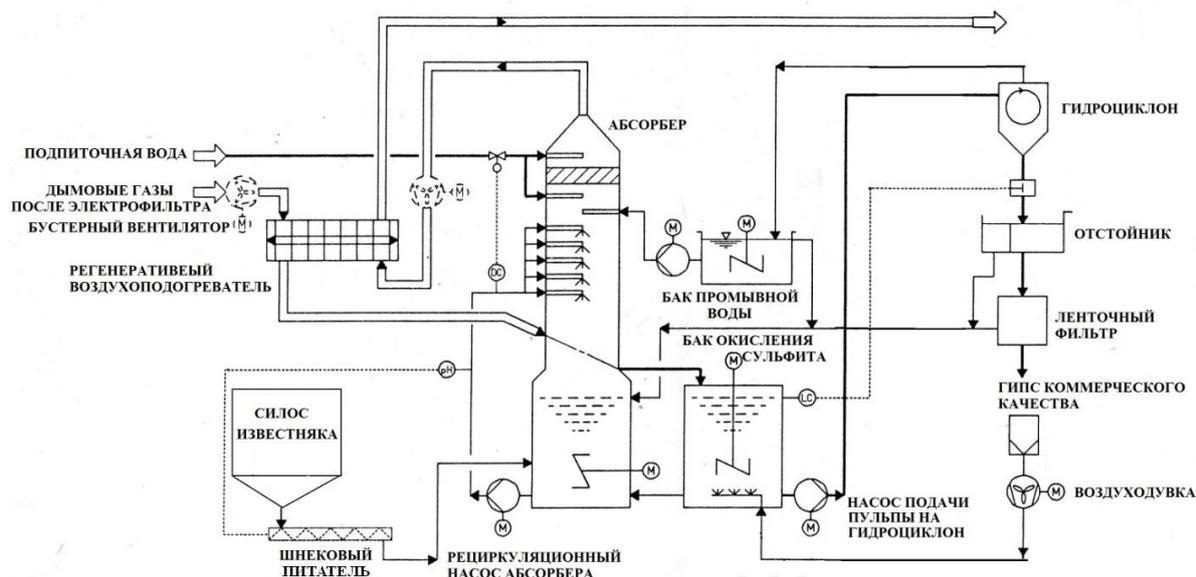


Рис. 2. Схема работы установки мокрой известняковой технологии очистки дымовых газов

Использование мокрой известняковой технологии требует значительных производственных площадей и капитальных вложений. Стоимость энергетического блока увеличивается примерно в 1,4...1,5 раза. Поэтому актуален поиск альтернативных технологий предотвращения эмиссии диоксида серы.

Для определения влияния основных параметров процесса очистки газов от диоксида серы в работе использованы данные исследований, выполненных в агентстве по охране окружающей среды США [3].

Изменение pH оросительной суспензии в пределах 5,3...5,7 относительно мало влияет на скорость окисления сульфита кальция в сульфат. В то же время увеличение плотности орошения скруббера в 2 раза приводит к увеличению скорости окисления в 2,35 раза.

Доля абсорбированного диоксида серы, который окисляется кислородом воздуха, барботирующего через слой суспензии сорбента в приемной емкости, имеет существенное значение с точки зрения эксплуатационных затрат. При доле окисленного сульфита более 15 % происходит интенсивная кристаллизация гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в контурах циркуляции поглотительных растворов. Отложения имеют тенденцию к росту, их увеличение вызывает снижение расхода абсорбента и необходимость выполнения достаточно дорогой процедуры очистки трубопроводов от гипса с соответствующим выводом оборудования из эксплуатации.

Следующим важным параметром является объем аккумулирующей емкости, который влияет на скорость последующего обезвоживания сульфата кальция и поверхность частичек. Объем аккумулирующей емкости влияет также на степень утилизации известняка (рис. 3). Увеличение объема более 18 м^3 не имеет смысла, так как степень утилизации достигает 0,89 и уже практически не изменяется.

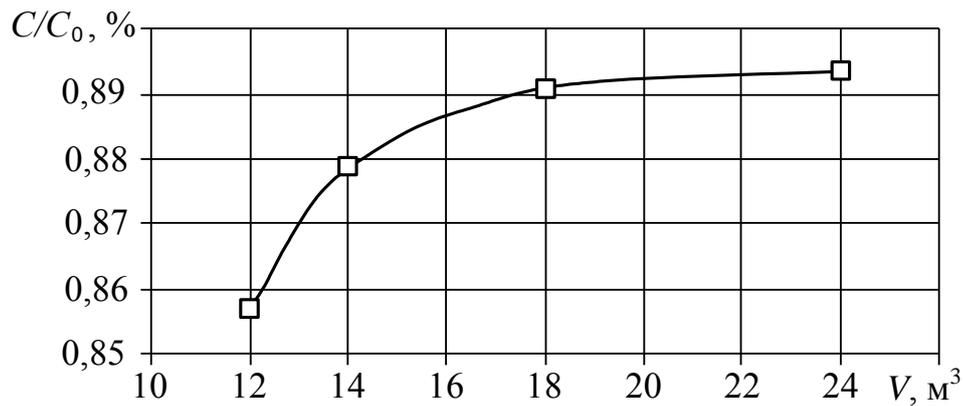


Рис. 3. Зависимость утилизации известняка от объема питающей абсорбер емкости

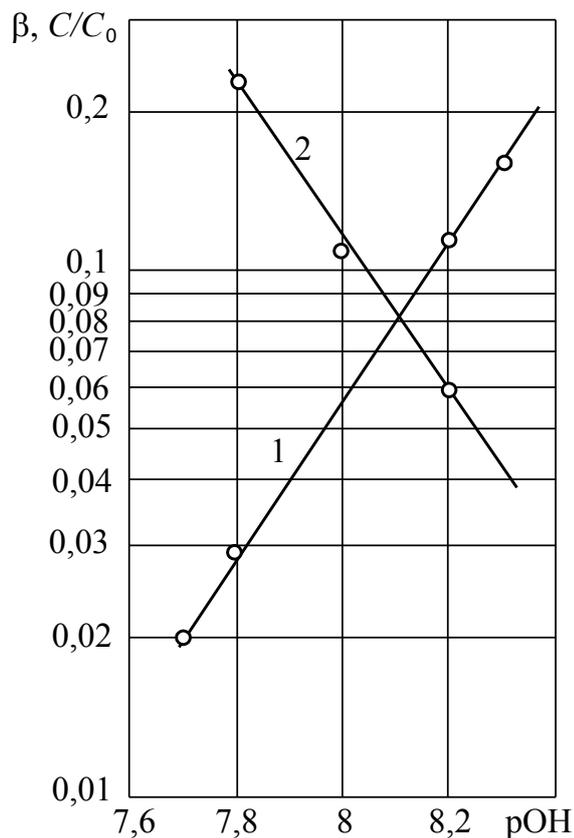


Рис. 4. Зависимость степени удаления диоксида серы и утилизации известняка от рН:
1 – степень удаления SO₂; 2 – доля непрореагировавшего известняка β

Обработка экспериментальных данных [4 – 6] показала, что степень сорбции SO₂ α зависит от рОН (рис. 4):

$$C/C_0 = 1 - \alpha = 5,40 \cdot 10^{-14} \exp(3,46 \text{ рОН}), \quad (16)$$

а доля непрореагировавшего известняка β:

$$\beta = 5,28 \cdot 10^{10} \exp(-3,354 \text{ рОН}). \quad (17)$$

Степень удаления диоксида серы значительно увеличивается за счет увеличения рН суспензии. Увеличение рН суспензии обычно достигается за счет увеличения подачи реагента. Но в этом случае степень использования реагента значительно снижается при увеличении рН. При использовании в качестве сорбента известняка уменьшение степени использования реагента может привести к существенным эксплуатационным проблемам, так как возникнет блокировка трубопроводов и риск отложения CaCO₃ и CaSO₄ в брызгоуловителях. Следующим фактором увеличения показателя рН является уменьшение размера частиц CaCO₃ в суспензии за счет более тонкого

помола известняка в мельницах. Уменьшение размера фракции обеспечивает более высокое значение рН при одинаковой степени использования сорбента.

Выводы

1. Мокрая известняковая технология является наиболее распространенным и наиболее эффективным методом очистки дымовых газов от диоксида серы, побочный продукт которой может найти широкое применение в строительстве, в сельском хозяйстве и пр.

2. Факторами, влияющими на утилизацию известняка как на основной показатель производительности мокрого метода очистки дымовых газов от SO₂, являются относительное насыщение карбоната кальция в емкости, питающей абсорбер, и входная концентрация диоксида серы. Оптимальный диапазон утилизации известняка 85...95 %.

Список литературы / References

1. Vysotskey, S. Present conditions of flue gas cleaning at thermal power station / Sergey Vysotskey, Theodor Vlassopoulos // Зб. наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ, 2008. – № 81. – С. 363 – 375.

Vysotskey S., Vlassopoulos, Th. *Sushchestvuyushchiye usloviya ochistki topchnogo gaza na teploelektrostantsii* [Present conditions of flue gas cleaning at thermal power station]. *Zb. naukovykh prats' Lugans'kogo natsional'nogo agrarnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Collection of scientific papers of the Luhans'k national agrarian university. Series "Technical sciences"]. Luhansk, 2008, no. 81, pp. 363 – 375.

2. Manyin Hu, Hezhong Tian, Bingwei Liu, Lidong Wang, Shuqin Wang. Effects of boiler operation on wet flue gas desulfurization system. American Society, Division Fuel Chemistry. 2004, no. 49 (2), pp. 931 – 933.

3. Emmel, B.B. First combined FGD and dry SO₂ control symposium. U.S. Environmental Protection Agency and Electric power research institute. Vol. 1, pp. 335 – 366.

4. Klingspor, J.S., Brown, G.N. Techniques for improving FGD system performance to achieve ultra-high SO₂ removal efficiencies. URC Corporation 9400 Amber glen Boulevard Austin, TX78729, 2016, p. 4.

5. Высоцкий, С.П. Повышение экологических показателей при сжигании твердого топлива / С.П. Высоцкий, А.С. Гавриленко, С.А. Князев // Вести автомобильно-дорожного института ДонНТУ. – 2017. – № 4 (23). – С. 60 – 70.

Vysotskiy, S.P., Gavrilenko, A.S., Knyazev, S.A. *Povysheniye ekologicheskikh pokazateley pri szhiganii tverdogo topliva* [Rise of ecological indices by combustion of the solid fuel]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta DonNTU – Bulletin of the Automobile and Highway Institute of the Donetsk National Technical University*, 2017, no. 4 (23), pp. 60 – 70.

6. Высоцкий, С.П. Влияние активности водородных ионов поглотительных растворов на процессы десульфуризации дымовых газов / С.П. Высоцкий, О.Л. Дариенко // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 3, ч. 2. – С. 173 – 176.

Vysotskiy, S.P., Dariyenko, O.L. *Vliyanie aktivnosti vodorodnykh ionov poglotitel'nykh rastvorov na protsessy desulfurizatsii dymovykh gazov* [Influence of activity of hydrogen ions on the desulphurization processes of smoke fumes]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of the Vladimir Dal' Luhansk national university]. 2017, no. 3, part 2, pp. 173 – 176.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.В. Лукьяновым.
Дата поступления рукописи 25.01.2018

*Sergey Pavlovich Vysotskiy, Dr. Sci. (Tech.), head of subdepartment; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com;
Sergey Aleksandrovich Knyazev, master; e-mail: droi.2013@yandex.ua
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”
286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone (+38 0623) 22-74-71*

INCREASE OF EFFECTIVENESS OF CLEANING THE GAS BURSTS BY COMBUSTION OF THE SOLID FUEL

Purpose. Substantiation of factors influencing on ecological parameters of the process of generation of the electric energy at thermal stations, and appraisal of possibility of the choice of the alternative methods of lowering the sulfur dioxide emission.

Methods. Analytical investigations of the processes of prevention of pollutants emission at the expense of cleaning the smoke fumes from fuel combustion products.

Results. The influence of the principal factors on the effectiveness of the process of cleaning the gases with the use of the wet limestone technology was considered. The use of the alternative technology of prevention of the sulfur dioxide emission at the expense of the magnetic separation of sulfur-containing impurities was substantiated.

Scientific novelty. The new analytic dependences of influence of water concentration, pH-number of the absorption suspension and concentration of additives on the catching degree of sulfur dioxide were obtained.

Practical value. The substantiation of choice and improvement of the technologies of prevention of the sulfur dioxide emission is of great importance under conditions of lack or deficit of capital expenditures into the environmental activity.

Key words: *sulfur dioxide emission; cleaning the gases; water concentration; absorption suspension; magnetic separation; pH-number; dust suppression.*

УДК 331.344.2-037:622-051

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;

Сергей Леонидович Тарасенко, завотделом; e-mail: tarasenko74@mail.ru

Государственное учреждение «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности»

286132, Макеевка, ул. Лихачева, 60. Тел. (+38 0623) 22-22-18

ЗОНАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ШАХТЕРОВ СПЕЦОДЕЖДОЙ

Цель. Исследование механизма преобразования параметров опасных и вредных производственных факторов в требования к защитным свойствам спецодежды в условиях интенсивных зональных механических нагрузок на основе принципа зональной защиты.

Методика. При решении поставленных задач использованы современные методы научных исследований: анализ, обобщение и систематизация степени защиты горнорабочих спецодеждой на основе таксономии анатомо-топографических зон их тела; исследования защитных и эксплуатационных характеристик спецодежды шахтеров с использованием современных технических средств измерений; моделирование зависимостей между показателями, характеризующими свойства спецодежды, и условиями труда с применением статистического анализа.

Результаты. Обоснованы требования к необходимому набору защитных свойств, предъявляемых к тканям для спецодежды шахтеров, которые снижают действие механического фактора с учетом характера и топографии его воздействия на анатомо-функциональные особенности организма, что позволяет провести сравнительную комплексную оценку спецодежды из нескольких тканей и оценить надежность защиты каждой из них определенной зоны, рассматривая защиту всего тела шахтера как сумму защиты различных зон.

Научная новизна. Дана дифференциальная оценка каждому свойству ткани, позволяющая укрупнять полученные экспериментальным путем показатели; разработана иерархия защитных свойств спецодежды шахтеров в зависимости от характера воздействия опасных и вредных производственных факторов.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят увеличить сроки эксплуатации спецодежды за счет реализации зонной защиты тела человека от комплекса воздействующих факторов, сводящейся к подбору материалов и конструкций с набором необходимых физико-механических параметров.

Ключевые слова: *номенклатура факторов шахтной среды; показатели защитных свойств материалов и конструкций; ткань; таксономия; степень износа; зонная защита.*

Постановка задачи. Различные условия эксплуатации спецодежды приводят к неодинаковой степени ее износа, что существенно влияет на риск микротравмирования кожных покровов шахтеров и возникновение гнойничковых заболеваний. Наиболее интенсивно спецодежда изнашивается при работах на маломощных пластах, менее интенсивно – на пластах большой мощности, что свидетельствует о зонном характере износа. Степенью износа спецодежды по результатам эксплуатации определяют сроки ее носки, поскольку меняются эксплуатационные, гигиенические и эргономические

свойства ткани [1]. Поэтому исследование изменения защитных, гигиенических и эксплуатационных характеристик спецодежды шахтеров под воздействием интенсивных зональных механических нагрузок – важная научная задача.

Анализ последних исследований. Анализ хронометражных данных, приведенных в работе [2], показывает, что на степень защиты кожных покровов шахтеров спецодеждой влияет интенсивность их работы и рабочие позы. Наиболее высокий процент применения ручного труда установлен в очистных забоях, где выемка угля осуществляется отбойными молотками и при ремонтно-подготовительных работах, что значительно увеличивает износ спецодежды [3]. В связи с этим важное место в системе управления условиями труда необходимо отводить спецодежде, эффективность которой в значительной степени зависит от того, насколько ее защитные и эксплуатационные свойства снижают или устраняют воздействие неблагоприятных факторов горного производства на рабочем месте.

Цель исследования – изучение механизма преобразования параметров опасных и вредных производственных факторов в требования к защитным свойствам спецодежды в условиях интенсивных зональных механических нагрузок.

Результаты исследования. Снижение риска воздействия опасных и вредных производственных факторов на здоровье шахтера решалось путем применения спецодежды шахтеров:

$$R_{\text{спецодежды}} = f(\bar{n}_i). \quad (1)$$

В связи с этим каждый определяемый показатель опасных и вредных производственных факторов преобразовывался в требование к конкретному защитному свойству (табл. 1).

Таблица 1

Номенклатура факторов шахтной среды, воздействие которых регулируется спецодеждой шахтеров

Фактор	Характер воздействия	Показатели защитных свойств материалов и конструкций
Удар	Механическая энергия	Механическая прочность, Н Амортизация материала и конструкции, %
Трение	Сила трения	Стойкость к истиранию, цикл
Прокол	Прокалывание	Стойкость к проколу, Н/см
Пыль	Концентрация пыли в воздухе	Пылепроницаемость, г/см ² Пылеемкость, г/см ²
Температура понижения	Усиленная теплоотдача	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Температура повышения	Задержка теплоотдачи	Воздухопроницаемость, л/(м ² ·с)
Влажность	Влагопоглощение	Влагоотдача, %

Окончание табл. 1

Фактор	Характер воздействия	Показатели защитных свойств материалов и конструкций
Скорость движения воздуха при пониженной или повышенной температуре	Скорость охлаждения пододежного пространства по кататермометру	Воздухопроницаемость, л/(м ² ·с)
Местная вибрация	Колебательная скорость	Вибропоглощение, %
Статическое электричество	Напряженность электростатического поля	Поверхностное электросопротивление, Ом
Вода, агрессивные жидкости (водомасляные эмульсии, диэлектрические жидкости и др.)	Намокаемость	Водоупорность, МПа
Масла	Засаливание ткани и кожных покровов	Маслостойкость, балл
Патогенные организмы	Концентрация микроорганизмов	Микробная проницаемость

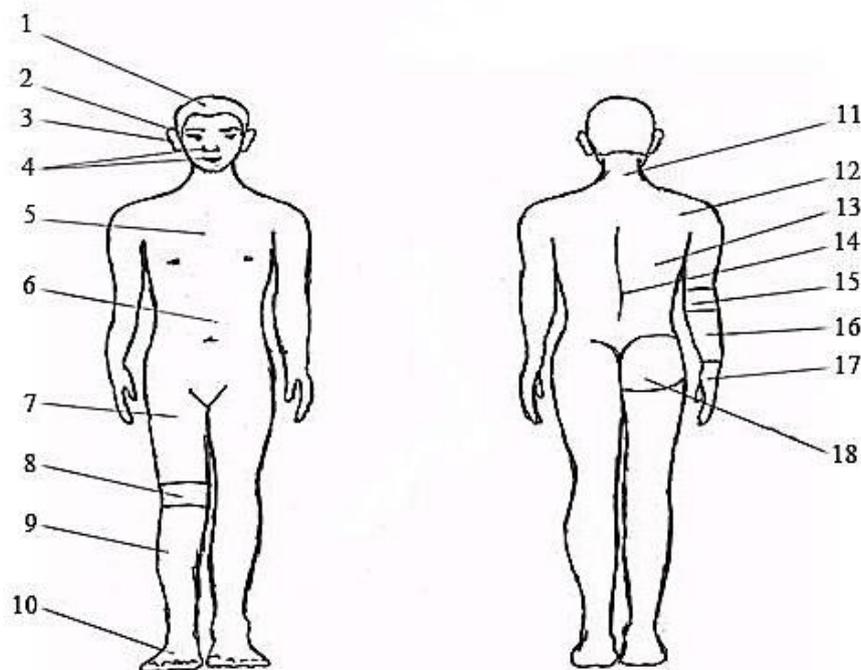
Для оценки способа защиты определяли механизм воздействия опасных и вредных производственных факторов на шахтера (локальный, смешанный или общий) (табл. 2).

Таблица 2

Иерархия защитных свойств спецодежды шахтеров

Уровень	Вид защиты					
4	Комплексная защита					
3	Защита от воздействия на анатомо-топографические зоны			Защита от локальных, общих и смешанных механизмов воздействия		
2	Защита от механических факторов	Защита от агрессивных и неагрессивных сред	Электрозащита	Защита от воздействий микроклимата	Защита от пыли (пылепроницаемость)	Защита от биологических факторов
1	Амортизация	Водоупорность	Статическое электричество	Теплопроводность	Пылеемкость	Микробная обсемененность
	Стойкость к раздиру	Водопроницаемость		Воздухопроницаемость		
	Стойкость к истиранию			Маслостойкость	Влагопроницаемость	Пылепроницаемость
	Стойкость к разрыву	Влагоемкость				
	Стойкость к проколу					

В основу принципа локальной защиты положен учет специфики воздействия различных опасных и вредных производственных факторов на отдельные участки тела шахтера с учетом пространственной ориентации во время работы. По данным литературы выделяют 18 зон [4] (см. рисунок).



Разбиение поверхности тела горнорабочего на анатомо-топографические зоны:

1 – голова (волосистая часть); 2 – глаза; 3 – органы слуха; 4 – органы дыхания; 5 – грудь; 6 – живот; 7 – бедро; 8 – колено; 9 – голень; 10 – стопа; 11 – шея; 12 – плечо; 13 – спина; 14 – позвоночник; 15 – локоть; 16 – предплечье; 17 – кисть; 18 – таз (ягодица)

Для конструкции спецодежды шахтеров, защищающей определенную зону тела, обосновывали требования к необходимому набору защитных свойств, предъявляемых к усилительным накладкам, снижающим действие фактора, и давали дифференциальную оценку каждому свойству, позволяющую укрупнять полученные экспериментальным путем показатели.

Существующие подходы к оценке влияния производственных факторов на организм горнорабочего рассматривали с учетом характера их воздействия на анатомо-функциональные особенности организма, которые определяют топографию воздействия факторов на тело человека. Особенно важно это для характеристики локальных и смешанных факторов (см. табл. 2).

Поскольку участок тела совершенно однороден по пространственной ориентации и по анатомо-функциональным характеристикам, решение вопроса о рациональной защите приобретает необходимую однозначность. Следует отметить, что с точки зрения проектирования спецодежды шахтеров реализация защиты зоны тела человека по комплексу воздействующих факторов сведена к подбору материалов и конструкций с необходимыми физико-механическими

параметрами. При таком подходе эффективная защита шахтера в целом рассматривается как сумма необходимой защиты отдельных зон. Традиционно же эту проблему решали по-иному. Требования, например, к конструкции спецодежды фактически никогда не формулировали и подменяли описанием какой-либо модели, подходящей к данному случаю. При формулировании требований к необходимой защите отдельных зон фактически получаем обоснованные требования к конструкции спецодежды, не подменяя компетенцию конструктора.

Таким образом, в основу принципа локальной защиты был положен учет специфики воздействия различных опасных и вредных производственных факторов на отдельные участки тела шахтера и проведено распределение поверхности их тела на зоны с учетом пространственной ориентации во время работы, что позволило обосновать требования к зональной защите организма от воздействия опасных и вредных производственных факторов.

Результатами исследований, проведенных на ряде угольных предприятий Макеевки, установлено, что воздействие факторов производственной среды на указанные зоны неодинаково и обусловлено вынужденными рабочими позами горнорабочих, которые они принимают при выполнении производственных операций. В качестве основных факторов, определяющих механические воздействия на анатомо-топографические зоны тела шахтеров основных профессий, исследовали продолжительность работы в вынужденных позах (табл. 3).

Таблица 3

Продолжительность механических воздействий на тело шахтеров основных профессий в зависимости от мощности пласта и относительного времени работы в вынужденных рабочих позах

Рабочие позы, обусловленные выполнением производственных операций	Высота рабочей позы, м	Доля времени работы в вынужденных позах ко всему рабочему времени, %, горнорабочих основных профессий				
		ГРОЗ	Проходчик	Элетро-слесарь	Машинист электровоза	Доставщик-такелажник
Стоя выпрямившись или согнувшись	1,6...1,68	0	72,2	31,2	20,2	53,6
На коленях: с опорой на кисти или пятки, согнувшись	0,6...1,2	71,8	4,9	39,9	10,3	41,3
На корточках	1,1	0	5,0	23,5	0	5,1
Сидя за пультом управления	1,4	0	17,9	0	69,5	0
Опора на бедро и голень	0,82...1,08	11,6	0	0	0	0
Лежа на боку и животе	0,42...0,44	16,6	0	5,4	0	0

Требования к уровням необходимой зональной защиты тела горнорабочих от механических и биологических факторов установлены на основе проведения кластерного анализа или таксономии, при котором анатомо-топографические зоны тела шахтеров различных профессий оценивали по показателям микротравм и пиодермитов, что позволило определить степень сходности воздействия на них опасных и вредных производственных факторов для объединения в более или менее однородные группы.

Получены четыре кластера анатомо-топографических зон тела профессиональных групп и установлены требования к уровню их защиты (табл. 4).

Таблица 4

Результаты таксономии анатомо-топографических зон тела горнорабочих

Профессия	Анатомо-топографические зоны	Показатель поражённости пиодермитами и травмами на 100 см ² площади зоны	
		Пиодермиты	Микротравмы
Таксон 1			
Проходчики	Спина	0,20	0,23
	Плечо	0,49	0,18
	Таз	0,25	0
ВШТ	Спина	0	0
	Плечо	0,09	0
	Таз	0,25	0
	Бедро	0,55	0
	Голень	0,40	0,12
Таксон 2			
ГРОЗ	Живот	1,20	0,07
	Спина	0,53	0,46
	Таз	0,60	0
	Бедро	1,80	0,23
Проходчики	Живот	0,86	0
	Бедро	0,60	0,23
	Голень	2,10	1,24
ВШТ	Живот	0,66	0
	Предплечье	1,40	0,13
Прочие подземные рабочие	Предплечье	1,00	0,13
	Локтевой сустав	0,80	0
	Коленный сустав	0,98	0,17

Окончание табл. 4

Профессия	Анатомо-топографические зоны	Показатель поражённости пиодермитами и травмами на 100 см ² площади зоны.	
		Пиодермиты	Микротравмы
Таксон 3			
ГРОЗ	Грудь	0,50	0,13
	Плечо	0,49	0,40
	Спина	0	0,21
Проходчики	Грудь	0,20	0,07
	Локтевой сустав	1,25	1,75
	Стопа	0,74	1,80
ВШТ	Грудь	0,30	0
	Локтевой сустав	0	0,43
	Коленный сустав	0,65	0,17
Таксон 4			
ГРОЗ	Предплечье	6,70	1,50
	Локтевой сустав	6,10	0,45
	Коленный сустав	19,65	0,85
	Голень	4,20	1,00
	Позвоночник	7,72	0,27
Проходчики	Предплечье	5,00	1,15
	Коленный сустав	3,95	1,50

Зависимости, устанавливающие степень защиты шахтеров от комплекса опасных и вредных производственных факторов посредством применения спецодежды, оценивали по показателям профессионального риска в следующем порядке. Были получены уравнения регрессии, определяющие зависимости между опасными и вредными производственными факторами, действующими на шахтера до и после защиты спецодеждой. Значение постоянных коэффициентов устанавливали методом наименьших квадратов по данным сопоставления факторов до и после защиты спецодеждой шахтеров. Для установления видов функциональной зависимости применен метод с использованием полинома Чебышева. При этом принимался такой вид уравнения, при котором дисперсия была минимальной. Расчеты проводились на компьютере в программе Excel 2010 в такой последовательности. Для каждого значения фактора определяли элемент риска отдельно по каждому показателю, характеризующему защитное свойство спецодежды шахтеров:

$$r_i = E_{\text{пр(max)}} - E_{\text{пр}i} \cdot \quad (2)$$

Затем определяли суммарное значение элементов риска для спецодежды в целом по критериям Лапласа [5] (уровень защиты конкретной спецодежды определенной анатомо-топографической зоны) по формуле

$$K_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i. \quad (3)$$

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Полученный результат позволяет провести сравнительную комплексную оценку спецодежды из нескольких тканей и оценить надежность защиты каждой из них определенной зоны. Защита всего тела шахтера рассматривается как сумма защиты различных зон.

Список литературы / References

1. Долженков, А.Ф. Критерии оценки износостойкости спецодежды при работах на маломощных пластах / А.Ф. Долженков // Вісник національного технічного університету України «КПІ»: зб. наук. праць. Серія «Гірництво». – 2015. – Вип. 29. – С. 43 – 49.

Dolzhenkov, A.F. *Kriterii otsenki iznosostoykosti spetsodezhdy pri rabotakh na malomoshchnykh plastakh* [Criteria of estimation of wear resistance of working clothes by the works at thin beds]. *Visnyk natsional'nogo tekhnichnogo universytetu Ukrainy "KPI": zb. nauk. prats'. Seriya "Girnytstvo"* [Bulletin of the "KPI" National technical university of the Ukraine: collection of scientific papers. Series "Mining industry"]. 2015, issue 29, pp. 43 – 49.

2. Долженков, А.Ф. Развитие научных основ создания высокоэффективных средств индивидуальной защиты шахтеров: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / А.Ф. Долженков. – Макеевка, 2009. – 422 с.

Dolzhenkov, A.F. *Razvitiye nauchnykh osnov sozdaniya vysokoeffektivnykh sredstv individual'noy zashchity shakhtyorov: dis... d-ra tekhn. nauk: 05.26.01* [Development of scientific fundamentals of creation of high-efficiency means of personal protection of mine workers: diss. dr. tech. sci.: 05.26.01]. Makeyevka, 2009, 422 p.

3. Долженков, А.Ф. Технические требования к защитным и эксплуатационным свойствам спецодежды горнорабочих / А.Ф. Долженков, Л.И. Скляр, С.А. Долженков // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 2011. – Вып. 48. – С. 188 – 192.

Dolzhenkov, A.F., Sklyarov, L.I., Dolzhenkov, S.A. *Tekhnicheskiye trebovaniya k zashchitnym i ekspluatatsionnym svoystvam spetsodezhdy gornorabochikh* [Technical requirements to protection and operation properties of working clothes of mine workers]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2011, issue 48, pp. 188 – 192.

4. Повышение эффективности средств индивидуальной защиты горнорабочих угольных шахт: монография / А.Ф. Долженков, В.Д. Воробьев, А.И. Крючков, С.А. Долженков; под общей ред. В.Д. Воробьева. – Донецк: Донбасс, 2011. – 218 с.

Dolzhenkov, A.F., Vorob'yov, V.D., Kryuchkov, A.I., Dolzhenkov, S.A. *Povysheniye effektivnosti sredstv individual'noy zashchity gornorabochikh ugol'nykh shakht: monografiya (pod obshchey red. Vorov'yova V.D.)* [Increase in effectiveness of personal protection means of mine workers of coal mines: monograph (Vorov'yov V.D., ed.). Donetsk, Donbass Publ., 2011, 218 p.

5. Бережная, Е.В. Математические методы моделирования электрических систем / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 368 с.

Berezhnaya, Ye.V., Berezhnoy, V.I. *Matematicheskiye metody modelirovaniya elektricheskikh sistem* [Mathematical methods of modeling the electrical systems]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003, 368 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Сынковым.
Дата поступления рукописи 19.02.2018

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-43;
Sergey Leonidovich Tarasenko, head of department; e-mail: tarasenko74@mail.ru
The State Institution "Makeyevka Research Institute for Mining Safety"
286132, Makeyevka, 60, ulitsa Likhachyova. Phone: (+38 0623) 22-22-18

THE ZONAL PRINCIPLE OF THE APPROACH TO ESTIMATION OF EFFICIENCY OF PROTECTION OF MINE WORKERS WITH WORKING CLOTHES

Purpose. Investigation of the mechanism of transformation of parameters of the hazardous and harmful production factors into requirements to protective properties of the working clothes under conditions of the intensive zonal mechanical loads on the basis of the principle of the zonal protection.

Methods. The modern methods of the scientific investigations, i.e. analysis, generalization and systematization of the protection degree of the mine workers with the working clothes on the basis of taxonomy of the anatomico-topographic zones of their bodies; investigations of protective and operational characteristics of the working clothes of the miners with the use of the modern technical instrumentation; modeling of dependences between the indices characterizing the properties of the working clothes and the work environment with the use of the statistical analysis were utilized by solving the assigned tasks.

Results. The requirements to the necessary set of protective attributes laying claims to fabrics for the working clothes of the mine workers that reduce the action of the mechanical factor subject to character and topography of its influence on the anatomico-functional characteristics of the organism, were substantiated, what allows carrying-out the comparative complex assessment of the working clothes from several fabrics and rating the protection reliability of the identified zone by each of them considering the protection of the whole body of the miner as a sum of protection of various zones.

Scientific novelty. The differential estimate of each property of the fabric permitting to consolidate the performances obtained by the experimental approach is given; the hierarchy of the protective properties of the working clothes of the mine workers depending on the character of influence of the hazardous and harmful production factors is worked out.

Practical value. The results obtained allow increasing the service life of the working clothes by virtue of realization of the zone protection of the man's body against the complex of influencing factors that comes to selection of materials and constructions with the set of the necessary physical and mechanical parameters.

Key words: *nomenclature of mine environment factors; indices of protective properties of materials and constructions; fabric; taxonomy; coefficient of wear; zone protection.*

УДК 622.822.22:622.693.26

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»
283048, Донецк, ул. Артема 157. Тел. (+38 062)332-78-82*

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОДНОГО ОТВАЛА ПОД НАПОРОМ ВЕТРА И ТЕПЛОВОЙ ДЕПРЕССИИ

Цель. Прогноз объема утечек воздуха через скопления породы и угля в отвалах на основе изучения их проницаемости.

Методика. Математическое моделирование процессов фильтрации воздуха при различных режимах его движения.

Результаты. Предложена математическая модель фильтрации воздуха при ламинарном, турбулентном и промежуточном режимах движения.

Научная новизна. Получены аналитические зависимости скорости фильтрации воздуха при различных режимах его движения под воздействием тепловой депрессии.

Практическая значимость. По скорости фильтрации воздуха можно судить о влиянии проницаемости на процессы развития очага пожара в породном отвале.

Ключевые слова: *породный отвал; уголь; проницаемость; пористость; фильтрация воздуха; температура; скорость; очаг пожара.*

Постановка задачи. Горение породных отвалов отрицательно сказывается на экологической обстановке в городах и посёлках. Несмотря на наличие методик расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ и наличие современных способов определения поля температур тепловизорами [1] требуется глубокое изучение протекающих на породных отвалах тепломассообменных процессов с целью аналитического прогноза выделений вредных веществ между натурными наблюдениями и разработки мероприятий по уменьшению выделения вредных веществ в атмосферу [2 – 5].

Цель исследований. Прогноз объема утечек воздуха через скопления породы и угля на отвалах на основе изучения их проницаемости и порозности.

Материалы исследований. Будем исходить из общих представлений о породных отвалах как о твёрдом теле с ассоциациями частиц разного размера. Эти ассоциации, как установлено, представляют собой большие ядра (порода), вокруг которых скапливаются более мелкие (уголь). Пористая структура углей, представляющая собой молекулярное сито, и поверхностные свойства углей определяют их способность поглощать тот или иной газ и накапливать его в определённых количествах (газоносность). Молекулярное сито с большим количеством отверстий (микропор) обуславливает адсорбцию кислорода на углях и энергию его активации с углеродом. В результате исследований установлено [2], что энергия активации максимальна для коксующихся каменных углей и минимальна у антрацитов. Высокие значения энергии

активации в каменных углях указывают на то, что здесь количество малых отверстий наибольшее.

Предположим, что находящаяся масса пород и угля в породном отвале представляет собой дискретную среду, образованную под действием горных работ. Дискретная среда – двухфазна, она состоит из кусков породы, частиц угля различных фракций и газа-наполнителя в зазорах между ними и порах. Будем считать, что поры находятся в породе и в частицах угля различной фракции, причём микропоры на их поверхности образуют молекулярное сито. Зазоры между частицами угля, а также между кусками пород можно рассматривать как взаимосвязанное пространство с линейными размерами, намного превышающими длину свободного пробега молекул, где происходит фильтрация воздуха и молекулярная диффузия влажного воздуха.

Обычно моделью капиллярно-пористого тела считается система из сферических твёрдых частиц. Эти частицы могут быть уложены разным образом. Различают наименее плотную под углом 90° (кубическую укладку) и наиболее плотную под углом 60° (гексагональную укладку). Наиболее вероятной при образовании породного отвала будем считать гексагональную укладку.

На рисунке представлена при гексагональной укладке схема расположения кусков породы и частиц угля сферической формы с фракциями, образованными в результате горных работ (подвигания лавы, прохождения подготовительной выработки, сотрясательном взрывании и т.д.).

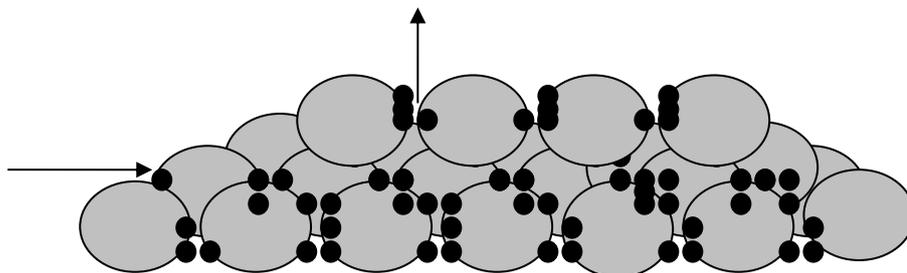


Схема гексагональной укладки кусков породы (серый цвет) и частиц угля (чёрный цвет) сферической формы. Стрелками указано направление входа и выхода фильтрационного потока через породный отвал

Пористость такой среды зависит не от радиуса частиц, а от угла их укладки. Отношение свободного объёма между кусками пород и частицами угля к общему объёму тела определим по формуле

$$\varepsilon_1 = V_1 / V, \quad (1)$$

где V_1 – свободный объём, м^3 ;

V – общий объём тела в зоне породного отвала, м^3 .

Так, при кубической укладке доля свободного объёма $\varepsilon_1 = 47,6 \%$, а при гексагональной укладке $\varepsilon_1 = 26 \%$. В последнем случае породный отвал представляет собой тело, пронизанное трубками с кривой осью, совпадающей с ходом поверхности сферических частиц. Если ещё учитывать, что между кусками породы имеются частицы угля тоже с гексагональной укладкой, то доля свободного объёма будет равна

$$\varepsilon = 0,01\varepsilon_1\varepsilon_2, \quad (2)$$

где ε_2 – доля свободного объёма между частицами угля, %.

Этот процент может меняться от 7 до 26 %, то есть быть больше или меньше в зависимости количества угля в породном отвале.

Таким образом, в реальных условиях свободный объём может существенно отличаться от расчётного и должен определяться в лабораторных условиях опытным путём.

Вероятно, при разрушении кусков пород и частиц угля и изменении их диаметров во время ведения горных работ общий их объём будет сохраняться и останется тем же их отношение. Предположим, что средний диаметр кусков породы d_n , а средний диаметр частиц угля d_m . Тогда среднегармонический их диаметр можно определить по формуле

$$d = \frac{1}{(1-n)/d_n + n/d_y}, \quad (3)$$

где n – доля угля в породном отвале;

d_n – средний диаметр кусков породы, м;

d_y – средний диаметр частиц угля, м.

Такие данные можно получить в лабораторных условиях, анализируя пробы пород и угля на терриконе.

В отличие от известных математических моделей самонагрева угля [2 – 5] будем исходить из теории двухфазных сред. Преимущество этой теории заключается в том, что она подходит дифференцированно к каждой фазе (твёрдой, жидкой, газообразной), тем самым допуская различие таких параметров фаз, как температура, концентрация газов, влажность и т.д.

В рамках теории двухфазных сред примем за малоподвижную фазу всё пространство между кусками пород и частицами угля, а за неподвижную фазу – все куски породы и частицы угля как скелет сорбента.

Согласно [6] скорость v_0 , м/с, фильтрации воздуха может быть определена по формуле

$$v_0 = \frac{2b}{(1 + \sqrt{1 + 4b/a})}. \quad (4)$$

Входящие в формулу (3) коэффициенты a и b , м/с, равны

$$a = \frac{\nu}{\delta} \sqrt{k_{\phi}} \frac{T_0}{T_c}; \quad b = \frac{k_{\phi} [\rho_0 u_0^2 \sin \alpha / (2l) + (1 - T_0 / T_c) \rho_0 g \sin \alpha]}{\rho_0 \nu}, \quad (5)$$

где α – угол склона породного отвала, ...°;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с;

δ – эмпирическая константа турбулентности фильтрационного потока в пористой среде;

T_c – средняя температура фильтрационного потока над очагом пожара, К;

T_0 – температура атмосферного воздуха, К;

k_{ϕ} – коэффициент проницаемости дисперсной среды, м²;

u_0 – скорость ветра, м/с;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Анализ формул (4) и (5) показывает, что при $a \gg 4b$ осуществляется ламинарный режим движения со скоростью $v_0 = b$, а при $b \gg a/4$ – турбулентный режим. Отсюда же следует, что чем больше угол склона и чем ближе к вершине отвала находится очаг горения, тем большее влияние на него оказывает сила ветра. Входящий в формулы (5) коэффициент k_{ϕ} , м², проницаемости дисперсной среды (пород и угля) может быть определён по формуле

$$k_{\phi} = \frac{d^2}{180(1/\varepsilon - 1)^2}, \quad (6)$$

где ε – средний коэффициент порозности кусков пород и угля.

Из формулы (6) следует, что при отсутствии порозности ($\varepsilon = 0$) коэффициент проницаемости будет равен нулю ($k_{\phi} = 0$), а при отсутствии кусков породы и угля ($\varepsilon = 1$) проницаемость среды будет максимальной. Также большое влияние на проницаемость оказывают размеры кусков породы и угля: чем они меньше, тем меньше проницаемость.

Зная все исходные параметры, можно по формуле (3) найти скорость фильтрационного потока воздуха при наличии ветра и тепловой депрессии.

Вывод. Полученные аналитические зависимости для расчёта порозности пород и их проницаемости позволяют определить режим фильтрации (ламинарный, турбулентный или промежуточный) и скорость фильтрации воздуха. По скорости фильтрации можно судить о её влиянии на развитие пожара.

Список литературы / References

1. Определение границ очагов тепловыделений на породных отвалах/ Э.А. Попов, В.П. Засевский, Д.И. Момот, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1998. – С. 93 – 96.

Popov, E.A., Zasevskiy, V.P., Momot, D.I., Yaremchuk, M.A. *Opredeleniye granits ochagov teplovydeleniy na porodnykh otvalakh* [Determination of boundaries of heat emission seats on waste dumps]. *Gornospasatel'noye delo, sb.nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD “Mine-rescue work”]. Donetsk, 1998, pp. 93 – 96.

2. Зборщик, М.П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений/ М.П. Зборщик, В.В. Осокин // Донецк: ДонГТУ, 1996. – 178 с.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V. *Predotvrashcheniye ekologicheskii vrednykh proyavleniy v porodakh ugol'nykh mestorozhdeniy* [Prevention of the ecologically harmful manifestations in rocks of coal deposits]. Donetsk, DonGTU Publ., 178 p.

3. Зборщик, М.П. Предотвращение самовозгорания горных пород / М.П. Зборщик, В.В. Осокин. – Киев: Техника, 1990. – 176 с.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V. *Predotvrashcheniye samovozgoraniya gornykh porod* [Prevention of spontaneous ignition of mine rocks]. Kiev, Tekhnika Publ., 1990, 176 p.

4. Зборщик, М.П. Условия самонагревания пиритсодержащих осадочных горных пород / М.П. Зборщик, В.В. Осокин, Ю.Н. Паниотов // Изв. вузов. Горный журн. – 1990. – №11. – С. 9 – 11.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V., Paniotov, Yu.N. *Usloviya samonagrevaniya piritsoverzhashchikh osadochnykh gornykh porod* [Conditions of the spontaneous heating of the pyrite-containing sedimentary mine rocks]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal – Proceedings of institutes of higher education. Mining journal*, 1990, no. 11, pp. 9 – 11.

5. Зборщик, М.П. Условия теплового взрыва в пиритсодержащих горных породах/ М.П. Зборщик, В.В. Осокин, Ю.Н. Паниотов // Разраб. месторождений полез. ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1990. – Вып. 86. – С. 70 – 77.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V., Paniotov, Yu.N. *Usloviya teplovogo vzryva v piritsoverzhashchikh gornykh porodakh* [Thermal explosion conditions in the pyrite-containing mine rocks]. *Razrab. mestorozhdeniy polez. iskopayemykh: Resp. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* [Mining the deposits: The Republican interdepartmental scientific-technical collection]. 1990, issue 86, pp. 70 – 77.

6. Зинченко, И.Н. Фильтрация воздуха через угольно-породные скопления на отвалах / И.Н. Зинченко, О.П. Пашковский // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1(53). – С. 82 – 88.

Zinchenko, I.N., Pashkovskiy, O.P. *Fil'tratsiya vozdukha cherez ugol'no-porodnyye skopleniya na otvalakh* [Air filtration through coal-and-rock accumulations on dumps]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”*: nauch.-tekhn.

zhurnal [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 82 – 88.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 12.02.2018

Oleg Petrovich Pashkovskiy, research assistant; e-mail: kingston-4@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) 332-78-82

PERMEABILITY OF A WASTE DUMP UNDER THE FORCE OF THE WIND AND THERMAL DROP OF VENTILATION PRESSURE

Purpose. Forecast of the volume of air losses through the rock and coal accumulations in the dumps on the basis of study of their permeability.

Methods. Mathematical modeling the filtration processes of air by various conditions of its movement.

Results. The mathematical model of air filtration was proposed by laminar, turbulent and intermediate movement conditions.

Scientific novelty. The analytical dependences of the air filtration velocity were obtained by various conditions of its movement under the influence of the thermal drop of ventilation pressure.

Practical value. One can judge about the influence of permeability on the processes of development of a seat of fire in the waste dump by the air filtration velocity.

Key words: *waste dump; coal; permeability; porosity; air filtration; temperature; velocity; seat of fire.*

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 задачи;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи (постановка задачи);
- 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
2018, № 2(55)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

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 04.04.2018.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 7,0 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 23 мая 2018 г.