



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

№ 1(56)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2019

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 1(56). – 120 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	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	В.П. Коптиков (Российская Федерация)
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	В.В. Мамаев
д-р техн. наук	Ф.В. Недопекин
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
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 № 1 от 31.01.2019).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 1(56)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2019

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2019. – No.1 (56). – 120 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included in the list of reviewed scientific publications 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.)	V.P. Koptikov (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev
Dr. Sci. (Tech.)	F.V. Nedopekin
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
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. 1 from 31.01.2019).

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

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

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

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

- Агеев В.Г., Пефтибай Г.И.,
Галухин Н.А., Еремин А.В.**
Дозирующее устройство для подачи
воды в смесительно-нагнетательную
установку 7

- Костямин Д.И., Добрякова Е.И.**
Базовые показатели для определения
мест дислокации пожарно-спасательных
частей 17

- Мамаев В.В., Момот Д.И.**
Получение газомеханической пены
на сетках пеногенераторных устройств 25

- Симонов А.М., Агарков А.В.,
Захлебин В.В.**
Дистанционный отбор проб шахтного
воздуха из изолированных пожарных
участков 37

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

- Пашковский П.С., Пефтибай Г.И.,
Галухин Н.А.**
Влияние тепловыделения цементных
материалов на кинетику ранней
прочности взрывоустойчивой
перемычки 47

- Греков С.П., Всякий А.А.,
Старикова И.Г.**
Влияние петрографического состава
углей на дросселирование из них метана 57

- Богомаз А.М., Сынков В.Г.,
Дикенштейн И.Ф., Диденко А.А.**
Устройство дымоподавления
в аварийных помещениях 68

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

- Ageyev V.G., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A., Yeryomin A.V.**
A metering device for water feed into a
mixing-force installation 7
- Kostyamin D.I. Dobryakova Ye.I.**
Basic parameters for determination of
places for deployment of fire-rescue units 17
- Mamayev V.V., Momot D.I.**
Generation of a gas-mechanical foam
on nets of foam generator devices 25
- Simonov A.M., Agarkov A.V.,
Zakhlebin V. V.**
Remote mine air sampling from isolated fire
districts 37

II. Safety in emergencies

- Pashkovskiy P.S., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A.**
Influence of heat release of cement
materials on initial strength kinetics
of a blast-resistant stopping 47
- Grekov S.P., Vsyakiy A.A.,
Starikova I.G.**
Influence of the petrographic composition
of coals on methane throttling from them 57
- Bogomaz A.M., Synkov V.G.,
Dikenshteyn I.F., Didenko A.A.**
A smoke suppression device in accidental
premises 68

Коляда А.Ю.

Применение водяных завес для
противопожарной защиты подземных
складов взрывчатых материалов

77

Kolyada A.Yu.

Use of water screens for fire protection of
underground explosive materials depots

**III. Охрана труда и экологическая
безопасность**

Греков С.П., Пашковский О.П.

Минимальные пожаробезопасные
размеры породных отвалов угольных
шахт

86

**III. Labor protection
and environmental safety**

Grekov S.P., Pashkovskiy O.P.

The minimum fire-safe dimensions of waste
heaps of coal mines

**Агарков А.В., Козлитин А.А.,
Лебедева В.В., Щербакова О.Н.**
Способность пористых материалов
поглощать аварийно химически
опасные вещества

94

**Agarkov A.V., Kozlitin A.A.,
Lebedeva V.V., Shcherbakova O.N.**
Ability of porous materials to absorb
chemically hazardous substances conducive
to accident

**Долженков А.Ф., Коляда А.Ю.,
Симоненко А.А.**

Пожаро-, взрывоопасность аварийно
химически опасных веществ на
промышленных предприятиях

101

**Dolzhenkov A.F., Kolyada A.Yu.,
Simonenko A.A.**

Fire-, explosion hazard of chemically
hazardous substances conducive to
accidents at industrial enterprises

Шаповалов В.В., Берестовая А.А.
Низкотемпературное горение в
пероксидно-солевых системах

110

Shapovalov V.V., Berestovaya A.A.
Low-temperature combustion in peroxide-
salt systems

Требования к оформлению статьи

119

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [622.868.42:691.5]:62-189.2

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

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

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

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

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

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

ДОЗИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОДАЧИ ВОДЫ В СМЕСИТЕЛЬНО-НАГНЕТАТЕЛЬНУЮ УСТАНОВКУ

Цель. Разработка конструкции и определение основных параметров регулируемого дозирующего устройства для подачи воды в смесительно-нагнетательную установку.

Методика. Анализ конструктивных решений дозирующих устройств подачи воды в смесительно-нагнетательную установку. Аналитические исследования закономерностей течения воды в расходных окнах компенсатора давления, анализ действующих сил на плунжер компенсатора давления и их численное определение.

Результаты. Разработана гидравлическая и конструктивная схемы дозирующего устройства. Устройство построено по двухступенчатой схеме, первая ступень которого представляет собой компенсатор давления, обеспечивающий постоянный перепад давления на последовательно соединенной второй ступени – регуляторе расхода, выполненном в виде вентиля. Постоянный перепад давления на расходном вентиле обеспечивает стабилизацию расхода воды. Для повышения чувствительности устройства перепад давления выделяется на гибком разделительном элементе – упругой мембране, что обеспечивает полную герметичность и исключает потери энергии на трение. Получено уравнение статического равновесия плунжера, уравнение истечения жидкости. Определены численные значения основных конструктивных параметров и сил, действующих на плунжер.

Научная новизна. Предложенное устройство отличается тем, что сигнал обратной связи по давлению с выхода устройства подается одновременно в две полости: плунжерную полость упругой мембраны и пружинную полость противоположного торца плунжера, что позволяет осуществить жесткую связь упругой мембраны с плунжером и обеспечить автоматическую стабилизацию перепада давления на вентиле.

Практическая значимость. Устройство может быть применено ко всему парку существующего смесительно-нагнетательного оборудования, использующегося при возведении взрывоустойчивых и изолирующих сооружений. За счет повышения точности подачи воды в поток сухой смеси повышается механическая прочность перемычки и сокращается время набора прочности.

Ключевые слова: дозирующее устройство; подача воды; стабилизация; смесительно-нагнетательное оборудование; конструкция.

Постановка проблемы. При возведении взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом одним из главных технологических параметров является расход воды затворения. Стабильность соотношения «вода-вяжущее» является важным показателем прочности материала перемычки. При увеличении расхода воды затворения выше допустимой нормы снижается механическая

прочность материала перемычки или вообще раствор не затвердевает. Это объясняется тем, что увеличение доли воды в компонентном составе материала эквивалентно снижению доли вязущего вещества. При уменьшении расхода воды ухудшается растекаемость материала в межопалубочном пространстве перемычки, снижается дальность подачи перекачиваемого раствора из-за увеличения вязкости, повышается риск закупоривания растворопровода, повышается энергопотребление смесительно-нагнетательного оборудования, увеличивается износ резинового вкладыша обоймы винтового насоса.

Существующие устройства дозирования в смесительно-нагнетательных установках обеспечивают функции измерения расхода воды и его индикацию на пульте управления. Функцию регулирования при отклонении расхода воды от нормы осуществляет оператор путем изменения проходного сечения вентиля подвода воды. Таким образом, в существующих устройствах реализуется человеко-машинная схема регулирования расхода воды, при котором не гарантируется строгое соблюдение водовязущего отношения, повышается нагрузка на оператора за счет непрерывного контроля показаний измерительных приборов и ручного регулирования расхода, что отрицательно влияет на качество приготовляемого раствора.

Анализ последних исследований. Для контроля расхода воды при ее подаче в смесительно-нагнетательное оборудование распространение получили устройства измерения перепада давления на диафрагме с помощью дифференциального манометра и специализированные приборы измерения расхода воды – расходомеры. Гидравлическими пультами с дифференциальными манометрами и диафрагмами оснащаются смесительно-нагнетательные агрегаты типа «Монолит» и комплексы типа «Темп» и ОНР [1, 2]. Расходомерами воды оснащают агрегаты «Моно» и «Монолит-1М».

В основе способа регулирования расхода воды с помощью гидравлических пультов, оснащенных дифференциальным манометром, лежит формула, определяющая зависимость расхода жидкости через турбулентный (квадратичный) дроссель (диафрагму):

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1)$$

где Q – расход воды, м³/с;

μ – коэффициент расхода;

S – площадь проходного сечения диафрагмы, м²;

ΔP – перепад давления на диафрагме, Па;

ρ – плотность воды, кг/м³.

Поскольку отверстие в диафрагме не изменяется, то $S = \text{const}$ и условие $Q = \text{const}$ достигается при $\Delta P = \text{const}$. Перепад давления ΔP измеряют дифференциальным манометром и в случае его изменения вручную регулируют

вентиль подвода воды до возвращения показания дифференциального манометра в исходное положение.

В агрегатах «Моно» и «Монолит-1М» расход воды определяют с помощью расходомера, установленного на пульте оператора. Точность показаний расходомера типа Conflow составляет $\pm 2\%$ от полной шкалы прибора [3]. В случае выхода показаний стрелки прибора из установленного диапазона оператор прикрывает или приоткрывает вентиль подвода воды до возвращения показаний прибора в установленный диапазон шкалы.

Анализируя рассмотренные способы регулирования расхода воды можно сделать вывод об общем подходе, принятом в существующем смесительно-нагнетательном оборудовании, заключающемся в том, что в контур регулирования расхода воды включен оператор, который следит за показаниями дифференциального манометра или расходомера, а затем, в случае необходимости, вручную регулирует расход воды. Это создает нагрузку на оператора и не гарантирует строгого соблюдения водовяжущего отношения.

Цель работы. Создание автоматического дозирующего устройства с регулируемым расходом, определение его основных конструктивных и гидравлических параметров.

Результаты исследования. В основу принципа работы автоматического дозирующего устройства с регулируемым расходом положена возможность стабилизации расхода жидкости согласно формуле (1) при стабилизации параметров S и ΔP (рис. 1). Стабильность параметра S легко получить при использовании регулирующего вентиля. Площадь S проходного сечения вентиля устанавливают вручную на все время работы смесительно-нагнетательного оборудования исходя из необходимой производительности. Поддержание постоянного перепада давления ΔP на проходном вентиле целесообразно осуществить с помощью последовательно включенного компенсатора давления.

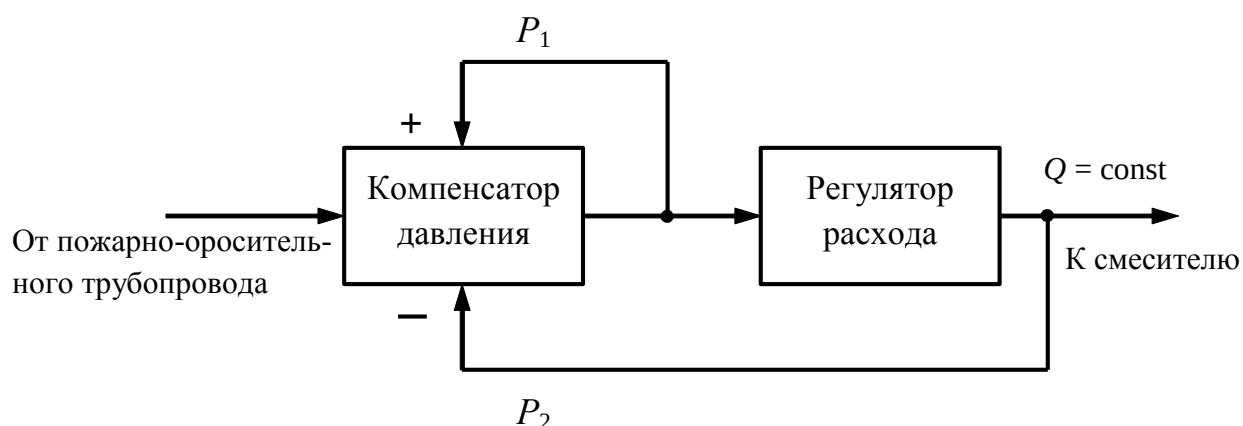


Рис. 1. Блок-схема дозирующего устройства

Вода от пожарно-оросительного трубопровода поступает на вход компенсатора давления и далее на последовательно соединенный с ним регулятор расхода, выходной стабилизированный расход $Q = \text{const}$ которого поступает в смесительную камеру оборудования для приготовления и перекачивания раствора. На плунжере компенсатора давления получают разностный сигнал

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

где P_1 – давление на входе в регулятор расхода, Па;

P_2 – давление на выходе регулятора расхода, Па,

и сравнивают с давлением настройки пружины компенсатора давления. При увеличении ΔP компенсатор давления прикрывается, а при уменьшении ΔP – приоткрывается. Рабочий ход плунжера компенсатора давления выбирают малым, не превышающим 1 мм. За счет малого хода плунжера усилие сжатия пружины остается практически неизменным, чем и обеспечивается постоянство перепада давления на регуляторе расхода, а следовательно, и постоянство расхода Q . Вентиль Др выполняет функцию регулятора расхода (рис. 2).

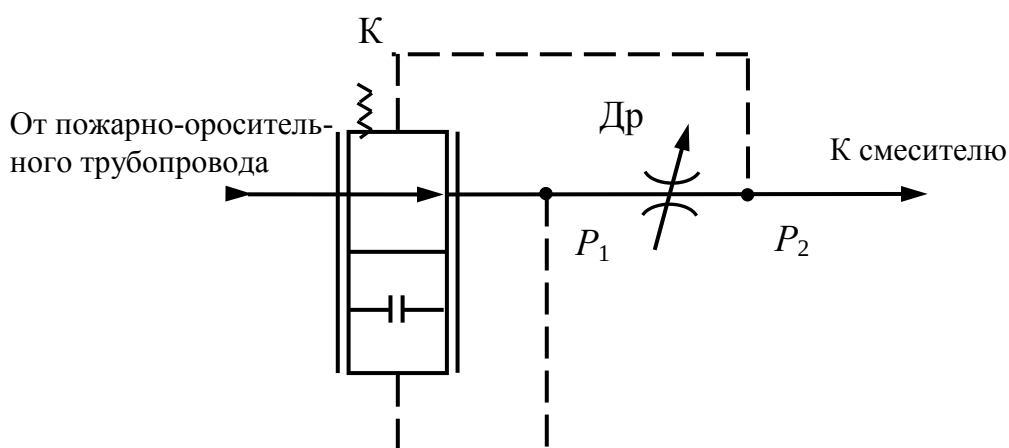


Рис. 2. Гидравлическая принципиальная схема дозирующего устройства:

К – компенсатор давления; Др – вентиль

Упрощенное уравнение статического равновесия плунжера компенсатора давления К запишем в виде

$$F_{\text{пр}} + P_2 S_{\text{п}} = P_1 S_{\text{п}},$$

где $F_{\text{пр}}$ – сила упругости пружины, Н;

$S_{\text{п}}$ – площадь торца плунжера, м^2 .

Преобразуем это уравнение в виде

$$F_{\text{пр}} = (P_1 - P_2)S_{\text{п}} = \Delta P S_{\text{п}}.$$

Отсюда находим

$$\Delta P = F_{\text{пр}} / S_{\text{п}} = c (x + x_0) / S_{\text{п}},$$

где ΔP – перепад давления на вентиле Др, Па;

c – жесткость пружины, Н/м;

x – ход плунжера, м;

x_0 – деформация затяжки пружины, м.

В компенсаторах давления K ход плунжера x выбирают малым, поэтому $\Delta P \approx c x_0 / S_{\text{п}} = \text{const}$. На выполнении этого приближенного равенства основана работа всех дроссельных устройств регулирования расхода. Таким образом, компенсатор давления K поддерживает постоянный перепад давления на вентиле Др, что обеспечивает постоянство расхода. Требуемый расход воды настраивают рукояткой вентиля Др за счет изменения площади его проходного сечения. Однако перепад давления поддерживается компенсатором K постоянным независимо от изменения площади, чем и обеспечивает не только постоянство расхода воды, но и возможность регулирования этого расхода.

На рис. 3 показана конструктивная схема дозирующего устройства, включающая компенсатор давления, вентиль, трубки, подвод и отвод воды. Компенсатор давления состоит из корпуса, в осевой расточке которого расположен аксиально подвижный и подпружиненный плунжер, конический затвор которого образует с седлом кольцевой зазор. Плунжер соединен одним концом с упругой мембраной. Камеры служат для управления плунжером. Входной поток воды от пожарно-оросительного трубопровода поступает в устройство через подвод воды и далее последовательно проходит через кольцевой зазор, канал, расходную щель и поступает на выход устройства – отвод воды. Шток обеспечивает регулирование площади расходной щели при вращении рукоятки, закрепленной на его свободном конце.

Расход воды через кольцевой зазор компенсатора давления найдем по формуле

$$Q_{\text{к}} = \mu_{\text{к}} S_{\text{к}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{к}}}{\rho}},$$

где $Q_{\text{к}}$ – расход воды через кольцевой зазор, м³/с;

$\mu_{\text{к}}$ – коэффициент расхода;

$S_{\text{к}}$ – площадь кольцевого зазора, м²;

$\Delta P_{\text{к}} = P_{\text{т}} - P_1$ – перепад давления на кольцевом зазоре, Па;

$P_{\text{т}}$ – давление воды в пожарно-оросительном трубопроводе, Па.

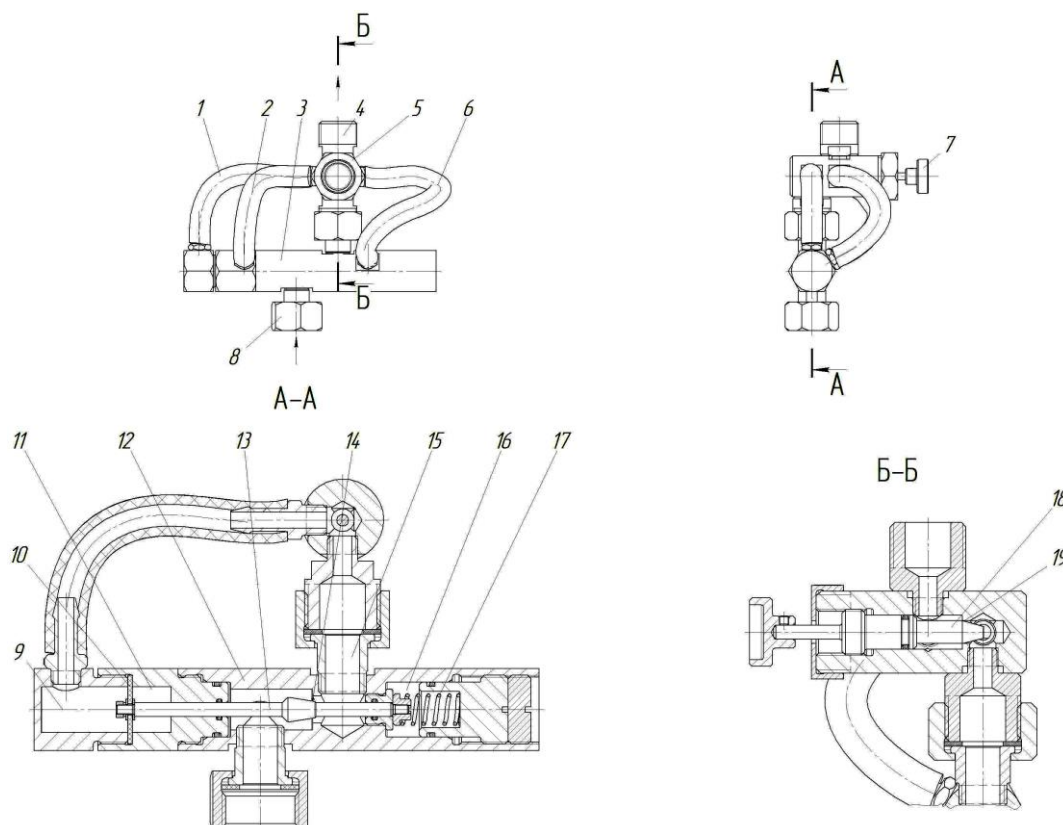


Рис. 3. Автоматическое дозирующее устройство:

1, 2, 6 – трубки; 3 – компенсатор давления; 4 – отвод воды; 5 – вентиль; 7 – рукоятка; 8 – подвод воды; 9, 11, 16 – камеры; 10 – упругая мембрана; 12 – корпус компенсатора давления; 13 – плунжер; 14 – кольцевой зазор; 15 – канал; 17 – пружина; 18 – шток; 19 – расходная щель

Расход воды через расходную щель вентиля найдем по формуле

$$Q_B = \mu_B S_B \sqrt{\frac{2\Delta P_B}{\rho}},$$

где Q_B – расход воды через расходную щель, м³/с;

μ_B – коэффициент расхода щели;

S_B – площадь проходного сечения расходной щели, м²;

$\Delta P_B = P_1 - P_c$ – перепад давления на расходной щели, Па;

P_c – давление воды в смесителе, Па.

Из условия неразрывности потока запишем уравнение

$$Q_B = \mu_K S_K \sqrt{\frac{2\Delta P_K}{\rho}} = \mu_B S_B \sqrt{\frac{2\Delta P_B}{\rho}}. \quad (2)$$

Исходными данными для проектирования дозирующего устройства являются его максимальный расход, постоянный перепад давления на расходной щели, диапазон давлений в пожарно-оросительном трубопроводе.

Максимальный расход воды рассчитываем применительно к цементно-зольной смеси с водотвердым отношением В/Т = 0,4. При производительности смесительно-нагнетательного оборудования типа «Монолит» 10 м³/ч раствора массовый расход сухой смеси равен 8990 кг/ч. Тогда необходимый максимальный расход воды 3596 кг/ч = 59,93 кг/мин, что соответствует объемному расходу воды примерно 60 дм³/мин. Постоянный перепад давления на расходной щели выбираем равным 0,2 МПа. Это обосновывается тем, что согласно нормативным документам давление воды в пожарно-оросительном трубопроводе должно находиться в диапазоне 0,6...1,5 МПа. Поскольку энергия для управления плунжером компенсатора давления отбирается от внешней гидравлической сети, то постоянный перепад давления не может быть меньше нижнего допустимого давления в пожарно-оросительном трубопроводе. В нашем случае 0,2 МПа < 0,6 МПа, поэтому обеспечивается условие работоспособности дозирующего устройства при нормативном диапазоне давлений.

Используя уравнение неразрывности потока (2), находим конструктивный параметр вентиля – наибольшую площадь проходного сечения:

$$S_B = \frac{Q_B}{\mu_B} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_B}}.$$

При $\mu_B = 0,7$; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $Q_k = 60 \text{ дм}^3/\text{мин}$ получаем $S_B = 71,4 \text{ мм}^2$.

Другой конструктивный параметр – площадь проходного сечения кольцевого зазора компенсатора давления S_k также находим, используя уравнение (2).

Для расчетов принимаем $\mu_k = 0,7$. Перепад давления ΔP_k на кольцевом зазоре выберем из следующих соображений. Принимаем, что темп подачи сухой смеси в загрузочный бункер смесительно-нагнетательной установки не оказывает заметного влияния на давление истечения воды в смеситель. Тогда давление после кольцевого зазора 14 равно $P_k = \Delta P_B = 0,2 \text{ МПа}$. Давление на входе в кольцевой зазор равно давлению воды в пожарно-оросительном трубопроводе P_T , поэтому $\Delta P_k = P_T - 0,2$. При расчете площади сечения выбираем нижнее значение допустимого диапазона значений давления, то есть выбираем $P_T = 0,6 \text{ МПа}$. На практике нормативное значение нижнего предела давления во многих случаях не обеспечивается. Поэтому для расчетов принимаем $P_T = 0,4 \text{ МПа}$, тогда перепад давления на кольцевой щели равен $\Delta P_k = 0,2 \text{ МПа}$. Отсюда следует, что площадь проходного сечения кольцевого зазора равна 71,4 мм². Уравнение статического равновесия плунжера компенсатора давления имеет вид

$$\Delta P_B S_M = F_{гд} + F_{пр}, \quad (3)$$

где S_M – эффективная площадь упругой мембраны, м²;

$F_{гд}$ – осевая составляющая (проекция на продольную ось) гидродинамической силы, Н.

Эффективную площадь тарельчатой упругой мембраны найдем по формуле

$$S_m = \kappa \pi/12 (D^2 + Dd + d^2),$$

где D – диаметр защемления, м;

d – диаметр жесткого центра, м;

κ – коэффициент, равный 1 при $d/D = 0,6$.

Осевую неуравновешенную составляющую гидродинамической силы найдем из выражения

$$F_{гд} = 2\mu_k S_k \Delta P_k \cos\alpha,$$

где $\alpha = 69^\circ$ – угол между осью струи и продольной осью плунжера.

С учетом полученных выражений уравнение (3) запишем в следующем виде:

$$\Delta P_v \kappa \pi/12 (D^2 + Dd + d^2) = 2\mu_k S_k \Delta P_k \cos\alpha + c (x + x_0). \quad (4)$$

Из уравнения (4) находим жесткость пружины при условии максимальной площади сечения кольцевого зазора, то есть при $x = 0$:

$$c = [\Delta P_v \kappa \pi/12 (D^2 + Dd + d^2) - 2\mu_k S_k \Delta P_k \cos\alpha] / x_0.$$

Усилие на жестком центре упругой мембраны равно $\Delta P_v S_m = 251,3$ Н.

Гидродинамическая сила при $\mu_k = 0,7$; $\alpha = 69^\circ$; $\Delta P_k = 0,2 \cdot 10^6$ Па; $S_k = 71,4$ мм² равна $F_{гд} = 7,2$ Н. Отсюда находим силу пружины F_0 при предварительной деформации $F_0 = 244,1$ Н.

Рабочий ход h пружины выбираем равным не более 1 мм, поскольку его увеличение ухудшает точность регулирования расхода воды. Отклонение усилия пружины от усилия предварительной затяжки устанавливаем равным не более 5 %. Отсюда жесткость пружины равна $c = 0,05 F_0/h = 12$ Н/мм.

Модуль силы трения $F_{тр}$ покоя двух уплотнительных колец находим по формуле

$$F_{тр} = 2 f \pi d b P_k,$$

где f – коэффициент трения покоя резины по металлу;

d – уплотняемый диаметр штока плунжера, м;

b – ширина уплотнения, м;

P_k – давление на контактную поверхность, Па.

Находим давление на контактную поверхность

$$P_k = P_0 + P_{тр},$$

где P_o – давление монтажного сжатия уплотнительного кольца, Па.

Давление P_o находим по формуле

$$P_o = k W^m,$$

где k и m – эмпирические коэффициенты;

$$W = \frac{d - d_k}{d} \quad \text{– относительное сжатие кольца.}$$

При $k = 1,96 \cdot 10^6$; $m = 0,5$; $W = 0,158$ получаем $P_o = 0,78 \cdot 10^6$ Па. Тогда наибольшее контактное давление, действующее на поверхность трения, равно $P_k = 0,78 \cdot 10^6 + 1,50 \cdot 10^6 = 2,28 \cdot 10^6$ Па, а модуль силы трения покоя двух резиновых колец при $f = 0,7$ равен $F_{тр} = 24$ Н. Проведенный расчет статических сил, действующих на плунжер компенсатора давления, показывает, что сила упругости пружины на порядок выше модуля силы трения покоя, что обеспечивает надежную работу устройства. Дополнительный запас силы необходим для придания плунжеру необходимого ускорения.

Выводы

Предложена конструктивная схема дозирующего устройства для подачи воды в смесительно-нагнетательную установку, которая позволяет в автоматическом режиме (без участия оператора) поддерживать требуемое значение водотвердого отношения приготавливаемого раствора. Использование предложенной конструкции позволяет снизить утомляемость оператора и повысить качество раствора. Определены основные гидравлические и конструктивные параметры устройства: перепады давления на расходных окнах, расход воды, жесткость и ход пружины, усилие на плунжере, силы трения уплотнительных колец, площади сечения расходных окон компенсатора давления и регулируемого вентиля.

Список литературы / References

1. Агеев, В.Г. Пути совершенствования оборудования для изоляции участков при пожарах в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай // Научный вестн. УкрНИИПБ. – 2012. – № 1(25). – С. 60 – 67.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I. *Puti sovershenstvovaniya oborudovaniya dlya izolyatsii uchastkov pri pozharakh v shakhtakh* [Ways of improvement of an equipment for isolation of districts by fires in mines]. *Nauchnyy vestnik UkrNIIPB* [Scientific bulletin of the UkrNIIPB]. 2012, no. 1(25), pp. 60 – 67.

2. Повышение эффективности оборудования для возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом / Г.И. Пефтибай, И.Ф. Дикенштейн, В.А. Чернышев, Э.Г. Чайковская // Вестник Ин-та гражданской защиты Донбасса. – 2015. – № 2(2). – С. 26 – 32.

Peftibay, G.I., Dikenshteyn, I.F., Chaykovskaya, E.G. *Povysheniye effektivnosti oborudovaniya dlya vozvedeniya izoliruyushchikh sooruzheniy gidromekhanicheskim*

sposobom [Effectiveness increase of an equipment for erection of isolating constructions by the hydromechanical method]. *Vestnik Instituta grazhdanskoy zashchity Donbassa* [Bulletin of the Civil Defence Institute of the Donetsk Basin]. 2015, no. 2(2), pp. 26 – 32.

3. Расходомер Conflow [Электронный ресурс]. URL: http://www.conflow.ru/pdf_docs/4_FLOW_MEASUREMENT/CODE%20452G.pdf (дата обращения 10.12.2018).

Raskhodomer Conflow [The Conflow flow meter]. (Electronic resource). Available at: http://www.conflow.ru/pdf_docs/4_FLOW_MEASUREMENT/CODE%20452G.pdf (Accessed 10.12.2018).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 28.01.2019

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

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

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

Anton Vitalyevich Yeryomin, development engineer of the 1st category; e-mail: a.v.eremin18@gmail.com

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

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

A METERING DEVICE FOR WATER FEED INTO A MIXING-FORCE INSTALLATION

Purpose. Development of the construction and determination of principal parameters of the controlled metering device for water feed into the mixing-force installation.

Methods. Analysis of constructive solutions of the metering devices for water feed into the mixing-force installation. Analytical investigations of conformities of the water flow in flow windows of a pressurizer, analysis of the forces influencing on a plunger of the pressurizer and their numerical determination.

Results. The hydraulic and constructive circuits of the metering device have been worked out. The device is based on the two-stage system. The first stage of it is the pressurizer that guarantees the constant pressure drop at the series-connected second stage, i.e. at the flow regulator fulfilled in the form of a valve. The constant pressure drop at the feed valve guarantees the stabilization of the water consumption. For higher sensitization of the device the pressure drop is allocated at a flexible separating element, i.e. at an elastic diaphragm, what secures the complete airtightness and excludes friction energy losses. The static equilibrium equation of the plunger, the egress equation has been obtained. The numerical values of the principal constructive parameters and forces influencing on the plunger have been determined.

Scientific novelty. The proposed device distinguishes itself by that fact that the pressure feedback signal from the outlet of the device is given into two cavities at the same time: into the plunger cavity of the elastic diaphragm and into the spring cavity of the opposite flat end of the plunger, what permits to realize the rigid constraint of the elastic diaphragm with the plunger and to ensure the automatic stabilization of the pressure drop on the valve.

Practical value. The device may be applied to the whole park of the existing mixing-force equipment being used when erecting the explosion-proof and isolating structures. At the expense of the higher exactness of water feed in a dry mixture flow the mechanical stability of a stopping increases and the time of the strength generation reduces.

Key words: metering device; water feed; stabilization; mixer force equipment; construction.

УДК 614.842.862

*Дмитрий Игоревич Костямин, главный государственный инспектор по пожарному надзору;
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;

Елена Ивановна Добрякова, ведущий инж.; e-mail: kdom100@mail.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-44

БАЗОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ДИСЛОКАЦИИ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ

Цель. Выделить критерии для определения мест дислокации пожарно-спасательных частей.

Методика. Аналитические исследования законодательной базы для нормирования расположения пожарно-спасательных подразделений и сведений о выездах на пожары.

Результаты. На основе анализа нормируемых показателей для определения мест дислокации и количества пожарно-спасательных подразделений в ряде стран выделены базовые показатели, в том числе и скорость движения пожарного автомобиля от места получения сообщения о пожаре до места вызова в городе и в населенных пунктах сельской местности. Приведена информация о методике определения средней скорости движения пожарного автомобиля и коэффициента извилистости дорог общего пользования путем анализа и обработки сведений о выездах на пожары пожарно-спасательных подразделений и предложен перечень критериев образования пожарно-спасательных подразделений.

Научная новизна. Приведена информация о перспективах применения разработанной НИИГД «Респиратор» методики определения средней скорости движения пожарного автомобиля и коэффициента нелинейности дорог общего пользования путем анализа и обработки сведений о выездах на пожары подчиненных пожарно-спасательных подразделений и предложен перечень критериев образования пожарно-спасательных подразделений. Отмечено, что с помощью полученных НИИГД «Респиратор» результатов проверены используемые ранее критерии образования и определения мест дислокации пожарно-спасательных частей, адаптированы к современным условиям и откорректирован перечень критериев.

Практическая значимость. Аналитические исследования сведений о выездах пожарно-спасательных подразделений к месту вызова позволили уточнить перечень и численные показатели для определения мест дислокации пожарно-спасательных подразделений, провести анализ обеспечения выполнения данных критериев существующими пожарно-спасательными подразделениями для определения мест расположения дополнительных пожарно-спасательных подразделений.

Ключевые слова: *пожар; время прибытия первого пожарно-спасательного подразделения; скорость движения пожарного автомобиля; коэффициент извилистости дорог; дислокация.*

Постановка проблемы. Одной из гарантий сохранения жизни людей и материальных ценностей при возникновении пожаров является прибытие пожарно-спасательных подразделений к месту вызова на начальной стадии развития пожара, которое определяется нормируемыми показателями времени прибытия первого пожарно-спасательного подразделения к месту вызова.

Условие соблюдения данного норматива гарантировано при соответствии реально возможной скорости движения пожарного автомобиля и расчетной, используемой для определения максимального расстояния от пожарной части до границ ее обслуживания. Согласно действующим критериям образования и определения мест дислокации пожарно-спасательных частей, пожарный автомобиль должен прибыть к месту возникновения пожара в черте города через 10 мин после получения вызова и через 20 мин – в населенные пункты сельской местности. При этом радиус обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением (далее – радиус) не должен превышать 3 км. Одновременно допускается колебание длины данного радиуса от 2 до 4 км в зависимости от наличия производственных предприятий и их пожарной опасности, однако до настоящего времени не разработана методика расчета скорости движения пожарного автомобиля и длины радиуса в предлагаемых пределах. Из вышеизложенного следует, что, кроме вопроса о допустимой длине радиуса, возникает вопрос и о количестве пожарно-спасательных подразделений по обслуживанию населенных пунктов в сельской местности. На территории Донецкой Народной Республики села расположены на расстоянии более 3 км друг от друга. Следовательно, по логике применяемых ранее критериев необходимо создавать пожарно-спасательное подразделение в каждом селе, независимо от количества зданий и размера территории. Данное утверждение сложно соотнести с объемом требуемых материальных затрат и оценкой риска возникновения пожара. Очевидна необходимость дальнейшего изучения факторов, влияющих на прибытие пожарно-спасательных подразделений для тушения пожара на начальной стадии его развития.

Анализ последних публикаций. Результаты анализа времени прибытия пожарных частей на пожары в России [1] показали, что установленные временные нормативы прибытия первого пожарного подразделения в городах в целом соблюдаются, а большой процент населенных пунктов в сельской местности не обеспечен на требуемом уровне защитой от пожаров.

Данный вывод совпадает и с результатами проведенных НИИГД «Респиратор» аналитическими исследованиями сведений о выездах пожарно-спасательных подразделений на пожары в целом по Республике.

Возникает необходимость проанализировать соответствующие нормативы зарубежных стран (см. таблицу).

**Перечень нормируемых показателей для определения мест дислокации
и количества пожарно-спасательных подразделений***

Страна	Нормируемые показатели определения мест дислокации пожарно-спасательных подразделений		Примечание
	Радиус обслуживания, км	Время прибытия	
Россия	3	-	До выхода
	-	10 мин - для городов, 20 мин – для остальных населенных пунктов	-
США	1,6	-	Для районов с очень высокой плотностью застройки
	2,4	-	Для районов с высокой плотностью застройки
	4,8 км	-	Для районов с низкой плотностью застройки
	2 км от зданий	-	При наличии зданий повышенной этажности в районе выезда пожарная часть должна располагаться на расстоянии 2 км от этих зданий
Франция	В зависимости от пожарной опасности зданий – от 1 км в центре города до 4 км в пригородах	-	При этом нормируется численность противопожарной службы в зависимости от площади обслуживания
Англия	-	5 мин – для 1-го и 2-го пожарного автомобиля, 8 мин - для третьего	Для района города с классом пожарной опасности А
		5 мин – для первого автомобиля, 8 мин – для второго	Для района города с классом пожарной опасности В
		10 мин	Для района города с классом пожарной опасности С
		20 мин	Для района города с классом пожарной опасности Д
Украина	3	Для городов 10 мин, для районов 20 мин	Радиус обслуживания от 2 до 4 км – в зависимости от категории производства

* Данные – из нормативных производственно-практических изданий.

Как видно из изложенного, в качестве нормируемых показателей для определения мест дислокации и количества пожарно-спасательных подразделений принимают радиус обслуживания или время прибытия к месту вызова первого пожарно-спасательного подразделения. Очевидно, что нормирование этих показателей базируется на аналогичных составляющих. Для расчета радиуса обслуживания необходимо знать время и скорость движения автомобиля. Для определения времени прибытия базовые расчетные величины – скорость движения автомобиля и расстояние от места выезда к месту прибытия. Радиус обслуживания и является расстоянием в виде прямой линии от места дислокации пожарного подразделения до границ выделенной территории. Разнится только принцип обоснования нормативов. Как видно из таблицы, в США радиус обслуживания определяют в зависимости от плотности застройки и наличия высотных зданий. При этом плотность застройки имеет три категории. Длина радиуса обслуживания меняется в зависимости от категории плотности застройки. Учитывая, что плотность застройки определяют путем деления суммарной площади зданий в границах их стен (с учетом площади каждого этажа) на площадь территории, необходимо отметить очевидность преимущества такого способа расчета, так как очевидна взаимосвязь охраняемой территории и пожарной нагрузки. Украина нормирует радиус 2...4 км в зависимости от пожарной опасности производства. Во Франции при определении радиуса обслуживания пожарных подразделений учитывают пожарную опасность зданий и длина радиуса варьируется от 1 км в центре города до 4 км в пригороде. Если под пожарной опасностью подразумевается пожарная нагрузка и пожарная опасность производств, то данный подход требует обработки большого количества исходных данных с помощью специальной методики расчета. Данные о наличии такой методики в информационных сетях отсутствуют. Как видно из таблицы, нормируемое время прибытия в целом колеблется от 5 до 10 мин в городе и до 20 мин за городом. Н.Н. Брушлинский в статье [2] привел результаты анализа взаимосвязи времени прибытия первого пожарного подразделения к месту пожара и количественных данных о гибели людей на пожарах и нанесенному материальному ущербу. Автор считает, что нет смысла жестко нормировать время прибытия первого пожарного подразделения до 10 мин по городу, так как приведенные выше показатели в указанное время меняются незначительно, и при соблюдении временного интервала до 10 мин степень защищенности по пожарной безопасности будет достаточно высокой. При этом автор признает, что для нормирования времени прибытия первого пожарного подразделения по сельской местности требуются дополнительные исследования.

В работе [1] отмечено, что радиус окружности предполагает определение зоны обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением в виде круга с местом дислокации пожарно-спасательного подразделения в центре круга. Как показывает анализ фактической данности, это не соблюдается не только в Воронеже, но и в Донецке. Реально зона обслуживания – неправильный

многоугольник, что приводит к пространственной неэквивалентности нагрузки пожарных частей с одинаковыми силами и средствами. При этом очевидно, что использование нормированного радиуса окружности для определения места дислокации пожарно-спасательных подразделений упрощает дальнейшие расчеты по проверке соблюдения норм прибытия первого пожарно-спасательного подразделения к месту вызова.

Анализ факторов, влияющих на количественные показатели критериев образования государственных пожарно-спасательных подразделений для определения мест их дислокации и районов обслуживания показал, что основным показателем для определения радиуса обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением является скорость движения пожарного автомобиля. Однако в нормативной литературе не приведен способ определения скорости движения пожарного автомобиля. Рекомендуют принимать скорость пожарного автомобиля 45 и 25 км/ч при движении по дорогам с твердым покрытием и по сложным дорогам соответственно, в других источниках указано 30 км/ч в городе и 60 км/ч в сельской местности. Предлагают скорость движения пожарного автомобиля V , км/ч, рассчитывать по формуле

$$V = V_{\max} C_1 C_2, \quad (1)$$

где $V_{\max}$ – максимальная скорость движения автомобиля; $V_{\max} = 45$ км/ч;

C_1 – коэффициент состояния дорог;

C_2 – коэффициент теплового режима двигателя.

Учитывая отсутствие общего подхода к определению средней скорости движения пожарного автомобиля, НИИГД «Респиратор» разработана методика определения средней скорости движения пожарного автомобиля на основании анализа сведений о выездах пожарно-спасательных подразделений к месту возникновения пожара. Для реализации поставленной задачи была разработана методика сбора и обработки сведений о выездах подчиненных пожарно-спасательных подразделений к месту пожара. В качестве информации для анализа сведений о выездах подчиненных подразделений использовать данные из журнала учета выездов ЦУКС ОДС. Ценность такой информации заключается в следующем:

- анализ скорости движения боевых пожарных автомобилей (т.е. техники, находящейся на балансе и используемой МЧС ДНР) в реальных условиях. Следовательно, полученные результаты учитывают состояние и эксплуатационные возможности техники;
- движение автомобилей происходит в реальное время по реальным дорогам. Следовательно, оказываемое на скорость движения пожарных автомобилей влияние качества дорожного покрытия, загруженности транспортной сети, нелинейности дорог и атмосферных условий (при анализе данных по выездам в осенне-зимний период) учтено. Полученные данные о

скорости движения пожарных автомобилей подлежат использованию в расчетах без применения понижающих коэффициентов, учитывающих перечисленные параметры.

Расчет скорости движения пожарного автомобиля V_i , км/ч, по каждому выезду производился по формуле

$$V_i = \frac{L_i}{T_{\text{при}} - T_{\text{ви}}}, \quad (2)$$

где L_i – расстояние от пожарной части до места i -го вызова по дорогам общего пользования, км;

$T_{\text{при}}$ – время прибытия к месту i -го вызова, ч;

$T_{\text{ви}}$ – время выезда по i -му вызову, ч.

Расстояние от пожарной части до места вызова при движении по дорогам общего пользования определяли с помощью навигатора и проверяли по электронной карте.

При расчете усредненных данных о средней скорости движения пожарного автомобиля в пределах города $V_{\text{ср.г}}$ были исключены из обрабатываемой информационной базы данные из карточек учета сведений о выездах на место вызова на расстояние менее 1 км (для повышения устойчивости полученного хроноряда).

Расчет усредненных данных по реальной скорости движения пожарного автомобиля в пределах города $V_{\text{ср.г}}$, км/ч, и от места получения сообщения о пожаре к месту вызова в сельской местности $V_{\text{ср.с}}$, км/ч, производился по формулам

$$V_{\text{ср.г}} = \frac{\sum_{i=n}^n V_{i\text{г}}}{n}, \quad (3)$$

где $V_{i\text{г}}$ – скорость пожарного автомобиля в пределах города i -го выезда;

n – количество выездов.

$$V_{\text{ср.с}} = \frac{\sum_{i=n}^n V_{i\text{с}}}{n}, \quad (4)$$

где $V_{i\text{с}}$ – скорость пожарного автомобиля от места получения сообщения о пожаре к месту вызова в сельской местности i -го выезда.

Полученные усредненные данные о скорости движения пожарного автомобиля от места получения сообщения о пожаре до места вызова в пределах города $V_{\text{ср.г}}$ и сельской местности $V_{\text{ср.с}}$, коэффициенте извилистости дорог на участках транспортной сети использовали при расчете радиуса обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением и проверке времени прибытия.

Выводы

В результате анализа базовых показателей для определения мест дислокации пожарно-спасательных подразделений сделан вывод о возможности использования в качестве критериев образования и определения мест дислокации пожарно-спасательных подразделений следующих показателей:

- радиус обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением;
- время прибытия первого подразделения к месту вызова;
- скорость движения пожарного автомобиля.

Введение норматива скорости движения пожарного автомобиля от места получения сообщения о пожаре до места вызова в черте города и в населенных пунктах сельской местности позволило выполнить расчет радиуса обслуживания одним пожарно-спасательным подразделением территории города и населенных пунктов в сельской местности.

Изучение опыта США по определению радиуса обслуживания в зависимости от плотности застройки и наличия высотных зданий перспективно и требует дальнейшего изучения.

Список литературы / References

1. Лобода, А.В. Анализ расположения подразделений пожарной охраны в городах (на примере Воронежа) / А.В. Лобода, И.А. Муконина // Вестник Воронежского ин-та ГПС МЧС России. – 2013. – Вып. 4(9). - С. 29 – 33.

Loboda, A.V., Mukonina, I.A. *Analiz raspolozheniya podrazdeleniy pozharной okhrany v gorodakh (na primere Voronezha)* [Analysis of disposition of fire prevention subdivisions in towns (in terms of Voronezh)]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of the Voronezh institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations (Russia)]. 2013, issue 4(9), pp. 29 – 33.

2. Брушлинский, Н.Н. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара / Н.Н. Брушлинский, О.В. Соколов // Пожарная безопасность. – 2011. - Т. 20, №1. - С. 42 – 48.

Brushlinskiy, N.N., Sokolov, O.V. *O normirovanii vremeni pribytiya pozharных podrazdeleniy k mestu pozhara* [On setting the time of arrival of fire prevention subdivisions to a fire place]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 42 – 48.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 12.04.2018

Dmitry Igorevich Kostyamin, chief state inspector for fire supervision; 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;
Yelena Ivanovna Dobryakova, advanced engineer; e-mail: kdom100@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) 332-78-44

BASIC PARAMETERS FOR DETERMINATION OF PLACES FOR DEPLOYMENT OF FIRE-RESCUE UNITS

Purpose. To specify the criteria for determination of places for deployment of the fire-rescue units.

Methods. Analytical investigations of the legislative basis for regulating the location of the fire-rescue subdivisions and the data about their responds to the fires.

Results. On the basis of the analysis of the normalized results to determine the places for deployment and quantity of the fire-rescue subdivisions in some countries the basic parameters have been specified including the fire truck velocity from the place of receiving the report of the fire and up to the place of the reported fire in urban locations and settlements countryside. The information about the methods of determination of the average fire truck velocity and the factor of the public roads tortuosity by way of the analysis and data processing on the responds to the fires of the fire-rescue subdivisions has been adduced, and the list of criteria for formation of the fire-rescue subdivisions has been proposed.

Scientific novelty. The information on the prospects of the use of the methods for determination of the average fire truck velocity and the ratio of the public roads non-linearity by way of the analysis and data processing on the responds to the fires of the subordinate fire-rescue subdivisions worked out by the NIIGD "Respirator" is adduced, and the list of criteria for formation of the fire-rescue subdivisions is proposed. It is stated that the previously used criteria for formation and determination of the places of deployment of the fire-rescue units have been checked with the help of the results obtained by the NIIGD "Respirator", adapted to the up-to-date conditions, and the list of the criteria has been corrected.

Practical value. The analytical investigations of the information on the fire-rescue subdivisions responds to the places of the reported fires allowed specifying the list of the criteria and the numerical indices for determination of the places of deployment of the fire-rescue units, conducting the analysis of securing the implementation of these criteria by the existing fire-rescue subdivisions to identify the places of deployment of the additional fire-rescue subdivisions.

Key words: fire; time of respond of the first fire-rescue subdivision; fire truck velocity; factor of the public roads tortuosity; deployment.

УДК 622.822.22:614.844.5

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по научной работе;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

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

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-82

ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ НА СЕТКАХ ПЕНОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Цель. Исследование особенностей конструкций сеточных пеногенераторных устройств для устойчивого получения газомеханической пены, способов подачи раствора пенообразователя и газа на сетку.

Методика. Экспериментальные исследования процесса получения газомеханической пены на вертикальных и наклонных сетках устройств.

Результаты. Определены конструктивные параметры устройства для получения газомеханической пены и опробованы способы подачи раствора пенообразователя и газа на вертикальные и наклонные сетки. Учтены недостатки сеточных пеногенераторных устройств при подаче раствора пенообразователя с механическими примесями. Устранено засорение пеногенерирующих сеток.

Научная новизна. В отличие от известных конструкций предложено подачу раствора пенообразователя и газа на наклонную пеногенерирующую сетку осуществлять с противоположных сторон, а для набрызгивания на нее раствора пенообразователя применять форсунку щелевого типа, что позволяет при генерировании пены использовать всю площадь сетки и самоочищаться ей непосредственно в процессе генерирования пены.

Практическая значимость. Возможность регулирования кратности генерируемой газомеханической пены непосредственно в процессе работы, а также применение для приготовления раствора пенообразователя воды, содержащей механические примеси.

Ключевые слова: пеногенератор; газомеханическая пена; раствор пенообразователя; пеногенерирующая сетка; форсунка; кратность пены.

Постановка проблемы. Газомеханическая пена, подаваемая в труднодоступные места по трубопроводам или скважинам малого сечения (75...100 мм), – одно из средств предупреждения, тушения и локализации эндогенных пожаров [1]. Существующие для этой цели устройства позволяют получать пену низкой кратности, что снижает эффективность её применения из-за невозможности заполнения до кровли в куполах большого объёма и размыва почвы углеспускных скатов на пластах крутого залегания угля.

Подача пены под давлением по трубопроводам и скважинам в труднодоступные места для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в шахтах осуществляется при помощи специально разработанных для этих целей сеточных устройств, в которых образование газомеханической пены происходит при набрызгивании на сетку раствора пенообразователя и одновременном продувании через нее газа [2].

Однако в этих устройствах зачастую происходит срыв процесса генерирования пены при следующих условиях:

- радиус капли раствора пенообразователя меньше полуторакратного размера ячейки пеногенерирующей сетки;
- скорость газового потока у сетки не позволяет обеспечить устойчивое образование пены и заданную скорость пенного потока.

В разработанных ранее для этих целей сеточных пеногенераторных установках и устройствах, таких, как «Экран», ВГПУ-12, УПГВ, УЛЭП-2, потоки водного раствора пенообразователя и сжатого газа поступают вместе на пеногенерирующую сетку с одной стороны.

Для улучшения качества водного раствора пенообразователя применяют стабилизирующие добавки. По техническим причинам не всегда возможно использование шахтного противопожарного трубопровода для подачи воды. Проблему водоснабжения для получения раствора пенообразователя в ряде случаев решают, используя шахтные сточные воды. Однако, когда такой раствор подают через распылитель (форсунку) на пеногенерирующую сетку, загрязняется распылитель, а стабилизирующие примеси и твердые частицы, содержащиеся в воде, налипают на сетку. Сжатый воздух, поступающий в направлении потока водного раствора пенообразователя, способствует адгезии этих частиц к пеногенерирующей сетке и не в состоянии протолкнуть их через нее. В связи с этим сетка загрязняется, уменьшается ее сечение и процесс генерирования пены прекращается. Для дальнейшего применения такого устройства сетку вынимают из кассеты, очищают от мусора и грязи, устанавливают обратно в устройство и работа по получению газомеханической пены продолжается. Очищение сетки и распылителя – операция сложная, трудоёмкая и требующая значительных затрат времени.

Анализ последних исследований. Один из недостатков использования пеногенераторов – их неустойчивая работа. По мере увеличения длины пенного потока в трубопроводах или скважинах растёт сопротивление пеногенератору, т.е. перепад давления на оросительной форсунке снижается, что приводит к уменьшению расхода и угла распыления пенообразующего раствора. При этом поверхность пеногенерирующей сетки не полностью покрывается раствором, в результате нарушается процесс пенообразования и изменяется кратность получаемой пены. При дальнейшем росте противодействия процесс пенообразования вообще прекращается. Для решения этой проблемы решено корпус между патрубком и распылителем выполнить в виде трубки Вентури (рис. 1), на выходе которой установлен подпружиненный обтекатель.

Пеногенераторная сетка свободно установлена в корпусе, но в то же время жёстко связана тягами с обтекателем. По мере роста длины пенного потока увеличивается сопротивление в трубопроводе, снижая скоростной напор газа. Соответственно снижается перепад давления, расход на распылителе и угол давления на обтекатель и сетки. При этом уменьшается усилие, действующее на обтекатель и сетки, в результате чего под действием пружины

они перемещаются в сторону распылителя, тем самым сетка снова орошается и процесс генерирования пены продолжается. Как и в предыдущих установках, набрызгивание раствора пенообразователя и подача газа на сетку происходят с одной стороны. Однако, несмотря на попытки решения задачи устойчивой работы пеногенераторов с заданной кратностью пены, она не была полностью решена.

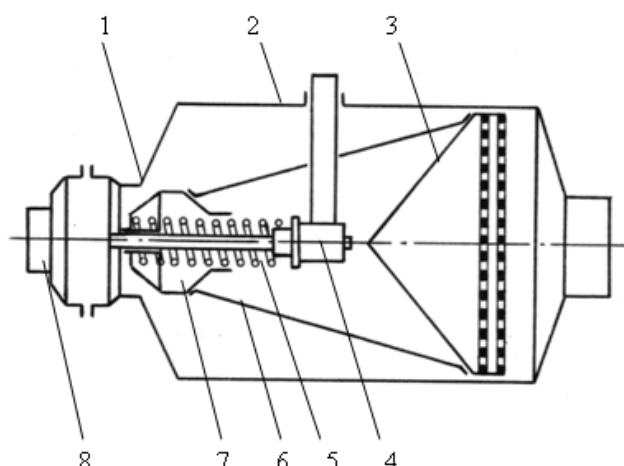


Рис. 1. Схема пеногенераторной установки УПГВ:

1 – трубка Вентури; 2 – корпус пеногенератора; 3 – сетка; 4 – распылитель;
5 – пружина; 6 – тяга; 7 – обтекатель; 8 – патрубок

Исследователи утверждают, что практика применения сеточных пеногенераторов показывает неустойчивость работы данных устройств при

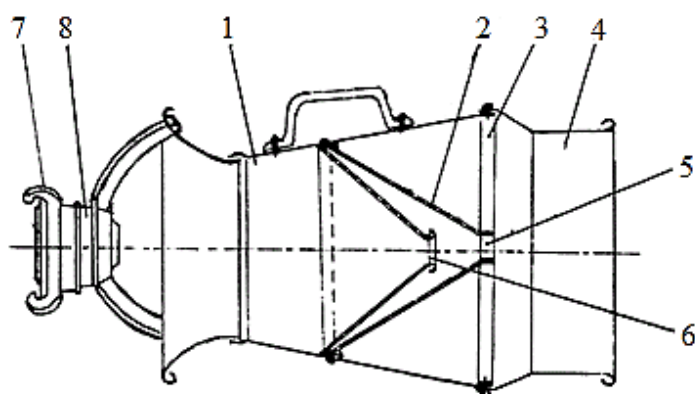


Рис. 2. Самоочищающийся пеногенератор:

1 – корпус; 2 – пакет сеток; 3 – крестовина;
4 – раструб; 5, 6 – выходные отверстия;
7 – напорно-соединительная головка;
8 – сопло-распылитель

применении неочищенной воды, содержащей ржавчину, песок и другие механические примеси [3]. При этом имеет значение размер стороны ячеек сетки и он не должен быть менее 0,8 мм. Для удаления механических примесей с пеногенерирующей сетки предложено придавать ей конусообразную форму, при этом вершину конуса располагать в сторону выхода пены (рис. 2).

Самоочищающийся пеногенератор работает следующим образом. Раствор пенообразователя через напорную соединительную

головку и сопло-распылитель поступает на пакет конических пеногенерирующих сеток, создавая в корпусе пеногенератора разрежение.

Воздух через конфузор пеногенератора устремляется в зону пониженного давления и на сетках происходит интенсивное перемешивание водного раствора пенообразователя и воздуха с образованием пенных пузырьков. Воздушно-механическая пена из корпуса пеногенератора устремляется в раструб для формирования компактного пенного потока. В случае попадания механических примесей, содержащихся в растворе пенообразователя, на сетки, они будут смываться этим раствором по ходу движения пены и выбрасываться наружу ее потоком через выходные отверстия.

Также в процессе подачи газомеханической пены к очагу пожара необходимо регулировать кратность пены путем изменения площади выходного отверстия подачи раствора пенообразователя на сетку.

Разработчиками представлен пеногенератор с распределителем потока подаваемого на сетку раствора пенообразователя [4]. Подача раствора пенообразователя осуществляется через узел подсоединения к напорной линии (рис. 3). При выходе раствора пенообразователя из распылителя одна его часть направляется и распыляется на периферии кассеты сеток, имеющей большую площадь, вследствие этого теряет скорость и образует на сетках пену более высокой кратности, чем меньшая часть потока, которая поступает на центральную часть кассеты сеток через центральное осевое отверстие распределителя потока в виде сплошной струи, распыляется на меньшей площади и образует пену меньшей кратности. Возможность осевого перемещения насадка, прилегающего к срезу щелевого отверстия для подачи потока, повышает эффективность пеногенератора, появляется возможность изменения угла распыления струи потока, подающегося через зазор, а тем самым и регулирования кратности пены.

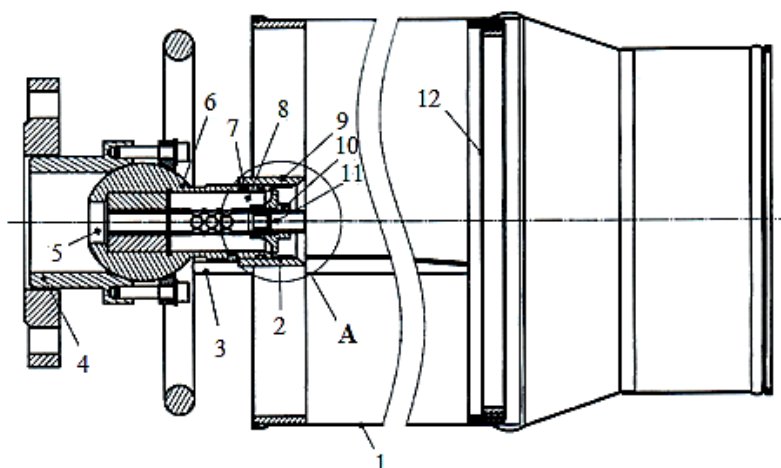


Рис. 3. Пеногенератор:

- 1 – корпус; 2 – вставка; 3 – стойка; 4 – узел подсоединения к напорной линии; 5 – отверстие для связи с узлом подсоединения к напорной линии; 6 – корпус распылителя; 7 – винтовая канавка; 8 – отверстие для подачи раствора пенообразователя на кассету пенообразующих сеток; 9 – насадок; 10 – распределитель потока; 11 – сквозное продольное отверстие; 12 – кассета пенообразующих сеток

В результате изучения существующих устройств выявлен ряд существенных недостатков в получении и транспортировании газомеханической пены. Практика проектирования пеногенераторных устройств свидетельствует о том, что наибольшую трудность представляет проектирование узла, в котором осуществляется непосредственный контакт раствора пенообразователя и газового потока. В сеточных пеногенераторах таким узлом является пакет пеногенирующих сеток. Все существующие в настоящее время пеногенераторы способны использовать только очищенную воду, подаваемую из шахтного противопожарного трубопровода и не содержащую механических примесей.

Цель статьи – анализ конструктивных особенностей сеточных пеногенераторных установок и устройств, позволяющих обеспечивать устойчивое образование газомеханической пены и исключающих срыв процесса пеногенерации.

Результаты исследований. Для устранения вышеприведенных недостатков сеточных пеногенераторных устройств был изготовлен экспериментальный стенд устройства для исследования процесса получения газомеханической пены.

Первая серия экспериментов проведена по классической схеме получения газомеханической пены, когда на сетку поступает газ и раствор пенообразователя с одной стороны. Пеногенирующая сетка расположена перпендикулярно к направлению движения раствора пенообразователя и газа. При такой схеме существуют ограничения при получении пены, которые отразились на параметрах классического трубного сеточного пеногенератора (максимальная производительность по пене 5 м³/мин при максимальном давлении 0,5 МПа) [5]. В данном случае потери раствора пенообразователя возникают в связи с тем, что капли раствора диаметром меньше размера стороны пеногенирующей сетки не участвуют в процессе пенообразования. Установлены недостатки данной схемы получения газомеханической пены:

- потери раствора пенообразователя. Капли набрызгиваемого на сетку раствора пенообразователя, диаметр которых меньше размера стороны ячейки пеногенирующей сетки, не участвуют в процессе пенообразования и уходят вместе с пенным потоком;
- засорение ячеек пеногенирующей сетки при использовании шахтной неочищенной воды для приготовления раствора пенообразователя и прекращение процесса пеногенерации. Применение стабилизирующих добавок, в частности бентонитовой глины, также приводит к засорению пеногенирующей сетки и невозможности получения пены.

Вторая серия экспериментов проводилась также по классической схеме, но с наклоном пеногенирующей сетки к поверхности корпуса пеногенераторной установки. Наклон сетки к направлению потока раствора пенообразователя определялся расчётным путём и подтвердился экспериментами. Серия экспериментов проводилась на стенде для сетки,

наклоненной под углом 45, 30, 25, 20 и 15°. Оптимальный угол наклона сетки к потоку 20°. В этих условиях для движущейся капли раствора пенообразователя ячейка сетки является в вертикальной проекции квадратом, размер которого стремится к нулю, а поверхность сетки в проекции к движущейся капле есть гладкая поверхность. В этом случае сетка для любого размера капель является гладкой поверхностью, по которой капля растекается и образует плёнку на ячейке. Потери раствора пенообразователя в данном случае сведены к минимуму.

Кроме того, в данной серии также проводились экспериментальные исследования с добавлением в раствор пенообразователя стабилизирующих добавок (бентонитовой глины) и других механических примесей.

Недостатком данной схемы получения газомеханической сетки является засорение пеногенерирующей сетки, как и при классической схеме, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что часть механических примесей, содержащихся в растворе пенообразователя, удаляется с сетки за счёт её наклона к направлению потока газа и раствора пенообразователя.

В первой и во второй сериях экспериментов для набрызгивания раствора пенообразователя на сетку применяли серийно выпускаемые форсунки зонтичного и конусного типов. Применение в растворе пенообразователя стабилизирующих добавок и механических примесей приводит к их засорению наряду с пеногенерирующей сеткой.

Условия формирования пены и ограничения скорости газового потока, обеспечивающие устойчивый режим формирования пены при подаче пенообразователя на вертикальные сетки, для отдельной её ячейки были исследованы НИИГД «Респиратор». Однако для наклонных сеток необходимо знать поля скоростей, давлений и концентрации раствора пенообразователя в поперечных и в продольных сечениях корпуса пеногенератора [6]. В данных исследованиях, в ходе разработки конструкции устройства, с целью увеличения площади сетки, омываемой пенообразователем, принято решение о переходе от плоской формы сетки к вытянутой, конусообразной поверхности с подачей пенообразователя с вершины сетки внутрь её объёма. Так как площадь классической плоской сетки равна

$$S = \frac{1}{4} \pi D^2, \quad (1)$$

где D – диаметр трубопровода, м,

а площадь конусообразной сетки

$$\tilde{S} = \frac{1}{4} \pi D^2 \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad (2)$$

где α – угол наклона образующей поверхности сетки к стенкам трубопровода, ...°,

то соотношение площадей s равно

$$s = \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (3)$$

При $\alpha \rightarrow \pi/2$ $s \rightarrow 1$, а при $\alpha \rightarrow 0$ $s \rightarrow \infty$, выигрыш в площади очевиден с уменьшением угла наклона. Однако по мере уменьшения угла наклона увеличивается протяженность сетки и после определённого предела рабочая часть будет ограничена дальностью подачи пенообразователя. Кроме того, эта конструкция повысит аэродинамическое сопротивление поверхности сетки газовому потоку. С другой стороны, по технологическим причинам угол наклона сетки не должен превышать угол раскрытия струи пенообразователя из форсунки. Для выбора оптимального угла наклона были выполнены исследования процесса истечения дисперсной струи в ограниченное пространство, заполненное газом высокого давления.

Принимается, что струя пенообразователя, истекающая из форсунки – кольцевая и симметричная относительно геометрической оси корпуса пеногенерирующего устройства. Вводится продольная координата x , м, по направлению потока пенообразователя, отсчитываемая от конечного сечения клапана, и поперечная y , м, отсчитываемая от оси x в радиальном направлении (рис. 4).

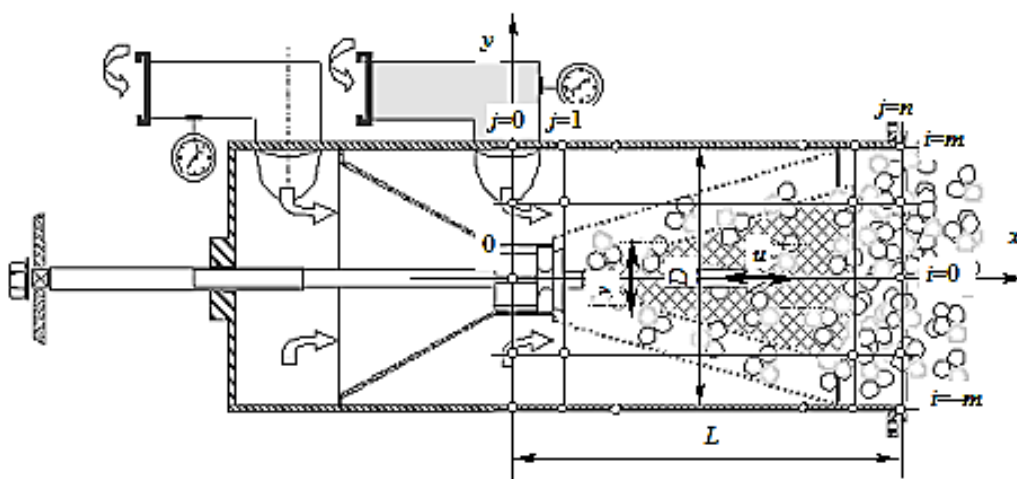


Рис. 4. Расчётная схема для моделирования процесса работы пеногенератора

Перенос количества движения и массы раствора пенообразователя и газа моделируются уравнением обобщённого вида

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = I, \quad (4)$$

где τ – время, с;

ρ – плотность пенообразователя и газа, кг/м³;

J_x, J_y – суммарные конвективно-диффузионные потоки массы или количества движения, размерность которых зависит от вида переносимой субстанции;

Φ – физическая переменная (скорость и плотность газа и пенообразователя, концентрация пенообразователя и т.д.);

I – импульс, размерность которого зависит от вида переносимой субстанции.

В частности, в двумерной постановке, на основании уравнения (4), для составляющих скоростей его движения по x : $\Phi = u$, м/с, и по y : $\Phi = v$, м/с, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho u^2 - \mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + I_x; \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v^2 - \mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + I_y, \end{cases} \quad (5)$$

где P – давление, Па;

I_x, I_y – импульс тяги (движения), Н/м³.

Ввиду высокого напора источников подачи раствора пенообразователя и газа длительность переходных процессов незначительна. Кроме того, представляет интерес предельный, установившийся режим работы пеногенератора, который он может обеспечить в зависимости от качества изготовления вспомогательных узлов, давления, концентрации раствора пенообразователя внутри корпуса и, соответственно, производительности и дальности подачи пены. Поэтому рассматривалась задача в стационарной постановке при установившемся процессе генерации пены. Особенностью моделирования плоского истечения кольцевой струи в данных условиях являются граничные условия на поверхности сетки, где продольные и поперечные составляющие скорости и градиенты давления равны нулю.

Такие граничные условия позволяют моделировать множество вариантов процесса подачи газа и раствора пенообразователя внутрь оболочки пеногенератора (противонаправленно, сонаправленно, под углом) при различном расположении сетки в пределах объёма устройства и в зависимости от его геометрических размеров и давления в трубопроводной части.

На основании результатов теоретических исследований предложена технологическая схема получения пены, которая предусматривает подачу раствора пенообразователя и газа с разных сторон пеногенирующей сетки [7], расположенной под углом к направлению движения раствора пенообразователя и газа.

Ранее выполнены экспериментальные исследования получения газомеханической пены с использованием шахтной неочищенной воды, содержащей механические примеси с добавлением бентонитовой глины. Попадающие на поверхность пеногенерирующей сетки примеси сдуваются потоком, идущим с противоположной стороны сетки, а её наклон к корпусу пеногенератора исключает засорение. За счёт наклона пеногенерирующей сетки увеличилась её поверхность, что позволило более рационально использовать раствор пенообразователя. Для исключения засорения форсунки разработана принципиально новая её конструкция – кольцевого типа. Изменение размера кольцевой щели позволяет регулировать расход раствора пенообразователя непосредственно на установке, а при использовании стабилизирующих добавок не наблюдалось случаев её засорения.

На первом этапе испытания разрабатываемого пеногенератора проводили с использованием одной пеногенерирующей сетки в виде конуса со срезанной вершиной [8]. Благодаря направленному разбрызгиванию раствора пенообразователя через кольцевую форсунку используется вся площадь конусной пеногенерирующей сетки, а потери раствора сведены к минимуму. Серией экспериментальных исследований установлен оптимальный угол наклона пеногенерирующей сетки к продольной оси корпуса пеногенератора, который равен 20° .

При подаче расчётного количества газа и раствора пенообразователя кратность получаемой газомеханической пены была выше, чем предполагалось. Результаты проведенных исследований показали, что часть раствора пенообразователя не участвовала в процессе пеногенерации и уходила вместе с потоком пены. Для исключения потерь пенообразователя был применён пакет из двух пеногенерирующих сеток (рис. 5, 6).

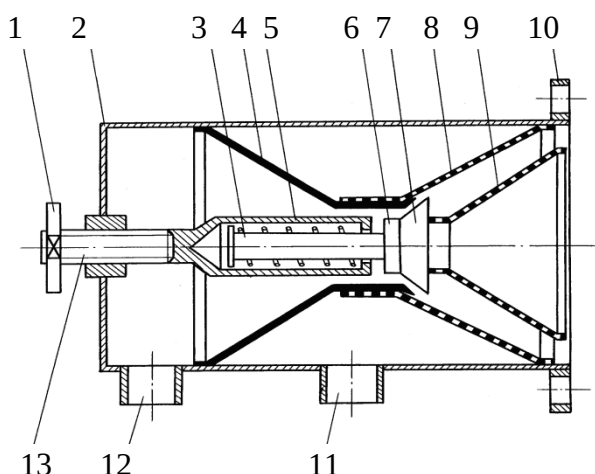


Рис. 5. Схема устройства для получения газомеханической пены:

1 – рукоятка; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – разделитель потоков; 5 – втулка; 6 – распылитель;
7 – запорный элемент; 8, 9 – сетки; 10 – фланец; 11, 12 – штуцера; 13 – винт

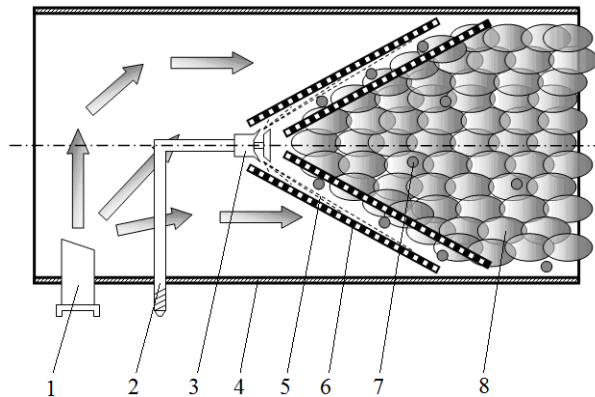


Рис. 6. Схема подачи газа и раствора пенообразователя на сетку с противоположных сторон:

- 1 – патрубок для подвода газа; 2 – патрубок для подвода раствора пенообразователя;
 3 – форсунка; 4 – корпус; 5 – раствор пенообразователя; 6 – пенегенерирующая сетка;
 7 – раствор пенообразователя, не участвующий в процессе пеногенерации;
 8 – газомеханическая пена

Данный пакет сеток конструктивно выполнен таким образом, что расположение внутренней сетки позволило свести к минимуму потери раствора пенообразователя. Механические примеси, содержащиеся в растворе пенообразователя, удаляются с пенегенерирующих сеток напором газа в поток пены, соответственно не происходит срыва процесса пеногенерации и, что важно, не изменяется выбранная кратность газомеханической пены.

Выводы. Результаты ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований показали, что при работе пенегенератора высоконапорного трубного [9] не наблюдается отклонений: заранее выбранная кратность пены соответствует генерируемой; не происходит срыва процесса пеногенерации; кратность пены можно изменять непосредственно в процессе работы установки; для приготовления и использования раствора пенообразователя можно использовать воду, содержащую механические примеси.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye vorposy bor'by s samovozgoraniyem uglya: sb. nauch. tr.* [Actual questions of fighting the spontaneous combustion of coal: collected scientific papers]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

2. Пашковский, П.С. Особенности процесса пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха / Научный вестник НИИГД

«Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1 (53). – С. 58 – 64.

Pashkovskiy, P.S. *Osobennosti protsessa penoobrazovaniya v generatorakh s prinuditel'noy podachey vozdukha* [Peculiarities of the foaming process in generators with the forced air supply]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 58 – 64.

3. Самоочищающийся пеногенератор: пат. 17435 Рос. Федерация; МПК А 62 С 5/02 / В.П. Демин, В.П. Доценко, Д.Д. Кашеваров, В.Ф. Сапогов. – № 2000126228/20; заявл. 17.10.2000; опубл. 10.04.2001. Бюл. № 10.

Dyomin, V.P., Dotsenko, V.P., Kashevarov, D.D., Sapogov, V.F. *Samoochishchayushchiysya penogenerator* [Self-cleaning foam generator]. Patent RF, no. 17435, 2000.

4. Пеногенератор: пат. 133743 Рос. Федерация; МПК А 62 С 5/02 / Е.Д. Веселов, С.А. Панов, И.Г. Романов. – № 2013125660/12; заявл. 03.06.2013; опубл. 27.10.2013. Бюл. № 30.

Veselov, Ye.D., Panov, S.A., Romanov, I.G. *Penogenerator* [Foam generator]. Patent RF, no. 133743, 2013.

5. Пашковский, П.С. Автоматическое регулирование кратности пены / П.С. Пашковский, В.П. Засевский, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 26 – 30.

Pashkovskiy, P.S., Zasevskiy, V.P., Yaremchuk, M.A. *Avtomaticheskoye regulirovaniye kratnosti peny* [Automatic regulation of the foam expansion ratio]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2000, pp. 26 – 30.

6. Момот, Д.И. Моделирование процесса получения газомеханической пены на сетках / Д.И. Момот // Материалы X Междунар. конф.: сб. науч. тр. / ПГУ. – Тирасполь, 2017. – С. 149 – 152.

Momot, D.I. *Modelirovaniye protsessa polucheniya gasomekhanicheskoy peny na setkakh* [Simulation of the process of generation of the gas-mechanical foam on nets]. *Materialy X Mezhdunarodnoy konferentsii: sb. nauch. tr.* [Materials of the 10th International conference: collected scientific papers]. PGU, Tiraspol, 2017, pp. 149 – 152.

7. Момот, Д.И. Обоснование конструктивных параметров пеногенератора высоконапорного трубного / Д.И. Момот // Пожежна безпека: зб. наук. праць / ЛПБ. – Львів, 2005. – № 7. – С. 78 – 84.

Momot, D.I. *Obosnovaniye konstruktivnykh parametrov penogeneratora napornogo trubnogo* [Substantiation of design parameters of a high-pressure pipe foam generator]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats'* [Fire safety: collected scientific papers]. LIPB, Lviv, 2005, no. 7, pp. 78 – 84.

8. Попов, Э.А. Экспериментальные исследования получения пены в трубных сеточных пеногенераторах / Э.А. Попов, Д.И. Момот // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: сб. науч. тр. – Донецк, 2003. – С. 38 – 41.

Popov, E.A., Momot, D.I. *Eksperimental'nyye issledovaniya polucheniya peny v trubnykh setochnykh penogeneratorakh* [Experimental investigations of foam

generation in pipe net foam generators]. *Sovershenstvovaniye tekhnologii stroitel'stva shakht i podzemnykh sooruzheniy: sb. nauchn. tr.* [Improvement of the technology of mines and underground structures construction: collected scientific papers]. Donetsk, "Nord-Press" Publ., 2003, pp. 38 – 41.

9. Пристрій для одержання газомеханічної піни: пат. 61615 Україна; МПК⁷ А62 С 5/02, Е21 F 5/02 / Е.О. Попов, П.С. Пашковський, Д.І. Момот. – № 2003032316; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9.

Popov, E.O., Pashkovs'kyi, P.S., Momot, D.I. *Prystrii dlia oderzhannia gazomekhanichnoi piny* [Device for generation of the gas-mechanical foam]. Patent Ukraine, no. 61615, 2003.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 18.04.2018

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Dmitry Ivanovich Momot, scientific associate; e-mail: obep.niigd@list.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-82

GENERATION OF A GAS-MECHANICAL FOAM ON NETS OF FOAM GENERATOR DEVICES

Purpose. Investigation of peculiarities of constructions of the net foam generator devices for stable production of the gas-mechanical foam and methods of feeding the foaming agent solution and gas on the net.

Methods. Experimental researches of the process of generation of the gas-mechanical foam on vertical and inclined nets of the devices.

Results. The constructive parameters of the device for generation of the gas-mechanical foam have been determined, and the methods of feeding the foaming agent solution and gas on the vertical and inclined nets have been tested. The shortcomings of the net foam generator devices by feed of the foaming agent solution have been taken into account. The clogging of the foam generating nets has been eliminated.

Scientific novelty. As distinct from the known constructions it is proposed to feed the foaming agent solution and gas onto the inclined foam generating net from the opposite sides and to use a slit sprayer for splashing the foaming agent solution on it what permits to use the whole net area for foam generating and to self-purify it directly in the process of foam generating.

Practical value. The possibility to regulate the foam expansion ratio of the generated gas-mechanical foam directly in the process of operation as well as to use water containing mechanical impurities for preparation of the foam generating agent solution.

Key words: foam generator; gas-mechanical foam; foaming agent solution; foam generating net; nozzle; foam expansion ratio.

УДК [622.868:622.411.3]:[62:543.27.05]-519*Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;**Александр Владиславович Агарков, инж. I кат.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru;**Владимир Владимирович Захлебн, инж. I кат.; e-mail: avarvent@mail.ru**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

ДИСТАНЦИОННЫЙ ОТБОР ПРОБ ШАХТНОГО ВОЗДУХА ИЗ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОЖАРНЫХ УЧАСТКОВ

Цель. Оценка возможности и обоснование основных параметров дистанционного отбора проб воздуха из изолированных пожарных участков на большом расстоянии с целью получения достоверных данных о газовой обстановке.

Методика. Исследование возможности эффективного применения системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха из изолированных пожарных участков на большом расстоянии, обработка специальных литературных источников.

Результаты. Проведен анализ условий для применения системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха из изолированных участков, анализ осложнений и недостатков, сказывающихся на объективности проб воздуха при их отборе на значительном расстоянии. Дана оценка существующему на сегодняшний день способу дистанционного отбора проб шахтного воздуха в изолированных пожарных участках. Предложены пути совершенствования системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха.

Научная новизна. Установлена зависимость достоверности газовой воздушной пробы от длины и диаметра трубопровода, скорости воздушного потока, предложены соответствующие расчетные формулы. Определен материал, из которого следует изготавливать трубопровод для дистанционного отбора проб с целью исключения недопустимой газопроницаемости.

Практическая значимость. Полученные результаты следует использовать при разработке рекомендаций по дистанционному отбору проб воздуха из изолированных пожарных участков с целью дальнейшего их использования подразделениями Государственной военизированной горноспасательной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики при ликвидации аварий в угольных шахтах.

Ключевые слова: угольная шахта; дистанционный отбор проб; шахтный воздух; изолированный пожарный участок; трубопровод для отбора проб шахтного воздуха.

Постановка проблемы. Угольная промышленность – одна из ключевых отраслей народного хозяйства [1], однако при постоянном повышении уровня промышленной безопасности и противопожарной защиты на горных предприятиях пожары остаются одним из наиболее распространенных видов аварий в шахтах, при ликвидации которых возникают условия, опасные для жизни работников шахт и горноспасателей. Особую опасность представляют пожары в газообильных шахтах, так как их ликвидация сопряжена с возможностью взрыва метановоздушной смеси, в частности – при изоляции пожарных участков [2, 3]. Нахождение людей на аварийном участке вблизи

изолирующих вентиляционных сооружений связано с большим риском, следовательно, отбор проб воздуха из аварийного участка необходимо производить дистанционно, когда горноспасательные отделения находятся на дальних подступах к очагу пожара.

В связи с этим актуально установление возможности эффективного отбора проб воздуха дистанционным способом из изолированных участков на значительном расстоянии, а также факторов, влияющих на получение достоверных данных о газовой обстановке на аварийном участке при использовании такого способа.

Состояние вопроса. Исследованиям по разработке техники и технологии дистанционного отбора проб воздуха из аварийных участков угольных шахт посвящены научные труды И.Н. Зинченко, И.Е. Болбата, В.И. Лебедева, В.И. Ляшенко, А.А. Гурина, А.А. Лапшина, А.С. Голика и др. В работах [4, 5] представлены результаты внедрения электронных датчиков и прочих устройств для ведения контроля за составом пожарных газов и температуры, и передачи этих данных по линиям беспроводной связи на большие расстояния. Однако это дорогостоящее мероприятие и в случае аварии данное оборудование может выйти из строя, что при ликвидации аварий недопустимо. Также необходимо иметь в штате высококвалифицированных специалистов, которые обслуживали бы данную аппаратуру, проводили пусконаладочные работы, техническое обслуживание и ремонт.

Таким образом, совершенствование технологии дистанционного отбора проб воздуха из изолированных пожарных участков угольных шахт на значительном расстоянии – актуальное направление исследования.

Результаты исследования. Система дистанционного контроля состава шахтного воздуха заключается в отборе проб газозооушной смеси из изолированного пожарного участка по специально проложенному трубопроводу с последующим их анализом на газоаналитической аппаратуре. Состоит данная система из побудителя расхода (вакуумметрического насоса или эжектора), пробоотборного трубопровода (газовой магистрали), а также вспомогательных приспособлений и инструментов.

При выборе трубопровода для дистанционного отбора проб воздуха необходимо учитывать зависимость интервала времени между началом взятия пробы от длины, внутреннего диаметра газовой магистрали и расхода воздуха. Интервал определяют по формуле

$$T = 0,00314 \frac{d^2 L_{\text{тр}}}{V}, \quad (1)$$

где T – интервал времени прокачивания газовой магистрали, мин;
 d – диаметр трубопровода, мм;
 $L_{\text{тр}}$ – длина трубопровода, м;

V – расход воздуха через газовую магистраль, м³/мин.

Перед отбором необходимо предварительное продувание трубки исследуемым воздухом в количестве, превышающем один объем трубопровода. Продолжительность продувания следует определять по формуле

$$t_{\text{прод}} = L_{\text{тр}} / V_0, \quad (2)$$

где $t_{\text{прод}}$ – продолжительность продувания трубопровода, мин;

V_0 – средняя скорость потока в трубопроводе, м/мин.

При этом чем меньше протяженность трубопровода и больше скорость потока, тем выше достоверность пробы.

В гидродинамике различают два вида течения жидкостей и газов: ламинарное и турбулентное, – каждый из которых характеризуется определенными пределами значений безразмерной зависимости

$$Re = Vd / \nu, \quad (3)$$

где Re – число Рейнольдса;

V – скорость движения воздуха в трубопроводе, м/с;

ν – кинематическая вязкость газа, м²/с.

Установлено, что ламинарный режим движения воздуха сохраняется при значении числа Рейнольдса до 2320. Если принять значение кинематической вязкости для воздуха $14,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с, то из формулы (3) получим выражение, по которому можно определить скорость перехода ламинарного режима в турбулентный:

$$V = \frac{33,5 \cdot 10^{-3}}{d}. \quad (4)$$

Результаты вычислений, выполненных по формуле (4), приведены ниже:

$d, \text{ мм}$	30	25	20	15	12	10	8	5	3
$V, \text{ м/с}$	1,11	1,34	1,67	2,23	2,80	3,35	4,20	6,70	11,10

Согласно приведенным данным ламинарный режим движения воздуха в трубопроводах малого диаметра сохраняется при скорости менее 4,2 м/с. Соответственно, применяемые побудители расхода создают в них значительно меньшую скорость. Следовательно, в трубопроводах малого диаметра встречается, как правило, ламинарный режим движения воздуха.

В гидравлике при расчетах трубопроводов используют уравнение

$$p_1 - p_2 = \lambda \frac{V^2}{2} \frac{\rho L_{\text{тр}}}{d}, \quad (5)$$

где p_1, p_2 – давление газа в начале и конце трубопровода, МПа;
 λ – коэффициент сопротивления;
 V – средняя по сечению трубы скорость движения газа, м/с;
 ρ – плотность газа, кг/м³.

При ламинарном режиме движения газа коэффициент сопротивления равен

$$\lambda = 64 / \text{Re}. \quad (6)$$

С учетом формулы (3)

$$\lambda = \frac{64\nu}{Vd}. \quad (7)$$

Подставив в формулу (5) выражение (7), получим

$$p_1 - p_2 = 32 \frac{\nu \rho L_{\text{тр}}}{d^2} V. \quad (8)$$

Умножим числитель и знаменатель в выражении (8) на одну и ту же величину $\pi d^2 / 4$, и, учитывая, что $V \frac{\pi d^2}{4} = Q$, получим

$$p_1 - p_2 = 128 \frac{\nu \rho}{\pi} \frac{L_{\text{тр}} Q}{d^4}. \quad (9)$$

Обозначив $128 \frac{\nu \rho}{\pi} = k$, формулу (9) можно представить в следующем виде:

$$p_1 - p_2 = k \frac{L_{\text{тр}} Q}{d^4}, \quad (10)$$

где $k = 1,23 \cdot 10^{-9}$.

Из уравнения (10) получим, что расход воздуха в трубопроводе равен

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)d^4}{kL_{\text{тр}}}. \quad (11)$$

Формулой (11) можно пользоваться в случаях, когда потеря напора изменяется в небольших пределах (при пологой напорной характеристике). Напорная характеристика большинства побудителей расхода описывается выражением

$$h = A + BQ + CQ^2. \quad (12)$$

Приравняв правые части уравнений (10) и (12) после преобразований, получим

$$Q = \frac{kL_{\text{тр}}/d^4 - a - \sqrt{(a - kL_{\text{тр}}/d^4)^2 - 4bH_0}}{2b}. \quad (13)$$

Пользуясь полученной зависимостью, проанализируем влияние диаметра трубопровода на расход воздуха в нем. Рассмотрим случаи, когда побудителем расхода служит эжектор, характеристика которого, полученная экспериментальным путем, описывается уравнением

$$p_1 - p_2 = 1020 - 6,8Q - 13,6Q^2, \quad (14)$$

где Q – расход воздуха в трубопроводе, м³/мин.

Результаты вычислений представлены в виде графиков (рис. 1). На каждой кривой можно выделить три участка. На первом участке, расположенном в левой части графика (с внутренним диаметром трубопровода менее 4 мм), расходы воздуха весьма незначительны и с увеличением диаметра растут медленно. На втором участке (с диаметром трубопровода от 4 до 15 мм) при увеличении диаметра трубопровода наблюдается резкое увеличение расхода воздуха. Так, для трубопровода длиной 200 м (кривая 1) увеличение диаметра с 5 до 8 мм приводит к росту расхода воздуха с 39 до 105 см³/с. На третьем участке (с диаметром трубопровода более 15 мм) расход воздуха остается постоянным (примерно 140 см³/с) и не зависит от диаметра трубопровода. Характерно, что на этом участке расход воздуха не изменяется при увеличении длины трубопровода. Точка на кривой, начиная с которой расход воздуха в трубопроводе перестает зависеть от его параметров, является критической (точка А). Этой точке соответствует критический диаметр трубопровода. В рассматриваемом случае он равен 15 мм.

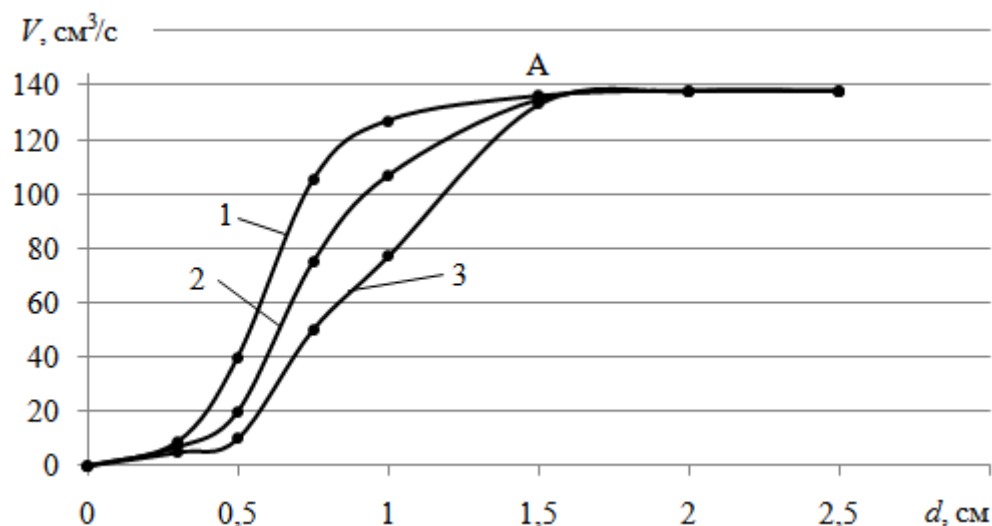


Рис. 1. Зависимость расхода воздуха в трубопроводе от его внутреннего диаметра при длине:

1 – 200 м; 2 – 500 м; 3 – 1000 м

Таким образом, существует предельный (критический) расход воздуха, превысить который невозможно при заданном побудителе расхода. В этом случае увеличение диаметра трубопровода приведет лишь к увеличению габаритов, массы и, следовательно, стоимости установки для дистанционного отбора проб.

Скорость движения газа в трубопроводе можно определить по формуле

$$V = Q / S. \quad (15)$$

Раскрывая значения Q из формулы (13), получим

$$V = 0,637 \left[\frac{kL_{\text{тр}} / d^4 - a - \sqrt{(a - kL_{\text{тр}} / d^4)^2 - 4bH_0}}{bd^2} \right]. \quad (16)$$

Если при определении коэффициентов a , b и k расход выражали в литрах в минуту, то скорость движения воздуха в трубопроводе определяем по формуле

$$V = 10,6 \cdot 10^{-6} \frac{kL_{\text{тр}} / d^4 - a - \sqrt{(a - kL_{\text{тр}} / d^4)^2 - 4bH_0}}{bd^2}. \quad (17)$$

Анализ полученной формулы показывает, что с ростом диаметра трубопровода скорость движения газа в нем сначала возрастает, а затем опять убывает. Постоянным побудителем расхода служил эжектор, напорная характеристика которого описана уравнением (14).

Из рис. 2 видно, что при изменении внутреннего диаметра трубопровода с 3 до 7 мм скорость движения воздуха в нем увеличивается примерно в 4...5 раз. Это можно объяснить резким уменьшением сопротивления трубопровода. Максимальная скорость наблюдается при диаметре трубопровода 7...9 мм, причем первое значение соответствует длине трубопровода 200 м, второе 1000 м.

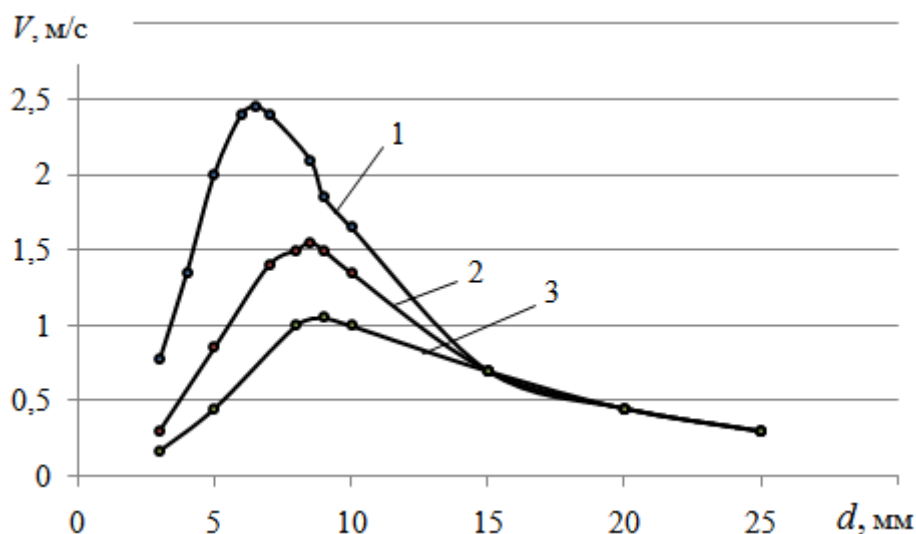


Рис. 2. Зависимость скорости движения воздуха в трубопроводе от его внутреннего диаметра при длине трубопровода:

1 – 200 м; 2 – 500 м; 3 – 1000 м

Дальнейшее увеличение диаметра трубопровода приводит к снижению скорости движения воздуха. Так, при длине трубопровода 200 м увеличение его диаметра с 7 до 15 мм вызывает уменьшение скорости в 3 раза (с 2,4 до 0,7 м/с). Характерно, что в интервале $l = 20...25$ мм скорость не зависит от длины трубопровода. Уменьшение скорости движения воздуха в трубопроводе при увеличении его диаметра объясняется аэродинамическими качествами напорной характеристики эжектора. Соответственно, увеличивать диаметр трубопровода не всегда целесообразно. Для каждого случая существует оптимальное значение, зависящее от длины трубопровода и от параметров побудителя расхода. Так, при длине трубопровода 200 м максимальная скорость наблюдается при диаметре трубопровода 6,5 мм, при длине 500 м 8 мм, при длине 1000 м 9,5 мм.

Чтобы переместить некоторый объем газоздушной смеси из изолированного участка к месту отбора пробы требуется время. Поэтому отбирают пробы из изолированного участка с некоторым запаздыванием, определяемым длиной трубопровода и скоростью перемещения в нем смеси:

$$t_{\text{зап}} = L_{\text{тр}} / V. \quad (18)$$

Используя данные, приведенные на рис. 2, можно сделать вывод, что с ростом диаметра трубопровода время запаздывания сначала уменьшается, а затем опять возрастает. Максимальному значению скорости соответствует минимальное время запаздывания.

Вышеприведенные зависимости получены из предположения, что трубопровод является прямолинейным и имеет постоянное сечение. На практике для дистанционного отбора проб применяют трубопроводы, недостатком которых является то, что при длительном хранении они деформируются. После прокладки такой трубопровод имеет деформированный вид. Вследствие этого фактический расход воздуха в трубопроводе будет меньше, чем полученный при расчете по формуле (13). Это же относится и к формуле (16). Поэтому в указанные зависимости необходимо ввести поправочные коэффициенты. Дополнительные сопротивления, возникающие вследствие изменения направления потока газа, при расчетах трубопроводов следует учитывать по формуле

$$h_{\text{м}} = \xi \frac{V^2}{2g} \gamma, \quad (19)$$

где $h_{\text{м}}$ – потери напора на местные сопротивления, Па;
 ξ – коэффициент местного сопротивления;
 V – скорость движения газа, м/с;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 γ – плотность газа, кг/м³.

При дистанционном отборе проб воздуха и их анализе также неизбежны погрешности, вызванные отсутствием герметичности дистанционного трубопровода. Обусловлено это газопроницаемостью материала, из которого он изготовлен, и подсосом воздуха в местах соединения трубок.

В ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наиболее низкой газопроницаемостью обладают трубки, изготовленные из черной вакуумной резины. С целью исключения подсосов воздуха в местах соединения отдельные части гибкого шланга следует соединять с помощью металлических трубок длиной 60...70 мм, внутренний диаметр которых должен быть не менее диаметра резиновой трубки.

Установлено, что для длины трубопровода 100 м оптимальным является диаметр 8 мм, для 200 м – 9 мм, для 500 м – 12 мм, для 1000 м – 14 мм. Однако с ростом диаметра трубопровода увеличивается его масса и стоимость, а также возрастает трудоемкость работ по монтажу. Учитывая это, для работы целесообразно применять трубопровод с меньшим диаметром, чем

оптимальный. При этом можно увеличить время прокачивания пробы на 10 %. Соответственно при расстоянии до 100 м рекомендуется применять трубопровод диаметром 5 мм, при 200 м 6...7 мм, при 500 м 8 мм, при 1000 м 10...12 мм.

Выводы. Использование системы дистанционного отбора проб позволяет с определенной достоверностью оценить газовый режим изолированного участка по результатам анализа отобранных проб шахтного воздуха, и на основании анализа этих данных своевременно определить тактику ведения горноспасательных работ для безопасной и эффективной ликвидации аварии.

Список литературы / References

1. Павленко, И.И. Об уровне инвестиций в угольную отрасль / И. И. Павленко // Экономика пром-сти. – 2006. – № 4(35). – С. 121 – 126.

Pavlenko, I.I. *Ob urovne investitsiy v ugol'nyyu otrasl'* [On the level of investment of capital into the coal branch]. *Ekonomika promyshlennosti – Industrial economics*, 2006, no. 4(35), pp. 121 – 126.

2. Пашковский, П.С. Проветривание шахт при подземных пожарах / П.С. Пашковский, В.И. Лебедев. – Донецк: Арпи, 2012. – 448 с.

Pashkovskiy, P.S., Lebedev, V.I. *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Mine ventilation by underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 448 p.

3. Пашковский, П.С. Тушение изолированных подземных пожаров // Уголь Украины. – 2001. – № 6. – С. 34 – 36.

Pashkovskiy, P.S. *Tusheniye izolirovannykh podzemnykh pozharov* [Extinguishing the isolated underground fires]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2001, no. 6, pp. 34 – 36.

4. Ляшенко, В.И. Новые технологии и технические средства для очистки воздуха и дистанционного отбора его проб при проведении горных выработок / В.И. Ляшенко, А.А. Гурин, А.А. Лапшин // Безопасность труда в пром-сти. – 2015. – № 5. – С. 86 – 91.

Lyashenko, V.I., Gurin, A.A., Lapshin, A.A. *Novyye tekhnologii i tekhnicheskiye sredstva dlya ochistki vozdukha i distantsionnogo otbora yego prob pri provedenii gornykh vyrabotok* [New technologies and technical means for air cleaning and remote taking its samples by driving the mine workings]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in the industry*, 2015, no. 5, pp. 86 – 91.

5. Голик, А.С. Система мониторинга атмосферы локальных объектов (СМАЛО) для газового контроля горноспасателями в аварийных условиях шахт / А.С. Голик, О.С. Токарев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово, 2013. – № 1.2. – С. 69 – 72.

Golik, A.S., Tokarev, O.S. *Sistema monitoringa atmosfery lokal'nykh ob'yektov (СМАЛО) dlya gazovogo kontrolya gornospasatelyami v avariynykh usloviyakh shakht* [Local objects atmosphere monitoring system (СМАЛО) for gas

control by mine rescuers under emergency conditions of mines]. *Vestnik Nauchnogo Tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti* [Bulletin of the Scientific Centre on safety of operations in the coal industry]. Kemerovo, 2013, no. 1.2, pp. 69 – 72.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук П.С. Пашковским.
Дата поступления рукописи 10.09.2018

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

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

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

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

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

REMOTE MINE AIR SAMPLING FROM ISOLATED FIRE DISTRICTS

Purpose. Evaluation of possibility and substantiation of basic parameters of the remote air sampling from the isolated fire districts at a long distance with a purpose to obtain reliable data on the gas situation.

Methods. Investigation of the possibility to apply effectively a system for the remote mine air sampling from the isolated fire districts at the long distance, editing the special literature sources.

Results. The analysis of conditions for the use of the system for the remote mine air sampling from the isolated fire districts, the analysis of complications and shortcomings which influence the objectivity of the air samples during their taking at the considerable distance have been carried out. The method for the remote mine air sampling from the isolated fire districts existing today has been assessed. The ways for improvement of the system for the remote mine air sampling have been proposed.

Scientific novelty. The dependence of the gas-air sample reliability on the pipeline length and diameter, air flow velocity has been established, the corresponding design formulae have been proposed. The material which the pipeline for the remote sampling should be made from has been determined with the purpose to exclude the intolerable gas permeability.

Practical value. The obtained results should be used by working-out the guidelines for the remote air sampling from the isolated fire districts with the purpose of their further use by the subdivisions of the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry for Emergency Situations of the Donetsk People's Republic during accident elimination in coal mines.

Key words: coal mine; remote sampling; mine air; isolated fire district; pipeline for the mine air sampling.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.868.42:622.81]:691.54

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

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

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

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

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

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КИНЕТИКУ РАННЕЙ ПРОЧНОСТИ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Цель. Исследование влияния гидратации цементного вяжущего и ускорителя твердения на кинетику ранней прочности взрывоустойчивой перемычки.

Методика основана на теоретическом исследовании процесса теплотыделения при гидратации цемента и ускорителя твердения и их влияния на повышение температуры перемычки, экспериментальном исследовании набора ранней прочности при термостатном твердении с регулируемым изменением температуры, аналогичным закону изменения температуры в моноблоке перемычки.

Результаты. Выполнен расчет температуры нагревания моноблока перемычки за 24 ч твердения с учетом экзотермических реакций гидратации цемента и ускорителя твердения. Показано, что температура нагревания определяется маркой цемента, ускорителем твердения и водотвердым отношением цементной массы и не зависит от массы и геометрических размеров перемычки. Расчетное значение температуры с высокой точностью подтверждается экспериментальными данными. Сделан вывод о том, что температурные условия твердения цементного материала в моноблоке перемычки существенно отличаются от твердения в лабораторных условиях, соответствующих ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии», устанавливающему температуру твердения $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Поэтому результаты лабораторных испытаний прочностных характеристик ниже по сравнению с соответствующими характеристиками материала в моноблоке перемычки. Для адекватной оценки прочностных характеристик с учетом теплотыделения в моноблоке перемычки предложено использование термостата с регулируемым законом изменения температуры по эмпирическим кривым, соответствующим закону изменения температуры в моноблоке перемычки. Показано, что время набора прочности для цементно-шлакового и цементно-зольного материалов с учетом теплотыделения сокращается в 1,42 и 2,37 раза соответственно.

Научная новизна. Предложена формула для определения нагревания моноблока взрывоустойчивой перемычки с учетом гидратации цемента, хлористого кальция и водотвердого отношения цементной массы. Получены эмпирические кривые набора ранней прочности цементных материалов с учетом теплотыделения в моноблоке перемычки.

Практическая значимость. Сокращение времени ввода в эксплуатацию взрывоустойчивой перемычки, повышение оперативности ее возведения.

Ключевые слова: *теплотыделение; перемычка; цементное вяжущее; ускоритель твердения; температура, прочность.*

Постановка проблемы. Существенную часть подземных пожаров ликвидируют изоляцией и комбинированным способом тушения в шахтах, опасных по газу и пыли. При изоляции аварийного участка происходит взрывоопасное скопление горючих газов и возникает угроза взрыва, поэтому прочностные характеристики материала перемычки должны обеспечить взрывоустойчивость изолирующего сооружения. Наиболее полно требованиям по механическим характеристикам скорости набора прочности, технологичности механизированного возведения взрывоустойчивой перемычки соответствует гипсовое вяжущее, что и предопределяет его широкое применение в практике локализации подземных пожаров. Наряду с положительными свойствами гипсового материала выявились и недостатки. Основными из них являются:

- низкая водостойкость, исключающая возможность применения в обводненных выработках и обуславливающая повышенную текучесть влажного материала и значительное снижение его прочности;
- быстрое схватывание раствора в технологических трубопроводах, требующее повышения водогипсового отношения, что снижает прочность материала.

Применение быстротвердеющих смесей позволяет устранить недостатки гипсового материала. Вместе с тем время набора механической прочности растворов на основе цементного вяжущего в ряде случаев не удовлетворяет требованию оперативного возведения взрывоустойчивых подземных перемычек. Известны [1] многие факторы, влияющие на скорость твердения цементного теста, включая оптимальность состава, применение ускорителей твердения, тонкость помола, создание повышенных температурных условий при твердении материала (нагревание материала).

Поскольку подземная взрывоустойчивая перемычка является массивным монолитным цементным телом, то при гидратации цемента происходит тепловыделение и нагревание материала перемычки. Ввиду низкой теплопроводности бетона и теплоизоляции большей части поверхности перемычки боковыми породами, а также породами кровли и почвы горной выработки происходит повышение температуры твердения цементного материала, что интенсифицирует кинетику набора прочности. Вместе с тем испытываемые материалы должны быть уложены в специальные разъемные формы ФБС, которые образуют балочки размером 40×40×160 мм. После изготовления образцы-балочки подвергают испытанию на прочность. Очевидно, что условия твердения малоразмерных балочек при температуре (20±2) °С существенно отличаются от температурных условий в моноблоке перемычки. Из-за этого показатели прочности испытываемых балочек будут заведомо меньше соответствующих показателей материала перемычки. Учет естественного процесса нагревания позволит оценить снижение времени набора требуемой прочности и за счет этого снизить время возведения перемычки и повысить оперативность ввода ее в эксплуатацию.

Анализ последних исследований. В работе [2] приведен расчет температуры нагревания изолирующей взрывоустойчивой перемычки, выполненной из быстротвердеющего материала «Текбленд». Расчет основывается на суммировании тепловыделения отдельных компонентов (вяжущих), входящих в состав смеси «Текбленд», а именно портландцемента 65 %, глиноземистого цемента 20 % и гипса 10 %. Получено значение температуры перемычки 53,2...64,3 °С, но не рассматривается влияние повышения температуры на набор прочности материала перемычки.

В работе [3] показано и обосновано соответствие между тепловыделением цементного теста в процессе твердения и кинетикой прочности. Сделан вывод о возможности прогнозирования предела прочности цементного камня по тепловыделению.

В работе [4] экспериментально решалась задача обоснования взаимосвязи тепловыделения при гидратации цемента и прочности материала путем сопоставления характеристик, полученных для контрольного состава, модифицированного ускоряющей добавкой. Показано, что рост прочности прямо пропорционален увеличению общего тепловыделения при гидратации цемента.

В работе [1] приведена зависимость прочности бетона в разном возрасте:

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28},$$

где R_n, R_{28} – прочность бетона на сжатие в возрасте n и 28 сут;

$\lg n, \lg 28$ – десятичный логарифм возраста.

Формула дает удовлетворительные результаты при $n > 3$ для бетонов, твердевших при температуре 15...20 °С.

В работах [1 – 4] не исследован вопрос повышения ранней прочности цементных материалов с ускорителем твердения в виде хлористого кальция и заполнителями (отходами производства – доменным отвальным шлаком и золой-уноса) в условиях повышенных температур твердения.

Цель исследования. Экспериментальное и теоретическое исследования кинетики набора ранней прочности с учетом естественного тепловыделения в монолитном теле взрывоустойчивой перемычки.

Материалы исследования. Тепловыделение цементных материалов происходит за счет реакции гидратации – взаимодействия вяжущего вещества с водой. В ходе реакции избыток внутренней и поверхностной энергии выделяется как свободная энергия ΔG Гиббса [5]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

где ΔH – энтальпия реакции, кДж/моль;

T – термодинамическая температура, К;

ΔS – изменение энтропии системы, кДж/моль.

В реакции гидратации, когда образуются кристаллогидраты, энтропия уменьшается. В целом при гидратации $\Delta H < 0$, поэтому $\Delta G < 0$.

Таким образом, твердение цементного материала в перемычке сопровождается экзотермической реакцией и протекает самопроизвольно. При твердении цементных материалов с небольшой массой тепловой эффект обычно незначительный, так как теплота быстро рассеивается и заметно не влияет на структуру цементного камня. В массивных монолитных сооружениях за счет низкой теплопроводности бетона происходит естественное нагревание конструкции. Дополнительным фактором, интенсифицирующим нагревание, является теплоизоляция шахтной изолирующей перемычки боковыми породами, а также породами кровли и почвы горной выработки.

Согласно правилу Вант-Гоффа любая химическая реакция при повышении температуры интенсифицируется, включая и кинетику твердения цементного камня. Поэтому естественно ожидать, что прочность материала в моноблоке перемычки будет больше, чем прочность материала, измеренная (согласно нормативным документам) на стандартных образцах-балочках размером 40x40x160 мм, твердевших в нормальных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Температуру нагревания перемычки при условии отсутствия теплотерь определим из уравнения теплового баланса. Принимаем, что количество теплоты, выделившейся при гидратации цемента и ускорителя твердения (хлористого кальция), полностью идет на нагревание моноблока перемычки. Количество теплоты, выделяющейся при гидратации цемента, определим по формуле

$$Q_{\text{ц}} = q_{\text{ц}} K_{\tau} K_{\text{ц}} m_{\text{с}},$$

где $Q_{\text{ц}}$ – количество выделившейся теплоты, кДж;

$q_{\text{ц}}$ – удельная теплота полной гидратации цемента, кДж/кг;

K_{τ} – доля количества теплоты, выделившейся за время τ ;

$K_{\text{ц}}$ – доля цемента в сухой цементной смеси;

$m_{\text{с}}$ – масса сухой цементной смеси, кг.

Приращение количества удельной теплоты, выделившейся при гидратации хлористого кальция:

$$Q_{\text{хк}} = q_{\text{хк}} n,$$

где $q_{\text{хк}}$ – приращение удельной теплоты цемента с однопроцентной добавкой хлористого кальция, кДж/кг;

n – массовая доля хлористого кальция в сухой смеси, %.

Суммарное количество теплоты при гидратации цемента с ускорителем твердения находим по формуле

$$Q_{цх} = K_{\tau} (q_{ц} + q_{хк} n) K_{ц} m_{сc}. \quad (1)$$

Количество теплоты, накопленной моноблоком перемиčky, находим по формуле

$$Q_n = c m_n \Delta t, \quad (2)$$

где Q_n – количество теплоты, кДж;

c – теплоемкость бетона, кДж/(кг·°C);

m_n – масса перемиčky, кг.

Приравнивая (1) и (2), получаем уравнение теплового баланса нагревания перемиčky:

$$K_{\tau} (q_{ц} + q_{хк} n) K_{ц} m_{сc} = c m_n \Delta t.$$

Отсюда находим приращение температуры нагревания перемиčky

$$\Delta t = K_{\tau} \frac{q_{ц} + q_{хк} n}{c} K_{ц} \frac{m_{сc}}{m_n}.$$

Массу материала перемиčky m_n представим в виде $m_n = m_{сc} + m_{в}$,

где $m_{в}$ – масса воды, кг.

$$\text{Отношение } \frac{m_{сc}}{m_n} = \frac{m_{сc}}{m_{сc} + m_{в}} = \frac{1}{1 + m_{в} / m_{сc}}.$$

Отношение $\frac{m_{в}}{m_{сc}} = В/Т$ является водотвердым отношением материала

перемиčky.

Обычно В/Т лежит в диапазоне 0,3...0,5. В разработанной рецептуре В/Т = 0,3. Поэтому температуру перемиčky находим по формуле

$$t = t_a + 0,769 K_{\tau} K_{ц} \frac{q_{ц} + q_{хк} n}{c}, \quad (3)$$

где t_a – температура окружающей среды, °C.

Из формулы (3) видно, что температура нагревания перемиčky не зависит от ее геометрических размеров, массы, плотности материала. Температура нагревания зависит от марки цемента, ускорителя твердения, водотвердого отношения.

Расчет, проведенный по формуле (3) при 24-часовом твердении материала перемишки и $t_a = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $K_{\tau} = 0,15...0,20$; $q_{ц} = 502\text{ кДж/кг}$ [2]; $q_{хк} = 13,67\text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $c = 0,92\text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$, дает следующие значения: при $K_{\tau} = 0,15$; $t = 63,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; при $K_{\tau} = 0,20$; $t = 84,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отсюда среднее значение температуры перемишки после 24-часового твердения равно $t = 74,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Более ранние экспериментальные исследования ВНПО «Респиратор» позволили получить кривые нагревания термоизолированного цементного моноблока с аналогичными пропорциями цементного вяжущего и заполнителя. Измерения проводили с помощью двух термодатчиков и аппаратуры ТЭТА для дистанционного контроля температуры (рис. 1). Точке, соответствующей времени твердения, равному 24 ч, соответствует температура $74,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на кривой 1, что подтверждает правильность приведенных расчетов.

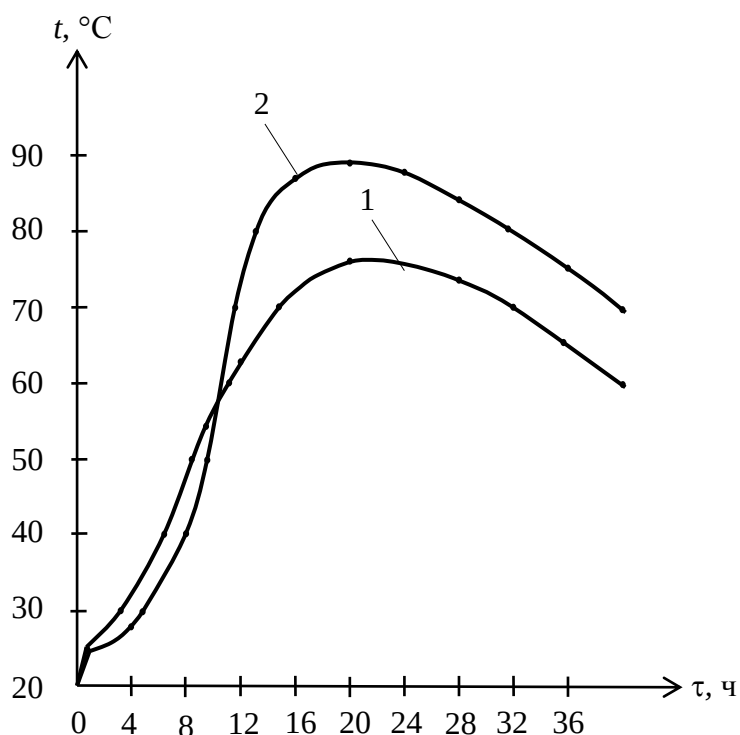


Рис. 1. Температура в моноблоках из цементных смесей различных составов:

- 1 – бетонные смеси, содержащие 70 % цемента и 30 % минерального заполнителя;
- 2 – бетонные смеси, содержащие 70 % цемента и 30 % золы

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные подтверждают, что температурные условия твердения цементного материала в моноблоке перемишки существенно отличаются от нормальных условий твердения образцов-балочек. При этом очевидно, что прочность образцов-балочек ниже прочности материала в моноблоке перемишки. Это означает, что достижение

прочности, равной 3 МПа, материала перемычки достигается за более короткий интервал времени твердения по сравнению с материалом, твердевшим в нормальных условиях.

Вышеприведенные расчеты показывают, что теоретически возможно определить температуру нагревания перемычки в функции времени. Однако в литературе не отображена зависимость коэффициента K_t от времени при раннем сроке твердения цементного материала, измеряемом несколькими часами. В связи с этим для определения влияния температуры нагревания перемычки на набор ранней прочности использовали кривые 1, 2 (см. рис. 1) для задания закона изменения температуры в термостате ТС-80М-2. В термостат помещали формы ФБС с залитыми образцами-балочками размером 40×40×160 мм, а температуру твердения в моноблоке перемычки регулировали с помощью органов управления термостата. Результаты прочностных испытаний при термостатном твердении показаны на рис. 2. Прочность 3 МПа достигается в цементно-шлаковом материале через 4,5...5 ч, а в цементно-зольном материале – через 6,5...7 ч. Ранее проведенными работами [6] установлено, что аналогичная прочность образцов-балочек, твердевших в нормальных условиях, достигается для:

- цементно-шлаковых смесей за 6,5...7 ч;
- цементно-зольных смесей за 16 ч.

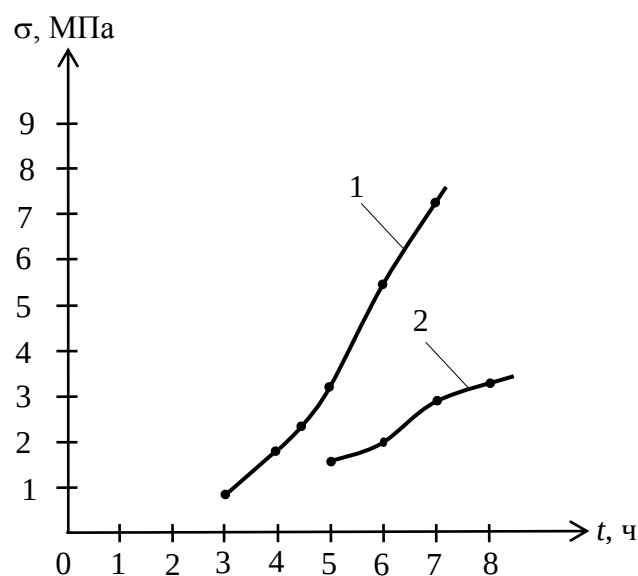


Рис. 2. Результаты прочностных испытаний при термостатном твердении:

1 – цементно-шлаковый материал; 2 – цементно-зольный материал

Следовательно, твердение цементного материала в моноблоке перемычки ускоряется за счет тепловыделения при гидратации цемента для цементно-шлакового материала в 1,42 раза, а для цементно-зольного материала в 2,37 раза.

Выводы

1. Полученное выражение для температуры нагревания не зависит от массы и геометрических размеров перемычки. Определяющими факторами тепловыделения являются марка цемента, ускоритель твердения и водотвердое отношение затворенной смеси.

2. Расчетное значение температуры перемычки после 24-часового твердения с высокой точностью совпадает с экспериментально измеренным значением температуры. Нагревание перемычки равно 74,4 °С, что существенно отличается от нормальной температуры твердения (20 ± 2) °С испытываемых образцов-балочек в лабораторных условиях. Из-за этого механическая прочность образцов-балочек, испытанных в лабораторных условиях, без учета тепловыделения ниже по сравнению с прочностью материала моноблока перемычки.

3. Для создания условия твердения цементного материала соответствующему тепловыделению в моноблоке перемычки предложено использовать регулируемый термостат, а закон изменения температуры во времени устанавливать в соответствии с экспериментальной кривой нагревания.

4. Экспериментальные исследования прочностных характеристик при термостатном твердении показывают, что время набора прочности, равной 3 МПа, сокращается в 1,42 раза для цементно-шлакового материала, и в 2,37 раза для цементно-золяного материала. Это позволяет сократить время ввода перемычки в эксплуатацию.

Список литературы / References

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.

Bazhenov, Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Technology of concrete]. Moscow, Izd-vo ASV Publ., 2002, 500 p.

2. Ледяйкин, Е.С. О нагревании изоляционных взрывоустойчивых перемычек / Е.С. Ледяйкин, Н.Ю. Трошков, А.С. Ярош // Вестник НЦ ВостНИИ. – 2016. – № 4. – С. 56 – 61.

Ledyaykin, Ye.S., Troshkov, N.Yu., Yarosh, A.S. *O nagrevanii izolyatsionnykh vzryvoustoychivyykh peremychek* [On heating the isolation explosion-proof stoppings]. *Vestnik NTs VostNII – Bulletin of the VostNII Scientific Center*, 2016, no. 4, pp. 56 – 61.

3. Несветаев, Г.В. Тепловыделение при гидратации и предел прочности цементного камня / Г.В. Несветаев, Та Ван Фан // Науковедение. – 2013. – № 3. – С. 1 – 5.

Nesvetayev, G.V., Ta Van Fan. *Teplovydeleniye pri gidratatsii i predel prochnosti tsementnogo kamnya* [Heat generation by hydration and ultimate strength of the cement stone]. *Naukovedeniye – Science of science*, 2013, no. 3, pp. 1 – 5.

4. Адамцевич, А.О. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных смесей ускоренного твердения / А.О. Адамцевич, С.А. Пашкевич, А.П. Пустовгар // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 3. – С. 36 – 42.

Adamtsevich, A.O., Pashkevich, S.A., Pustovgar, A.P. *Ispol'zovaniye kalorimetrii dlya prognozirovaniya rosta prochnosti tsementnykh smesey uskorenogo tverdeniya* [Use of the calorimetry for prognostication of the strength rise of cement mixtures of accelerated curing]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – The construction engineering journal*, 2013, no. 3, pp. 36 – 42.

5. Мохов, А.Г. Тепловые эффекты реакции гидратации / А.Г. Мохов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – 8 с.

Mokhov, A.G. *Teplovyye efekty reaktsii gidratatsii* [Thermal effects of the hydration reaction]. Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2007, 8 p.

6. Пефтибай, Г.И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай // Вестник НЦ ВостНИИ. – 2018. – № 1. – С. 47 – 52.

Peftibay, G.I. *Malokomponentnyye bystrotverdeyushchiye tsementnyye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustoychivyykh peremychek* [The small-component rapid-hardening cement mixtures for erection of explosion-proof stoppings]. *Vestnik NTs VostNII – Bulletin of the VostNII Scientific Center*, 2018, no. 1, pp. 47 – 52.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 01.06.2018

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

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

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

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

INFLUENCE OF HEAT RELEASE OF CEMENT MATERIALS ON INITIAL STRENGTH KINETICS OF A BLAST-RESISTANT STOPPING

Purpose. Investigation of the influence of hydration of the cement binding material and cement hardener on the initial strength kinetics of the blast-resistant stopping.

The methods are based on the theoretical study of the heat release process by cement and cement hardener hydration and their influence on increase of the temperature of the stopping, on the experimental

investigation of the initial strength increase by the thermostatic hardening with the regulated temperature change that is similar to the law of temperature variation in the monoblock of the stopping.

Results. The calculation of the temperature of heating the monoblock of the stopping during the 24-hour hardening process has been fulfilled taking into account the exothermic reactions of cement and cement hardener hydration. It has been shown that the temperature of heating is determined by cement brand, cement hardener and water-solid ratio of the cement mass and doesn't depend on the mass and geometrical dimensions of the stopping. The calculated temperature value is confirmed by the experimental data with high accuracy. It has been concluded that the temperature conditions of the hardening of the cement material in the monoblock of the stopping differ significantly from the hardening under laboratory conditions complying with ГОСТ 310.4-81 "Cements. Methods of bending and compression strength determination" setting the hardening temperature of $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. That is why the laboratory test results of the strength characteristics are lower than the corresponding material characteristics in the monoblock of the stopping. In order to adequately evaluate the strength characteristics with due regard for the heat release in the monoblock of the stopping it has been proposed to use a thermostat with the regulated law of temperature variation by empirical curves corresponding to the law of temperature variation in the monoblock of the stopping. It has been shown that the time of the strength increase for the cement-slag and cement-ash materials decreases 1.42 and 2.37 times correspondingly in accordance with the heat release.

Scientific novelty. The formula for determination of the heating of the monoblock of the blast-resistant stopping has been proposed taking into account the cement, calcium chloride hydration and water-solid ratio of the cement mass. The empiric curves of the initial strength increase of the cement materials have been obtained with due regard for the heat release in the monoblock of the stopping.

Practical value. Reduction of setting into operation of the blast-resistant stopping, increase of operability of its erection.

Key words: *heat release; stopping; cement binding agent; cement hardener; temperature; strength.*

УДК 552.57:622.411.33

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

Александр Александрович Всякий, ст. науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eager@inbox.ru

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

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

Ирина Геннадиевна Старикова, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: ir-starik@yandex.ru

ГУ «Институт физики горных процессов»

283114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 381-17-85

ВЛИЯНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕЙ НА ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ИЗ НИХ МЕТАНА

Цель. Изучение влияния текстуры внутреннего пространства угля и его газоносности на истечение метана и охлаждающий эффект.

Методика. Анализ и обобщение литературных источников и материалов исследований НИИГД «Респиратор» петрографического состава углей и его влияние на метановыделение и охлаждение.

Результаты. Проанализированы данные отечественных и зарубежных исследователей зависимостей объемной доли углерода в углях C , %, от объемной доли летучих горючих V^r , %, пористости P , %, от объемной доли углерода C , %, дробимости угля D_r от объемной доли углерода. Получены зависимости общей $P_{об}$, % и фильтрационной пористости $P_{ф}$, %, $V_{ф}$, см³/г, от V^r и дробимости. Даны зависимости для вычисления по экспериментальным данным динамики температур охлаждения угля при истечении из него метана, средней температуры за время истечения, динамики расхода истечения μ , мл/с, средней скорости истечения метана u_0 , мл/с, теплоты дросселирования метана $q_{др}$, Дж/моль. На конкретном примере проиллюстрировано пользование зависимостями.

Научная новизна. Показано, что параметр дробимости углей однозначно характеризует текстуру пористого пространства и адекватно отражает фильтрационную пористость независимо от характеристик пористой структуры. Предложен метод определения теплоты дросселирования из угля метана.

Практическое значение. Установлено, что в течении 1...6 дней в зависимости от размера частиц отторгнутого от массива угля за счет дросселирования из него метана происходит охлаждение угля в среднем на 1...1,5 °С, что затормаживает реакции его окисления и увеличивает инкубационный период самовозгорания.

Ключевые слова: пористость; дробимость; метановыделение; скорость газоотдачи; теплота дросселирования.

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований. Ранее [1 – 2] на основании предварительных лабораторных исследований замечено, что в первое время (часы, сутки) после отделения угля от массива в период интенсивного выделения из него метана происходит некоторое охлаждение угля за счет эффекта дросселирования метана из его пор.

Предложена математическая модель описания процесса теплообмена между частицей угля и окружающей ее средой для случая истечения из нее метана и охлаждения в результате этого. Показано, что охлаждение частиц угля зависит от их размеров, газоносности, скорости истечения, зависящей, вероятно,

от физических свойств угля, определяемых петрографическим составом, а именно: твердости, хрупкости, излома, отдельности, структуры, пористости, пластичности, упругости. Наряду с такими параметрами внутреннего строения угля, как пористость, объем замкнутых и открытых пор, внутренняя поверхность, диаметр пор, распределение внутреннего объема и внутренней поверхности по размерам, проницаемости и др. М.М. Дубинин и А.С. Фиалков отмечают, что не менее важной характеристикой пористой структуры является взаимное расположение пор всех размеров, их связь между собой и внешней поверхностью. Эти характеристики, по мнению авторов, определяют так называемую текстуру пористого пространства, которая определяет доступность внутривещного объема для диффузии из него метана. Установлено [3], что физико-химические свойства угля взаимно связаны и обусловлены химическим составом и структурными особенностями угольного вещества. Учитывая сложность изучения текстуры угля, которая определяется совокупностью ряда его свойств, исследователи ограничиваются обычно другим параметром, также являющимся совокупностью ряда свойств угля – дробимостью, легко определяемой для каждого угля в лабораторных условиях.

Целью данной работы является изучение влияния текстуры внутреннего пространства угля и его газоносности на истечение метана и охлаждающий эффект.

Материалы и результаты исследований. Основным параметром при изучении истечения метана из угля является его пористость, зависящая во многом от степени углефикации. Особую роль при истечении метана имеет макропористая система угля, когда крупные поры служат путями выхода метана из внутренних областей угля. Ориентировочно распределение объема пор по приведенным радиусам может быть принято согласно таблице по данным М.А. Давыдова.

Распределение объемов пор по приведенным радиусам

Марки угля									
Д, $V^r = 35 \%$		ПЖ, $V^r = 30 \%$		К, $V^r = 25 \%$		ПС, $V^r = 15 \%$		А, $V^r = 5 \%$	
Радиус пор, Å	Доля пор, %	Радиус пор, Å	Доля пор, %	Радиус пор, Å	Доля пор, %	Радиус пор, Å	Доля пор, %	Радиус пор, Å	Доля пор, %
530	39	510	60	500	61	500	63	600	81
180	39	165	23	170	20	170	23	180	15
64	22	65	17	57	19	60	15	67	4

Из таблицы видно, что с увеличением стадии метаморфизма наблюдается рост объема крупных промежуточных пор. В то же время снижается доля пор с размером 60...70 Å.

Большинство исследователей, особенно дальнего зарубежья, связывают пористость углей Π (% , $\text{см}^3/\text{г}$) с объемной долей в них углерода C , %. В то же время ученые Украины и стран СНГ при исследовании углей пользуются более широко известным параметром V^r , %, тесно связанным с долей в угле углерода. Поэтому в дальнейшем для удобства воспользуемся данными И.В. Доронина, получившего зависимость $C = f(V^r)$ для всех марок углей Донбасса, представленную в виде графика на рис. 1

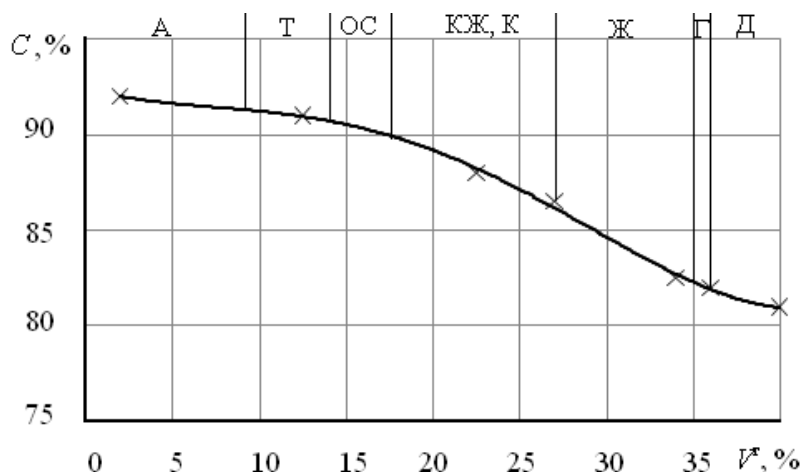


Рис. 1. Зависимость объемной доли углерода в углях разной степени метаморфизма от выхода летучих (по данным И.В. Доронина)

Чтобы связать пористость углей с дробимостью, воспользуемся вначале данными исследований автора [3], изучавшего зависимость объемной доли в угле углерода с пористостью. Результаты этой работы представлены на рис. 2 в виде графика для общей пористости (рис. 2, а) и для макропористости (обычно считающейся фильтрационной, рис. 2, б).

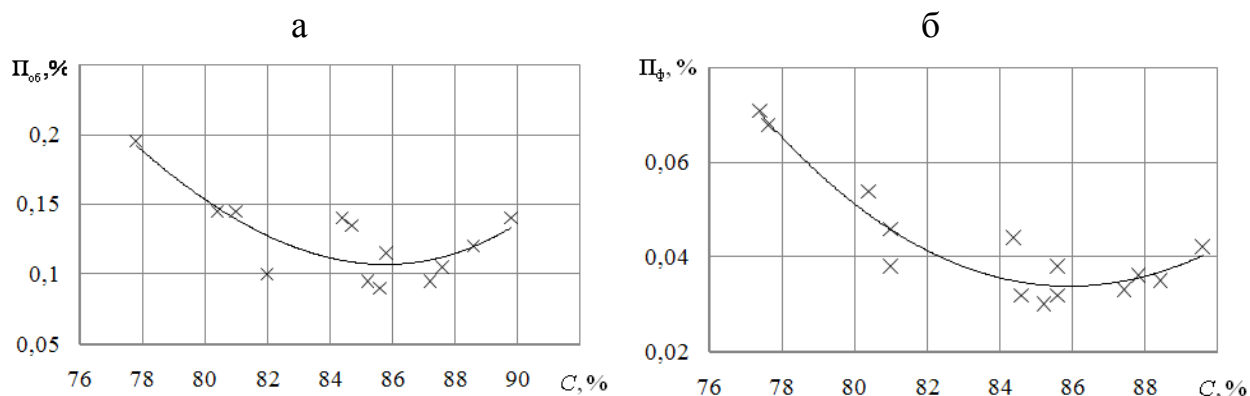


Рис. 2. Зависимости пористости углей от объемной доли углерода (по данным [3]):
а – общая; б – фильтрационная

Эта пористость нас особенно интересует, так как именно от нее зависит влияние дросселирования метана на охлаждение угля в начальный период его отделения от массива.

В то же время многочисленными исследованиями НИИГД установлена взаимосвязь дробимости углей D_p с объемной долей летучих горючих V^f . Воспользовавшись данными, представленными на рис. 1, и результатами более чем 20 экспериментов НИИГД, эту связь можно выразить в виде функции $D_p = f(C)$, представленную на рис. 3.

Аналогичный характер зависимости $D_p = f(C)$ получен автором [4].

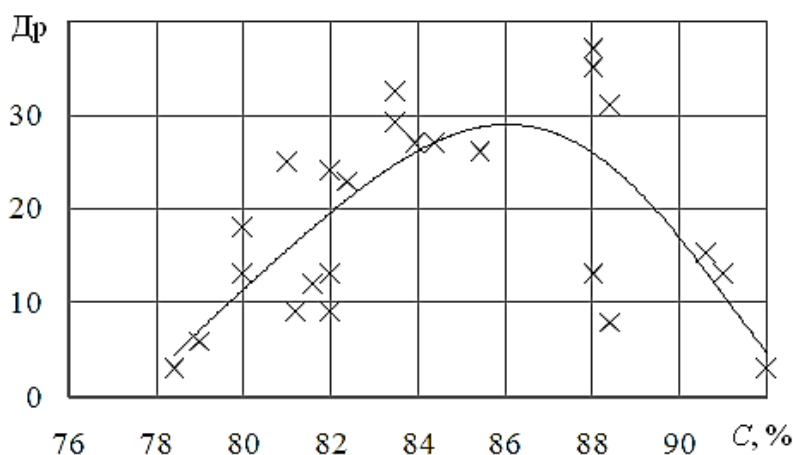


Рис. 3. Зависимость дробимости углей от объемной доли углерода (по данным НИИГД)

Наконец, имея связь объемной доли в угле углерода с дробимостью и пористостью, получили зависимость пористости от дробимости, представленную на рис. 4, а для общей пористости и на рис. 4, б для фильтрационных пор.

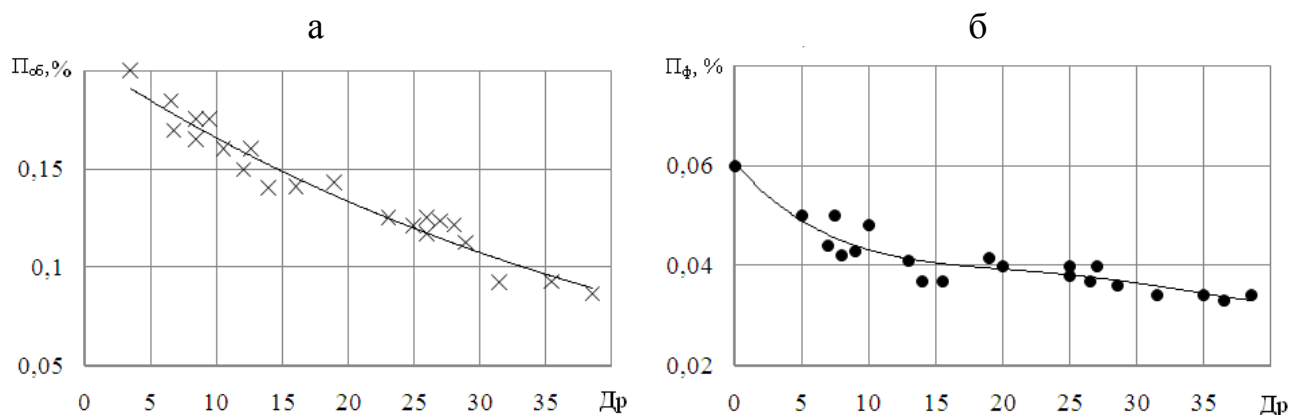


Рис. 4. Зависимость пористости углей от дробимости:
а – общая; б – фильтрационная

Из данных рис. 4 следует, что существует тесная связь пористости и дробимости, которая может быть представлена зависимостями:

- для общей порозности

$$\Pi_{об} = \Pi_0 \exp[-0,09 \text{Др}^{0,67}] ; \quad (1)$$

- для фильтрационных пор

$$\Pi_{ф} = \Pi_0 \exp[-0,09 \text{Др}^{0,55}] , \quad (2)$$

где Π_0 – пористость при минимальной дробимости, принимается равной 0,25 для общих пор и 0,06 для фильтрационных.

Таким образом, внутренняя структура угля, определяемая пористостью, может быть однозначно охарактеризована параметром дробимости, что будет в дальнейшем использовано при изучении теплового эффекта дросселирования метана из угля.

При изучении взаимосвязи пористости с различными характеристиками угля нередко различные исследователи изучают ее взаимосвязь с объемной долей горючих.

С использованием данных D.W. van Krevelen [3], НИИГД и МакНИИ получены результаты зависимости фильтрационного объема пор $V_{ф}$, $\text{см}^3/\text{г}$, от V^* , %, представленные в виде крестиков на рис. 5.

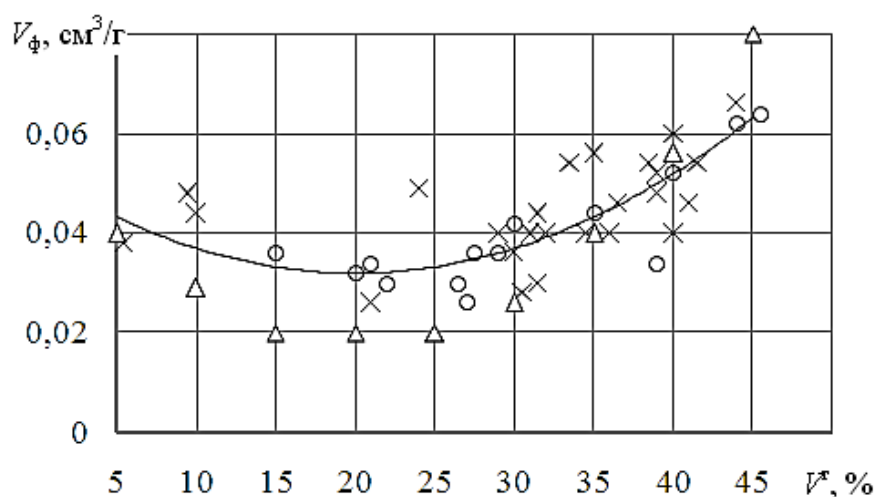


Рис. 5. Зависимость фильтрационной пористости от объемной доли в углях летучих горючих:

$\times$ – расчетные данные по экспериментам НИИГД; $\circ$ – расчетные данные НИИГД по экспериментам [3]; Δ – расчетные данные МакНИИ

Зависимость фильтрационной пористости V_{ϕ} , см³/г, от объемной доли горючих может быть представлена в виде

$$V_{\phi} = 5 \cdot 10^{-5} \left(V^{\Gamma} \right)^2 - 0,002 V^{\Gamma} + 0,052. \quad (3)$$

Анализ представленных данных показывает, что у углей даже различных месторождений зависимость пористости от объемной доли горючих имеет аналогичный характер и их значения в диапазоне $30 \% < V^{\Gamma} < 45 \%$ практически одинаковы для разных углей. Некоторое отличие результатов НИИГД от данных других авторов заключается в том, что в исследованиях НИИГД были использованы данные об углях, содержащих несколько большее количество витринитов.

Почти полная идентичность полученных НИИГД и другими исследователями по другим методикам зависимости пористости V_{ϕ} от объемной доли горючих V^{Γ} позволяет заключить, что и найденные НИИГД зависимости V_{ϕ} , %, от дробимости D_p легитимны и могут быть в дальнейшем использованы при изучении истечения метана из углей.

В то же время в ряде случаев необходимо пользоваться зависимостью (3) для вычисления фильтрационной пористости V_{ϕ} , см³/г (м³/т). Для нахождения этой зависимости от дробимости воспользуемся экспериментальными данными [4] о связи дробимости D_p с объемной долей горючих V^{Γ} , %, которая может быть выражена в следующем виде:

$$D_p = 330e^{-0,045V^{\Gamma}} - 370e^{-0,11V^{\Gamma}}. \quad (4)$$

Используя уравнения (4) и (3), нашли зависимость $V_{\phi} = f(D_p)$, см³/г (м³/т), в виде

$$V_{\phi} = 4 \cdot 10^{-6} D_p^{2,61}. \quad (5)$$

Довольно тесная связь фильтрационной пористости с дробимостью, полученная по экспериментам различных авторов для разных углей, свидетельствует о том, что параметр «дробимость», легко получаемый в лабораторных исследованиях, адекватно отражает фильтрационную пористость независимо от характеристик пористой структуры, таких, как взаимное расположение пор всех размеров, их связь между собой и внешней поверхностью. Иными словами, дробимость угля может однозначно характеризовать текстуру пористого пространства, определяющую доступность внутреннего объема для диффузии из него метана и создания дросселирующего эффекта охлаждения угля.

Для изучения влияния петрографического состава углей на выделение из них метана и определения теплоты дросселирования выполнялись эксперименты с углями разной степени метаморфизма, газоносности, влажности, дробимости на экспериментальной установке НИИГД [2] с учетом методики, предложенной в работе [5].

Брали уголь с диаметром частиц $2,5 \cdot 10^{-4} < d < 5 \cdot 10^{-4}$ м и массой $m \approx 500$ г. Насыщали частицы угля метаном в специальном контейнере в Институте физики горных процессов ДНР (ИФГП) при давлении (12 ± 1) МПа. Расход истечения метана v_0 , мл/с, при его дросселировании измеряли пленочным расходомером, время напорного выделения метана фиксировалось его завершением истечения через расходомер. По полученным результатам строили график расхода выделения метана v , мл/с, из угля во времени и находили его зависимость, полученную теоретически в работе [5]:

$$v = v_0 / t^n, \quad (6)$$

где v_0 – расход метана сразу же после сброса давления, мл/с;

t – время с момента сброса давления, с;

n – показатель степени, характерный для данного угля.

Количество метана ΔG_n , мл, выделившегося из угля за отрезок времени Δt , с, находили как произведение среднего расхода метана за этот промежуток времени Δv_{cp} , мл, на Δt , с (т.е. $\Delta G_n = \Delta v_{cp} \Delta t$). Общее количество выделившегося из угля метана за весь период наблюдений G_n , мл, находили как сумму ΔG_n , мл, за все промежутки времени наблюдений в эксперименте. Затем величину G_n , мл, для дальнейшего использования пересчитывали в размерность G_n^* , моль/м³, учетом массы угля m , кг, в эксперименте по формуле

$$\frac{G_n \rho}{V_m m} = G_n^*, \quad (7)$$

где ρ – плотность угля, кг/м³;

$V_m = 22400$ мл/моль;

m – масса угля при эксперименте, кг.

По полученной зависимости расхода метана (6) находили среднеинтегральное значение Δv_{cp} , мл/с, за время напорного выделения метана t_n , с, по зависимости

$$v_{cp} = \frac{v_0}{(1-n) t_n^n}. \quad (8)$$

После этого определяли среднюю скорость выделения метана из угля $\mu_{\text{ср}}$, с^{-1} , делением $v_{\text{ср}}$ на $G_{\text{н}}$, т.е.

$$\mu_{\text{ср}} = v_{\text{ср}} / G_{\text{н}}. \quad (9)$$

Параллельно с измерением расхода выделяющегося из угля метана измеряли температуру угля в реакционном и сравнительном сосудах и строили кривые динамики разности температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$, во времени t , с , в виде зависимости

$$\Delta T = ae^{-bt}. \quad (10)$$

Затем находили среднеинтегральное понижение температуры $\Delta T_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$, за время напорного выделения метана $t_{\text{н}}$, с , по формуле

$$\Delta T_{\text{ср}} = a \frac{e^{-bt_{\text{н}}} - 1}{-bt_{\text{н}}}. \quad (11)$$

Теплоту дросселирования метана $q_{\text{др}}$, Дж/моль, определяли из выражения

$$q_{\text{др}} = \frac{\rho c_v T_0 \ln(T_0 - \Delta T_{\text{ср}} / T_0)}{G_{\text{н}}^* \mu_{\text{ср}} t_{\text{н}}}, \quad (12)$$

где c_v – удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К);
 ρ – плотность угля, кг/м³.

Пример получения и обработки экспериментальных данных по выделению метана из угля и расчету теплоты его дросселирования

Дано: шахта «Никанор-Новая»; пласт k'_5 ; $V^r = 4\%$; $D_p = 13$; $Q_0 = 24 \text{ м}^3/\text{т}$ (в опыте $G_{\text{н}}^* = 684,5 \text{ моль}/\text{м}^3$); $T_0 = 295,2 \text{ К}$; $P_0 = 12 \text{ МПа}$; $d = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\rho = 1460 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_v = 1400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $m = 0,334 \text{ кг}$; $t_{\text{н}} = 259200 \text{ с}$.

Выполнен эксперимент со сбросом давления до атмосферного из навески угля и измерением расхода истечения метана v , мл/с, через различные промежутки времени. Результаты измерений в виде графика представлены на рис. 6, а. На этом же рисунке дано выражение, реализующее теоретическую зависимость $v = f(t)$ (6), среднеинтегральный расход метана $v_{\text{ср}}$, мл/с, подсчитанный по формуле (8), среднюю скорость истечения метана $\mu_{\text{ср}}$ – по формуле (9) и количество выделившегося метана за время его истечения $G_{\text{н}}^*$, моль/м³, – по формуле (7).

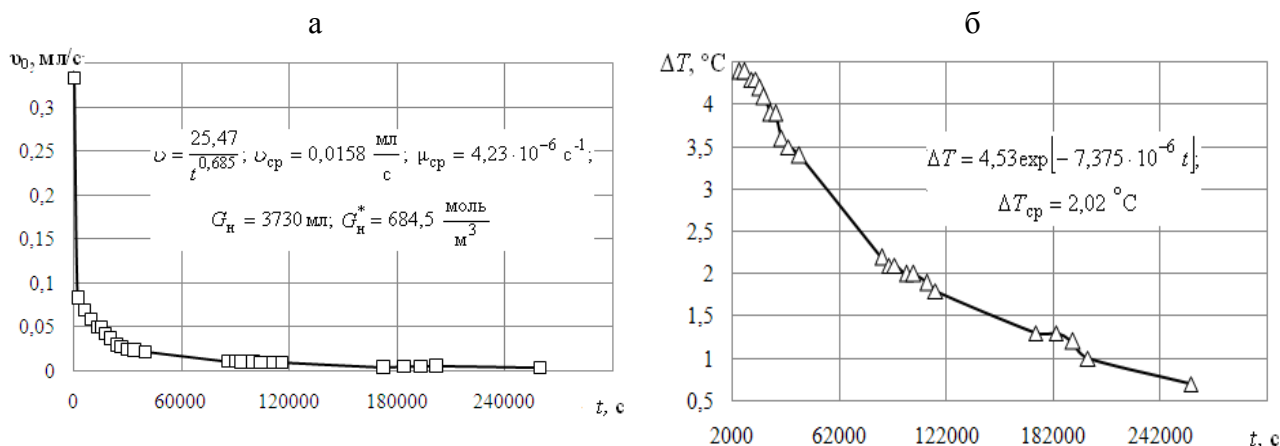


Рис. 6. Изменение параметров истечения метана из отторгнутого от массива угля:

а – расхода; б – температуры

Разность температур ΔT , °C, в сосуде с углем после сброса давления и в контрольном сосуде изменяли во времени по зависимости, представленной на рис. 6, б и описываемой кривой (10) с коэффициентами, данными на этом же рисунке. Здесь же дана среднеинтегральная разность температур, реализующая зависимость (11).

Теплота дросселирования метана $q_{др}$, Дж/моль, по формуле (12) $q_{др} = -5506$.

Выводы

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований относительно связи петрографического состава углей с их дробимостью. Предложены зависимости для определения общей и фильтрационной пористостей как функции дробимости углей.

2. Приведены результаты эксперимента по истечению метана из предварительно насыщенного им угля после сброса давления и его охлаждения. Найдено значение теплоты дросселирования метана.

Дальнейшие исследования – накопление и обобщение данных аналогичных экспериментов с углями разного петрографического состава для получения обобщенных зависимостей вычисления теплоты дросселирования углей разной степени углефикации и последующего расчета инкубационного периода его самовозгорания.

Список литературы / References

1. Газовыделение из отторгнутого от массива угля и тепловой эффект охлаждения / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Б.И. Кошовский, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 26 – 34. – ISSN 0130-1268.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Koshovskiy, B.I., Luganskiy, A.M. *Gazovydeleniye iz ottorgnutogo ot massiva uglya i teplovoy effekt okhlazhdeniya* [Gas release from coal separated from the massif and heat effect of cooling]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 26 – 34. ISSN 0130-1268.

2. Греков, С.П. Охлаждение угля за счет дросселирования выделяющегося метана / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 97 – 107. – ISSN 0130-1268.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya za schyet drosselirovaniya vydelyayushchegosya metana* [Coal cooling at the expense of throttling of the emitting methane]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 97 – 107. ISSN 0130-1268.

3. Van Krevelen, D.W. *Coal*. Rubi. Amsterdam, London, 2007, 514 p.

4. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с. – ISSN 978-617-579-833-1.

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ., 2013, 792 p. ISSN 978-617-579-833-1.

5. Коптиков, В.П. Охлаждение угля при истечении метана / В.П. Коптиков, С.П. Греков, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – Вып. 4(55). – С. 108 – 118.

Koptikov, V.P., Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya pri istechenii metana* [Coal cooling by methane release]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2018, no. 4(55), pp. 108 – 118.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым.
Дата поступления рукописи 07.08.2018

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

Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, senior scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru

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

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

Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: ir-starik@yandex.ru

The Governmental Institution “Institute of Physics of Mining Processes”

283114, Donetsk, 72, ulitsa R. Luxemburg. Phone (+38 062) 381-17-85

INFLUENCE OF THE PETROGRAPHIC COMPOSITION OF COALS ON METHANE THROTTLING FROM THEM

Purpose. Study of the influence of the coal internal space texture and its gas content on methane release and cooling effect.

Methods. Analysis and generalization of literature sources and materials of investigations of the petrographic composition of coals and its influence on methane release and cooling carried out by the NIIGD “Respirator”.

Results. The data of domestic and foreign researchers of dependences of the carbon content in coals, C , %, on the volume fraction of volatiles combustibles, V^* , %, of the porosity Π , %, on the carbon volume fraction C , %, of the coal breakability Δp , on the carbon volume fraction have been analyzed. The dependences of the general porosity Π_{06} , %, and filtration porosity Π_{ϕ} , %, V_{ϕ} , cm^3/t , on V^* and the breakability have been obtained. The dependences are given to calculate dynamics of the cooling temperatures of coal by methane release from it, average temperature during release, dynamics of release consumption μ , ml/s , average velocity of methane release l/s , methane throttling heat $q_{\Delta p}$, J/mol , according to the experimental data. The use of the dependences is illustrated by way of the concrete example.

Scientific novelty. It is shown that the parameter of breakability of coals characterizes unambiguously the texture of the porous space and reproduces adequately the filtration porosity irrespective of characteristics of the porous structure. The method of determination of the throttling heat of methane from coal is proposed.

Practical value. It is established that the coal cooling occurs on the average $1...1.5$ °C during $1...6$ days depending on the size of coal particles separated from the massif at the expense of the throttling of methane from it, what inhibits the reactions of its oxidation and increases the incubation period of the spontaneous heating.

Keywords: porosity; breakability; methane release; gas recovery velocity; throttling heat.

УДК 614.842.612: [614.841.13: 621.63]

Андрей Михайлович Богомаз, аспирант; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

Вадим Григорьевич Сынков, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: vasyn41@mail.ru;

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

Артем 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) 332-78-41*

УСТРОЙСТВО ДЫМОПОДАВЛЕНИЯ В АВАРИЙНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Цель. Проведение испытаний опытного образца устройства дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды с целью экспериментального подтверждения его параметров.

Методы. Экспериментальные исследования. Сравнение экспериментальных данных с полученными ранее в результате аналитических исследований.

Результаты. Экспериментально подтверждена эффективность разработанного устройства в борьбе с таким опасным фактором пожара, как задымление. По сравнению с естественной вентиляцией применение устройства для отсоса ускорило процесс удаления дыма из аварийного помещения в 1,5 раза, для нагнетания – практически в 2 раза, а при дополнительной подаче распыленной воды с помощью одного насадка (расход воды 1,3 л/с) – в 3 раза. Дальнейшее увеличение количества насадков и тем самым расхода подаваемой жидкости не привело к ощутимому результату. Так, при использовании двух насадков (расход воды 2,6 л/с) время удаления дыма из аварийного помещения сократилось на 25,6 %, при использовании трех насадков (расход воды 3,9 л/с) – на 27,3 %.

Научная новизна. Нашли экспериментальное подтверждение полученные ранее аналитические зависимости для определения интенсивности и времени подачи тонкораспыленной воды в аварийное помещение в целях повышения видимости.

Практическая значимость. Внедрение разработанного устройства в пожарно-спасательных подразделениях МЧС позволит повысить эффективность их действий, снизит угрозу жизни спасаемых людей и ведущих боевые действия пожарных.

Ключевые слова: экспериментальные исследования; видимость, дымоосаждение; дымосос; дымоподавление; расход воды; задымление; воздушно-водяной поток; интегрированное устройство дымоподавления; тонкораспыленная вода.

Постановка проблемы. В соответствии с ранжированием опасных факторов пожара методом экспертных оценок наиболее опасными являются дым и высокая температура.

Многолетними исследованиями процессов развития пожаров, выполненных в различных научных учреждениях, включая НИИГД «Респиратор», установлено, что развитие пожара с момента воспламенения горючих материалов до периода активного (объемного) горения продолжается в среднем около 20 мин, при этом температура в помещении увеличивается от нормальной 20 до 500 °С. С момента «общей вспышки» происходит стремительное нарастание температуры до 700 °С и выше.

Вследствие увеличения количества продуктов сгорания объемная доля кислорода снижается до 16...17 %. Это одновременно приводит к снижению скорости выгорания пожарной нагрузки, увеличению среднеобъемной температуры и возникновению густого задымления.

Задымленность помещений и путей эвакуации при пожарах часто является основной причиной гибели людей, потери материальных ценностей, значительно усложняет действия пожарно-спасательных подразделений. Здания повышенной этажности, гостиницы, больницы оборудуют системами противодымной защиты, использующими различные варианты приточно-вытяжной вентиляции. Однако подавляющее большинство жилых и общественных зданий такой защиты не имеет.

Большое практическое значение имеет борьба с задымлением на начальной стадии пожара в небольших помещениях жилых и административных зданий, производственных и складских помещениях при неразвившемся очаге пожара. Актуальность этого вопроса в настоящее время становится все значительнее в связи с расширением использования материалов и изделий на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества дыма. Сгорание даже незначительного количества подобных материалов приводит к потере видимости и существенно усложняет обнаружение очага пожара и его подавление. Отсутствие эффективных средств борьбы с задымлением в ряде случаев является причиной перехода пожара в развитую стадию.

Снижение густоты дыма и повышение дальности видимости до требуемых 3...6 м может быть достигнуто путем дымоудаления и дымоосаждения.

Основным способом осаждения продуктов горения при пожарах является подача с помощью пожарных стволов распыленных струй воды в аварийное помещение. Для дымоудаления используют переносные пожарные дымососы, находящиеся на вооружении каждого оперативно-тактического пожарно-спасательного подразделения МЧС ДНР. Эффективность дымоосаждения с использованием ручных пожарных стволов – низкая вследствие малой дисперсности и точности подачи распыленной воды. В то же время дымососы не в состоянии обеспечить увлажнения задымленного помещения, осаждения продуктов горения и, как следствие, снижения температуры и повышения дальности видимости. Одновременное использование пожарных стволов и дымососов приводит к росту количества задействованного личного состава, что является нежелательным, особенно при ликвидации больших пожаров.

Поэтому модернизация существующих и создание новых высокопродуктивных устройств, которые объединяли бы в себе подачу тонкораспыленной воды, равномерно заполняющей объем аварийного помещения, и нагнетание свежего воздуха в задымленное помещение, является актуальной задачей, требующей дальнейших исследований.

НИИГД «Респиратор» разработано устройство дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды (УДТВ). УДТВ представляет собой интегрированное устройство, совмещающее функции осаждения и абсорбции продуктов горения, снижения температуры в задымленных помещениях и повышения видимости. При подаче воздушно-водяного потока в аварийное помещение с помощью УДТВ твердые частицы дыма оседают вследствие увлажнения, температура в помещении снижается, увеличивается видимость, уменьшается концентрация некоторых растворимых в воде токсичных продуктов горения. Тем самым снижается угроза жизни спасаемых людей и выполняющих боевые действия пожарных.

Анализ последних публикаций. В работах [1-3] описаны конструкция и принцип действия различных устройств по подаче распыленной воды в аварийное помещение, однако отсутствует обоснование параметров этих устройств.

В работах [4, 5] проведены экспериментальные исследования параметров устройства для осаждения продуктов сгорания и снижения температуры в задымленном помещении, разработанного Львовским государственным университетом безопасности жизнедеятельности.

В работах [6, 7] описано устройство дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды УДТВ, разработанное НИИГД «Респиратор». Представлены теоретическая модель снижения задымленности в помещении при подаче воздушно-водяной смеси и полученные на ее основе параметры устройства. Однако экспериментальное подтверждение этих параметров отсутствует.

Цель исследований – проведение испытаний опытного образца устройства дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды УДТВ с целью экспериментального подтверждения его параметров.

Изложение результатов исследований. Исследования проводили в тепловой камере внутренним объемом 106 м^3 на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор» в соответствии с планом эксперимента было испытано устройство для осаждения продуктов горения и улучшения видимости в задымленных помещениях УДТВ на базе переносного пожарного дымососа ДПЭ-7 (см. рисунок).

Экспериментальные исследования проводили для:

- определения дальности видимости в задымленном помещении после работы устройства;
- определения расхода воды из насадков устройства.

В тепловой камере размерами $8620 \times 5230 \times 3740 \text{ мм}$ с внутренним объемом 106 м^3 создавался модельный очаг пожара класса 1А, сгорание которого обеспечивало в камере температурный режим, близкий к стандартному в соответствии с ДСТУ Б В.1.1-4-98.

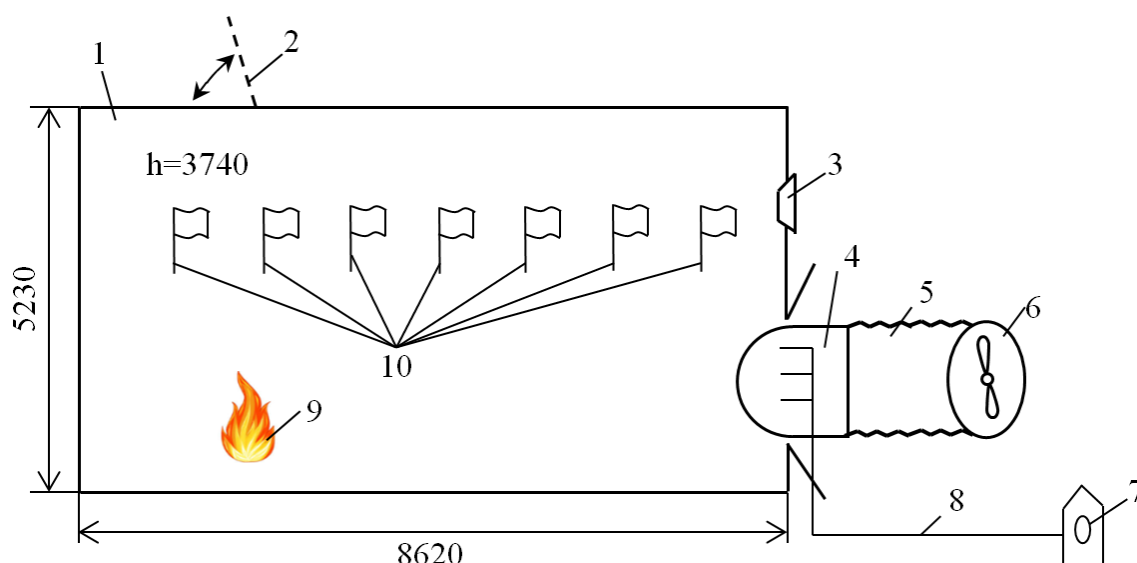


Схема проведения экспериментальных исследований:

1 – тепловая камера; 2 – оконный проем; 3 – смотровое окно; 4 – устройство с насадками УДТВ; 5 – вентиляционный рукав; 6 – дымосос ДПЭ-7; 7 – пожарный автомобиль АЦ40 (130) 63Б; 8 – пожарный рукав; 9 – модельный очаг пожара; 10 – флажки-метки

Для увеличения задымленности камеры вместо древесины использовали автомобильную шину. Масса шины (синтетический каучук) в пересчете по теплотворной способности на древесину равна $m_{ш} = 0,35 m_{др}$, где $m_{др}$ масса древесины в модельном очаге 1А.

Дымообразующая способность синтетического каучука как основного материала шины $10,82 \text{ м}^3/\text{кг}$, что в 1,4 раза больше, чем у древесины.

Шину размещали в стальном противне класса 3А размером $635 \times 635 \times 100$ мм. Перед испытанием в противень наливали $(3,0 \pm 0,2)$ л дизельного топлива. Поджог осуществляли электронагревательным устройством с дистанционным управлением.

На почве камеры были заранее установлены флажки-метки на расстоянии 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 м от смотрового окна, через которое их освещали фонарем с лампой накаливания мощностью 21 Вт.

Нагнетание свежего воздуха (удаление продуктов сгорания), а также подачу в камеру распыленной воды осуществляли с помощью устройства УДТВ, размещаемого в дверном проеме камеры. Воду для распыления подавали по пожарному рукаву Ду 51 мм от пожарного автомобиля АЦ40 (130) 63 Б.

На всех этапах исследования зажигали модельный очаг.

На первом этапе через 5 мин наступало полное задымление камеры, клубы черного дыма выходили через неплотности арочного перекрытия крыши камеры. После чего открывали оконный проем (400×300 мм) и наблюдали самопроизвольное удаление дыма из камеры. Фонарем освещали метки на полу

камеры и определяли изменение видимости. Установлено, что во время горения модельного очага задымленность в камере была плотной. При открывании оконного проема снижение задымленности и улучшение видимости с 1 до 6 м произошло за промежуток времени $\tau_1 = 15$ мин.

На втором этапе оконный проем открыт, а в зону горения дымососом ДПЭ-7 нагнетали свежий воздух. Одновременно фонарем определяли видимость, освещая флажки-метки.

Установлено, что промежуток времени, в течение которого видимость в камере возросла до 6 м, – $\tau_2 = 8$ мин.

На третьем этапе испытаний установлено, что во время горения модельного очага пожара задымленность была плотной, а в условиях закрытого оконного проема и удаления продуктов горения из камеры путем отсоса с помощью дымососа ДПЭ-7 промежуток времени, на протяжении которого видимость увеличилась с 1 до 6 м, – $\tau_3 = 10$ мин.

Четвертый этап испытаний проводили в условиях открытого оконного проема и нагнетания в камеру воздушно-водяного потока, создаваемого УДТВ с одной включенной насадкой.

Стандартный напор на насосе ПН-40У на пожарной автоцистерне 0,3...0,4 МПа. Длина пожарного рукава Ду 51 была 20 м. Расход воды через одну насадку 1,3 л/с.

Промежуток времени, в течение которого видимость возросла с 1 до 6 м, – $\tau_4 = 5,5$ мин.

На пятом этапе испытаний в условиях открытого оконного проема в камеру нагнетали воздушно-водяную смесь, создаваемую устройством с двумя насадками, расход воды из которых был 2,6 л/с.

Промежуток времени, в течение которого видимость увеличилась до 6 м, – $\tau_5 = 4,2$ мин.

На шестом этапе испытаний воздушно-водяную смесь подавали в камеру устройством с тремя насадками с общим расходом воды 3,9 л/с. Время улучшения видимости – $\tau_6 = 4$ мин (см. таблицу).

Результаты экспериментальных исследований и расчетные значения

Этап	Параметры			
	Расход воды q , л/с	Промежуток времени, за который дальность видимости в камере возросла с 1 до 6 м, τ_c , мин		Общее количество израсходованной воды $Q = q \tau$, л
		По результатам эксперимента	Расчетные значения	
I	–	15,0	–	–
II (нагнетание)	–	8,0	–	–

Окончание

Этап	Параметры			
	Расход воды q , л/с	Промежуток времени, за который дальность видимости в камере возросла с 1 до 6 м, τ_c , мин		Общее количество израсходованной воды $Q = q \tau$, л
		По результатам эксперимента	Расчетные значения	
III (отсос)	–	10,0	–	–
IV (одна насадка)	1,3	5,5	5,0	429
V (две насадки)	2,6	4,2	3,5	655
VI (три насадки)	3,9	4,0	2,8	936

Расчет времени улучшения видимости проводили по зависимости, полученной в работе [7]:

$$\tau = -\frac{1}{1,036b} \ln \frac{V_{S0}}{V_S}, \quad (1)$$

где b – комплексный параметр, зависящий от характеристик продуктов горения и капель воды, подаваемой для осаждения;

V_{S0}, V_S – видимость в задымленном помещении, м, соответственно начальная и конечная.

Проведя анализ данных, полученных в результате экспериментальных исследований (см. таблицу), можно сделать выводы:

- экспериментально подтверждена эффективность разработанного устройства в борьбе с таким опасным фактором пожара, как задымление;
- полученные ранее аналитические зависимости для определения интенсивности и времени подачи тонкораспыленной воды в аварийное помещение в целях повышения видимости нашли экспериментальное подтверждение;
- по сравнению с естественной вентиляцией применение устройства на отсос ускорило процесс удаления дыма из аварийного помещения в 1,5 раза, на нагнетание практически в 2 раза, а при дополнительной подаче распыленной воды с помощью одного насадка (расход воды 1,3 л/с) практически в 3 раза. Дальнейшее увеличение количества насадков, а тем самым расхода подаваемой жидкости не привело к ощутимому результату. Так, при использовании двух насадков (расход воды 2,6 л/с) время удаления дыма из аварийного помещения

сократилось на 25,6 %, при использовании трех (расход воды 3,9 л/с) – на 27,3 %.

Выводы. Разработанное устройство УДТВ – эффективное средство осаждения продуктов горения и улучшения видимости в задымленном аварийном помещении. Способ интегрированного дымоудаления и дымоосаждения имеет преимущества перед способами, применяемыми в настоящее время пожарно-спасательными подразделениями – использование дымососов и пожарных стволов.

Внедрение разработанного устройства в пожарно-спасательных подразделениях МЧС позволит повысить эффективность их действий, снизит угрозу жизни спасаемых людей и ведущих боевые действия пожарных.

Список литературы / References

1. Луц, В.І. Тактико-технічні характеристики насадки-розприскувача для дрібнодисперсного розпорошення води з метою осадження продуктів горіння / В.І. Луц, П.І. Мельник // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012. – № 21. – С. 111 – 115.

Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Taktyko-tekhnicni kharakterystyky nasadky-rozpryskuvacha dlia dribnodispersnogo rozporoshennia vody z metoiu osadzhennia produktiv gorinnia* [Performance characteristics of the nozzle-sprayer for fine-dispersed water atomization on purpose of precipitation of the combustion products]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk.prats'* [Fire safety: proc. of scientific papers]. L'viv, LDU BZhD Publ., 2012, no. 21, pp. 111 – 115.

2. Луц, В.І. Підвищення ефективності застосування переносних пожежних димовсмоктувачів / В.І. Луц, О.В. Лазаренко, Н.О. Штангрет // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – № 28. – С. 88 – 94.

Lushch, V.I., Lazarenko, O.V., Shtangret, N.O. *Pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia perenosnykh pozhezhnykh dymovsmoktuvachiv* [Higher efficiency of the use of portable fire smoke exhausters]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk.prats'* [Fire safety: proc. of scientific papers]. L'viv, LDU BZhD Publ., 2016, no. 28, pp. 88 – 94.

3. Шмулевцов, И.А. Выбор оптимальных режимов работы устройства по доставке распыленной воды в очаг пожара / И.А. Шмулевцов. // Чрезвычайные ситуации: образование и наука: междунар. науч.-практ. журн. – Гомель: ГИИ МЧС Республики Беларусь, 2012. – Т. 7, № 1. – С. 34 – 38.

Shmulevtsov, I.A. *Vybor optimal'nykh rezhimov raboty ustroystva po dostavke raspylennoy vody v ochag pozhara* [Choice of best performances of operation of a device for delivery of the sprayed water to a seat of fire]. *Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka. Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal – Emergency situations: education and science. International theoretical and practical journal*. Homel', GII MChS Respubliki Belarus' Publ., 2012, vol. 7, no. 1, pp. 34 – 38.

4. Чорнобай, В.А. Експериментальні дослідження використання пожежного димовсмоктувача для подачі повітряно-водяного струменя в

задимлене приміщення / В.А. Чорнобай, В.І. Луц // Теорія і практика ліквідації надзвичайних ситуацій: зб. тез всеукраїнської наук.-практ. конф. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – С. 128 – 130.

Chornobai, V.A., Lushch, V.I. *Eksperymental'ni doslidzhennia vykorystannia pozhezhnogo dymovsmoktuvacha dlia podachi povitriano-vodianogo strumenia v zadymlene prymishchennia* [Experimental investigations of the use of the fire smoke exhauster for the supply of the air-water stream into the premise screened with smoke]. *Teoriia i praktyka likvidatsii nadzvychaynykh situatsii: zb. tez vseukrains'koi nauk.-prakt. konf.* [Theory and practice of elimination of emergency situations: collected theses of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference]. L'viv, LDU BZhD Publ., 2013, pp. 128 – 130.

5. Луц, В.І. Лабораторні дослідження пристрою подачі повітряно-водяного струменю для осадження продуктів горіння, зниження температури та покращення видимості / В.І. Луц, П.І. Мельник // Технологія устаткування лісовиробничого комплексу: зб. наук.-техн. праць НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21 (8) – С. 86 – 92.

Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Laboratorni doslidzhennia prystroiu podachi povitriano-vodianogo strumeniu dlia osadzhennia produktiv gorinnia, znyzhennia temperatury ta pokrashchennia vydymosti* [Laboratory investigations of the device for supply of the air-water stream to precipitate the combustion products, to decrease the temperature and to increase the visibility]. *Tekhnologiiia ustatkuvannia lisovyrobnychogo kompleksu: zb. naukovo-tekhnichnykh prats' NLTU Ukrainy* [Technology of equipping the timber industrial complex: collected scientific-technical papers of the NLTU of the Ukraine]. 2011, issue 21 (8), pp. 86 – 92.

6. Богомаз, А.М. Снижение задымленности в помещении при подаче воздушно-водяной смеси / А.М. Богомаз, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4(53). – С. 15 – 23.

Bogomaz, A.M., Dikenshteyn, I.F. *Snizheniye zadymlenosti v pomeshchenii pri podache vozdushno-vodyanoy smesi* [Reduction of smoke content in a premise by supply of the air-water mixture]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 4 (53), pp. 15 – 23.

7. Богомаз, А.М. Параметры устройства для дымоосаждения в аварийных помещениях / А.М. Богомаз, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 2(54). – С. 20 – 30.

Bogomaz, A.M., Dikenshteyn, I.F. *Parametry ustroystva dlya dymoosazhdeniya v avariynykh pomeshcheniyakh* [Parameters of a device for smoke precipitation in accidental premises]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 2 (54), pp. 20 – 30.

Andrey Mikhailovich Bogomaz, postgraduate student; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

Vadim Grigoryevich Synkov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: vasyn41@mail.ru;

Igor Felixovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

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) 332-78-41

A SMOKE SUPPRESSION DEVICE IN ACCIDENTAL PREMISES

Purpose. Carrying-out the tests of the prototype of the smoke suppression device with the use of the fine-air water for the purpose of the experimental evidence of its parameters.

Methods. Experimental investigations. Comparison of the experimental data with the data obtained earlier as a result of analytical investigations.

Results. The effectiveness of the device worked out in the struggle with such a hazardous factor of the fire as smoke generation has been confirmed experimentally. In comparison with the natural ventilation the use of the exhaust device has accelerated the process of smoke removal from the accidental premise one-and-a-half times, that one for pumping – practically two times greater and by the additional feed of the fire air water using one nozzle (water consumption is 1.3 l/s) three times greater. The further increasing of the nozzle number and therefore of consumption of water being fed has not led to the tangible result. Thus, by the use of two nozzles (water consumption is 2.6 l/s) the time of the smoke removal from the accidental premise has been decreased by 25.6 %, that one by the use of three nozzles (water consumption is 3.9 l/s) – by 27.3 %.

Scientific novelty. The analytical dependences for determination of the intensity and time of feed of the fine-air water into the accidental premise with the aim of the higher visibility obtained earlier have found the experimental verification.

Practical value. The introduction of the device worked out in the fire-rescue subdivisions of the Ministry of Extraordinary Situations will allow increasing the effectiveness of their activity, lowering danger to life of the people being saved and of the fighting firemen.

Keywords: *experimental investigations; visibility; smoke precipitation; smoke sucker; smoke suppression; water consumption; smoke generation; air-water flow; integrated smoke suppression device; fine-air water.*

УДК 622.822.7:[614.842.612:614.844.2], „Завесы”

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*

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС ДЛЯ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ СКЛАДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Разработка методики расчета параметров водяных завес, применяемых в составе противопожарных комплексов для защиты подземных складов взрывчатых материалов.

Методика. Аналитические исследования и математические расчеты параметров водяных завес для противопожарной защиты складов взрывчатых материалов.

Результаты. Рассмотрена пожарная опасность подземных складов взрывчатых материалов в угольных шахтах. Разработана методика расчета параметров водяных завес, входящих в состав противопожарного комплекса защиты склада. Выполнен расчет повышения огнестойкости склада на примере использования установки водяного пожаротушения «Бус-1», разработанной НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР.

Научная новизна. Полученная методика позволяет обосновать параметры водяных завес, используемых для противопожарной защиты подземных складов взрывчатых материалов.

Практическая значимость. Применение установок «Бус-1» в составе противопожарных комплексов для защиты складов взрывчатых материалов сокращает расход воды при пожаре (по сравнению с другими установками, например ВВР-1), повышает огнестойкость склада и обеспечивает возможность его разгрузки.

Ключевые слова: пожар; склад взрывчатых материалов; локализация; водяная завеса; коэффициент пропускания; эффективность; противопожарный комплекс.

Постановка проблемы. Взрывчатые материалы (ВМ), применяемые при буровзрывных работах в шахтах, хранятся в подземных складах. Склад состоит из выработок, представляющих собственно склад, в которых расположены камеры (ячейки) для хранения ВМ, а также подводящих выработок и вспомогательных камер (рис. 1). Предельная емкость подземных расходных складов – не более трехсуточного запаса взрывчатых веществ (ВВ) и десятисуточного запаса средств взрывания (СВ).

Основной причиной пожаров на складах ВМ являются возгорания, возникающие в подводящих выработках и движущиеся вместе с вентиляционной струей воздуха на склад.

Из промышленных ВВ наиболее широко в шахтах применяют аммониты, в состав которых входят тротил, аммиачная селитра и хлористый натрий.

В состав ВВ, хранящихся на складах ВМ, входит гремучая ртуть (фульминат ртути) $H_g(CNO)_2$, разлагающаяся при длительном нагревании выше 323 К, поэтому на складе необходимо поддерживать определенную температуру.

$$T_{\text{скл}} < 323 \text{ К.}$$

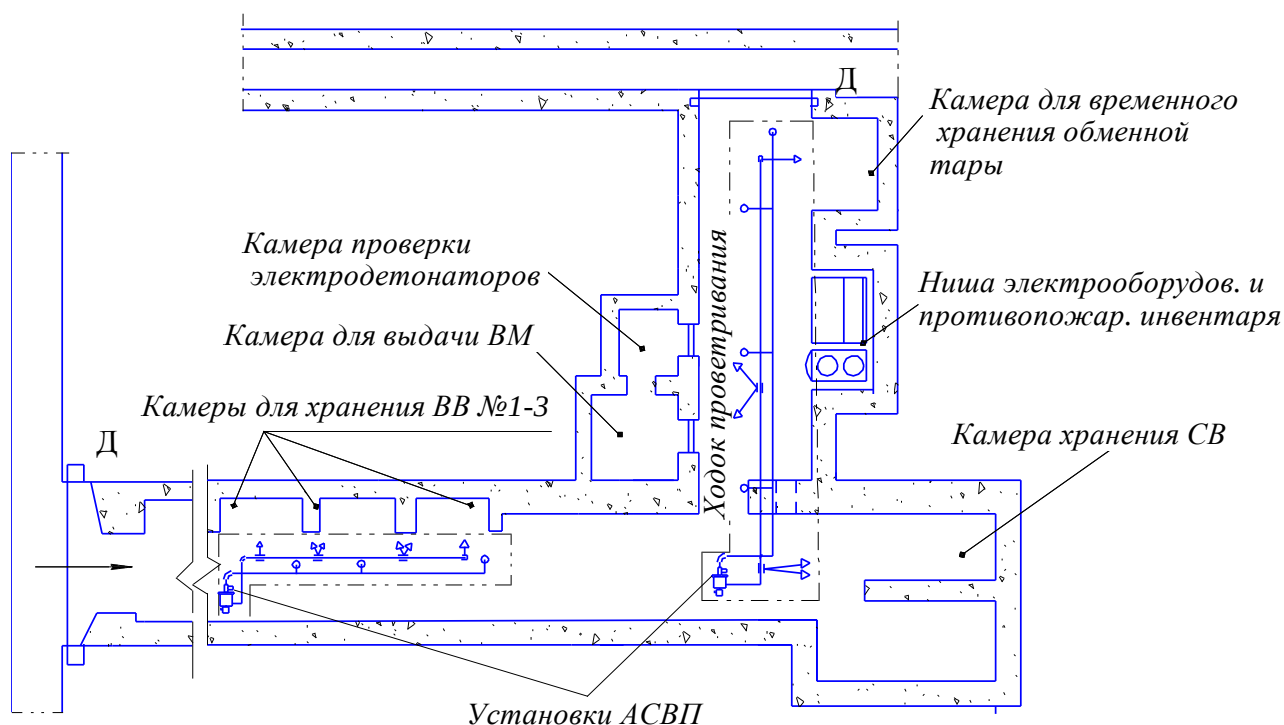


Рис. 1. Схема размещения систем АСВП в складе ВМ гор. 824 м шахты «Южнодонбасская»

Допустимо лишь кратковременное перегревание, но не выше точки интенсивного разложения, равной 433 К, после чего возможна детонация.

$$T_{\text{скл}}^{\text{пер}} \leq 433 \text{ К.}$$

Температура вспышки аммонита не превышает 573 К.

$$T_{\text{всп}}^{\text{ам}} \leq 573 \text{ К.}$$

Согласно НАПБ Б.01.003-2004, действовавшему до 2016 г., склады ВМ должны быть защищены автоматическими установками (системами) водяного пожаротушения АУВП (АСВП) модульного типа. Количество модулей определяют по количеству пожароопасных ячеек (камер) склада. Количество оросителей в АУВП обусловлено необходимым расходом диспергированной воды (0,15 л/с на 1 м² защищаемой площади).

В принятых в 2016 г. Правилах пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР требование об оснащении склада ВМ АСВП снято. Согласно п. 5.6.2 этих Правил в начале подводящих выработок (со стороны входа и выхода) должны быть установлены противопожарные двери и автоматические установки локализации и тушения пожара водой (далее – АСЛТ), то есть организованы противопожарные комплексы.

АСЛТ на складах ВМ в настоящее время отсутствуют.

При пожаре вблизи склада ВМ, при возможности, в первую очередь необходимо вынести ящики со взрывчатыми веществами и коробки с детонаторами на безопасное расстояние. Общее время эвакуации склада $\tau_{эв}$, мин

$$\tau_{эв} = \max \left(\frac{3G_{ВВ}}{\frac{n_Б m_Б}{\tau_1 + \tau_2}}, \frac{10G_Д}{\frac{n_Д m_Д}{\tau_1 + \tau_2}} \right), \quad (1)$$

где $G_{ВВ}$ – суточный расход ВВ по шахте, кг;

$m_Б$ – масса ящика с ВВ, переносимого одним горнорабочим, кг;

$n_Б$ – количество горноспасателей (членов ВГК, ШГС), занятых выносом ВВ;

τ_1, τ_2 – время движения горнорабочего с грузом ВВ или детонаторов от склада на безопасное расстояние и обратно соответственно, мин;

$G_Д$ – количество детонаторов, расходуемых на шахте в сутки;

$m_Д$ – количество детонаторов, переносимых одним горнорабочим;

$n_Д$ – количество горнорабочих (горноспасателей), занятых выносом со склада детонаторов.

Тогда необходимая огнестойкость противопожарного комплекса

$$\tau_{огн} \geq \tau_{эв}. \quad (2)$$

Высокая теплопроводность металлической противопожарной двери обуславливает низкий предел огнестойкости. Так, дверь из листовой стали толщиной 6,5 мм при нагревании уже к 30-й минуте деформируется настолько, что отходит от рамы на 10...12 см. Достаточный предел огнестойкости имеют стальные двери, покрытые теплоизолирующими материалами. Так, двери с металлическим каркасом с теплоизолирующим покрытием из асбестокартона или соевелитовых плит имеют высокий предел огнестойкости ($\tau_{огн} > \tau_{эв}$). С использованием противопожарного комплекса, включающего водяную завесу, предел огнестойкости возрастает.

Однако методика расчета параметров создаваемой завесы, обеспечивающей выполнение условия (2), отсутствует.

Если выполнить эвакуацию склада невозможно из-за высокой температуры или по другим причинам, то необходимо закрыть и уплотнить противопожарные двери со стороны подводящих выработок, установить перед ними водяные завесы, создаваемые установками тушения и локализации пожаров распыленной водой, и вывести людей из всех прилегающих к складу выработок, в том числе выработок околоствольного двора.

Цель исследований состоит в разработке методики расчета параметров водяных завес, входящих в состав противопожарного комплекса для защиты подземных складов ВМ.

Анализ последних исследований и публикаций. Специальных исследований, посвященных расчету параметров водяной завесы, входящей в состав противопожарного комплекса, защищающего подземные склады ВМ, не обнаружено. Единственная имеющаяся публикация [1] касается расчета параметров и обустройства систем АСВП внутри склада в рамках требований отмененного в ДНР нормативного документа НАПБ Б.01.003-2004.

О применении водяных завес для локализации пожаров и экранирования тепловых потоков вблизи очага пожара известно давно. Очевидным преимуществом водяных завес является то, что в отличие от противопожарных стен они не создают препятствий для движения людей и перемещения механизмов.

В то же время, несмотря на возрастающую популярность этого средства локализации, о его эффективности в качестве теплового экрана известно недостаточно.

В работах А.Г. Виноградова [2-5] приведена математическая модель взаимодействия теплового излучения с распыленной водой и на ее основе разработана методика расчета коэффициента пропускания теплового излучения монодисперсной водяной завесой.

Из существующих моделей экранирования теплового излучения мелкодисперсной водяной завесой модель А.Г. Виноградова наиболее адекватно описывает реальные физические процессы и может быть основой для дальнейших исследований.

Материалы и результаты исследований. Коэффициентом пропускания водяной завесы H называется отношение интенсивности прошедшего через завесу теплового излучения к интенсивности падающего на нее теплового излучения. Для пространственно однородного излучения это соотношение можно определить и через тепловые потоки соответственно

$$H = \frac{J_2}{J_1} = \frac{W_2}{W_1}. \quad (3)$$

В работе [3] для определения коэффициента пропускания водяной завесы предложена следующая зависимость:

$$H = \exp[-0,734(1 - \eta)nd^2l], \quad (4)$$

где η – коэффициент пропускания капли;

n – концентрация капель в завесе, м^{-3} ;

d – диаметр капли, м ;

l – глубина завесы, м .

Количество капель, ежесекундно образуемых в завесе:

$$N = \frac{6q_b n_p}{\pi d^3}, \quad (5)$$

где q_B – расход воды через один распылитель АСЛТ, м³/с;

n_p – количество работающих распылителей.

Это количество капель распределяется в объеме

$$V = U_0 S_{зав}, \quad (6)$$

где U_0 – скорость капель на выходе из распылителя, м/с;

$$U_0 = \frac{4q_B}{\pi d_0^2}; \quad (7)$$

d_0 – диаметр выходного отверстия распылителя, м;

$S_{зав}$ – общая площадь экранирования АСЛТ, м²;

$$S_{зав} = \frac{\pi D_{зав}^2}{4}, \quad (8)$$

где $D_{зав}$ – диаметр образуемой завесы, м.

$$V = \frac{4q_B \pi D_{зав}^2}{4\pi d_0^2} = \frac{q_B D_{зав}^2}{d_0^2}. \quad (9)$$

Тогда концентрация капель

$$n = \frac{N}{V} = \frac{6q_B n_p d_0^2}{\pi d^3 q_B D_{зав}^2} = \frac{6n_p d_0^2}{\pi d^3 D_{зав}^2}. \quad (10)$$

Отсюда из уравнения (3) имеем

$$H = \exp \left[-0,734(1 - \eta) \frac{6n_p d_0^2}{\pi d^3 D_{зав}^2} d^2 l \right] = \exp \left[-0,734(1 - \eta) \frac{6n_p d_0^2 l}{\pi d D_{зав}^2} \right]. \quad (11)$$

Коэффициент пропускания сферической капли η в работе [4] определен через средние интенсивности излучения

$$\eta = \frac{J_{out}}{0,734 J_I}, \quad (12)$$

где J_{out} – интенсивность проходящего через каплю излучения, усредненная по сечению капли, $\pi D^3/4$.

Путем интегрирования по формуле (11) в диапазоне температур 700...1800 К с шагом 100 К построен график зависимости $\eta = \eta(t)$, а его обработка с помощью программы Curve Expert позволила получить следующую эмпирическую формулу:

$$\eta = 1,276 - 5,477 \cdot 10^{-3} T_{\text{BX}} + 9,955 \cdot 10^{-6} T_{\text{BX}}^2 - 1,031 \cdot 10^{-8} T_{\text{BX}}^3 + 6,845 \cdot 10^{-12} T_{\text{BX}}^4 - 2,582 \cdot 10^{-15} T_{\text{BX}}^5 + 4,059 \cdot 10^{-17} T_{\text{BX}}^6, \quad (13)$$

где T_{BX} – температура на входе в завесу, К, зависящая от расстояния до фронта горения L , м, и температуры на фронте пожара $T_{\text{ф}}$, К;

$$T_{\text{BX}} = f(L, T_{\text{ф}}). \quad (14)$$

В соответствии с работами [5, 6]

$$T_{\text{BX}} = T_0 + (T_{\text{ф}} - T_0) \exp[-\alpha_T L], \quad (15)$$

где α_T – коэффициент теплопередачи от потока пожарных газов к поверхности выработки.

Таким образом, коэффициент пропускания водяной завесы зависит от её расстояния до очага пожара.

При возникновении подземного пожара, угрожающего складу ВМ, в качестве АСЛТ можно использовать разработанную в НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР установку водяного пожаротушения для оперативной локализации подземных пожаров «Бус-1». Установка компактна, легко переносится и оперативно устанавливается в требуемых местах (рис. 2).

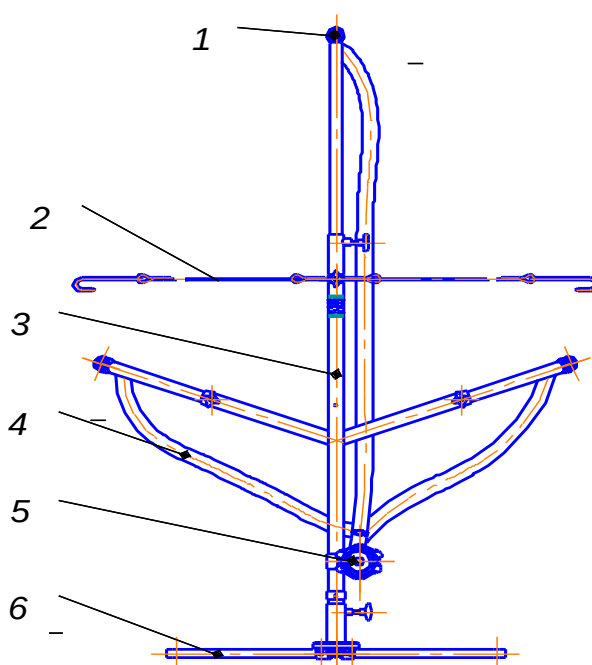


Рис. 2. Установка водяного пожаротушения для оперативной локализации подземных пожаров «Бус-1»:

1 – распылитель; 2 – трос с крюком; 3 – стойка; 4 – резиновый шланг;
5 – вводы для подключения пожарного рукава; 6 – основание с четырьмя ножками

Установку размещают в аварийной выработке перед входом в подводящую выработку склада ВМ (табл. 1).

Таблица 1

Техническая характеристика установки

Назначение	Норма
Давление воды, МПа, не менее	0,4
Расход воды, м ³ /ч, не менее	12,0
Глубина водяной завесы, м, не менее	5,0
Диаметр распыления воды из одного распылителя, м, не менее	3,0
Габариты, мм, не более	1150×200×1200
Масса, кг, не более	15,0

По формулам (11) – (14) рассчитаем коэффициент пропускания для водяной завесы в составе противопожарного комплекса. Завеса оборудована с применением установки «Бус-1» с параметрами:

$q_v = 0,0011 \text{ м}^3/\text{с}$; $d_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $D_{\text{зав}} = 6,2 \text{ м}$; $d = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $l = 5 \text{ м}$; $h_p = 3$; $T_{\text{др}} = 700 \dots 1700 \text{ К}$ (табл. 2).

Таблица 2

Расчет коэффициента пропускания завесы противопожарного комплекса

$T, \text{ К}$	$\eta(t)$	H
700	0,05191	0,875
800	0,041	0,876
900	0,05093	0,879
1000	0,07633	0,884
1100	0,1129	0,889
1200	0,15674	0,895
1300	0,20408	0,901
1400	0,2512	0,906
1500	0,29413	0,931

Выводы. Таким образом, наличие противопожарного комплекса, состоящего из водяной завесы и противопожарной двери, повышает огнестойкость склада ВМ в зависимости от расстояния до очага пожара от 12,5 до 9 %.

Повышение огнестойкости склада позволяет обеспечить при пожаре его выгрузку и удаление ВВ и СВ на безопасное расстояние.

Список литературы / References

1. Автоматическая система пожаротушения для складов взрывчатых материалов / Ю.Н. Ющенко, В.В. Мамаев, И.Ф. Дикенштейн, А.Н. Прима // Проблемы снижения риска возникновения надзвичайних ситуацій в Україні: матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф. рятувальників. – Київ: УкрНДІПБ, 2006. – С.181 – 185.

Yushchenko, Yu.N., Mamayev, V.V., Dikenshteyn, I.F., Prima, A.N. *Avtomaticheskaya sistema pozharotusheniya dlya skladov vzryvchatykh materialov* [An automatic fire-fighting system for explosive materials depots]. *Problemy znyzhennia ryzyku vynyknennia nadzvychnykh sytuatsii v Ukraini: materialy VII Vseukr. naukovo-prakt. konf. riatsuval'nykiv* [Problems of decrease of risk emergencies origin in the Ukraine: materials of the 7th All-Ukrainian theoretical and practical conference of rescuers]. Kyiv, UkrNDIPB, 2006, pp. 181 – 185.

2. Виноградов, А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45 – 56.

Vinogradov, A.G. *Metodika raschyeta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves* [Methods of calculation of shielding properties of water screens]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2014, vol. 23, no.1, pp. 45 – 56.

3. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 73 – 82.

Vinogradov, A.G. *Pogloshcheniye teplovogo izlucheniya vodyanyimi zavesami* [Thermal radiation absorprion by water screens]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 73 – 82.

4. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Ч. 2 / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 4. – С. 72 – 84.

Vinogradov, A.G. *Pogloshcheniye teplovogo izlucheniya vodyanyimi zavesami. Ch. 2* [Thermal radiation absorption by water screens. Part 2]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 72 – 84.

5. Виноградов, А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 6. – С. 74 – 84.

Vinogradov, A.G. *Ekranirovaniye teplovogo izlucheniya polidispersnymi zavesami* [Shielding the thermal radiation by the polydisperse water screens]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 74 – 84.

6. Булва, И.В. Применение дренчерной водяной завесы в качестве противопожарной преграды / И.В. Булва, А.П. Еремин, А.Д. Булва //

Чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. – 2016. – № 2 (40). – С. 42 – 47.

Bulva, I.V., Yeryomin, A.P., Bulva, A.D. *Primeneniye drenchnoy vodyanoy zavesy v kachestve protivopozharnoy pregrady* [Use of a drencher water screen as a fire stop]. *Chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye i likvidatsiya – Emergencies: prevention and elimination*, 2016, no. 2 (40), pp. 42 – 47.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 28.01.2019

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

USE OF WATER SCREENS FOR FIRE PROTECTION OF UNDERGROUND EXPLOSIVE MATERIALS DEPOTS

Purpose. Working-out the methods for calculation of parameters of the water screens being used in the composition of the fire-fighting complexes to protect the underground depots of the explosive materials.

Methods. Analytical investigations and mathematical calculations of water screen parameters for fire protection of the depots of the explosive materials.

Results. The fire hazard of the underground depots of the explosive materials has been considered. The methods for calculation of the parameters of the water screens being included in the composition of the fire-fighting complex for protection of the depot has been worked out. The calculation of the higher fire resistance of the depot has been fulfilled by way of example of the use of the “Быс-1” water fire-extinguishing installation developed by the NIIGD “Respirator” of the Ministry of Emergency Situations of the Donetsk People’s Republic.

Scientific novelty. The obtained methods allow substantiating the water screens parameters being used for protection of the underground depots of the explosive materials.

Practical value. The use of the “Быс-1” installations in the composition of the fire-fighting complexes for protection of the depots of the explosive materials reduces the water consumption during the fire (in comparison with other installations as BBP-1 for example), raises the fire resistance of the depot and guarantees the possibility of its unloading.

Keywords: fire; depot of explosive materials; localization; water screen; transmission factor; efficiency; fire-fighting complex.

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 622.822.22:622.693.26

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

МИНИМАЛЬНЫЕ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫЕ РАЗМЕРЫ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Цель. Установление минимальной толщины скопления породного отвала угольной шахты, исключающей ее самовозгорание, на основе ранее проведенных исследований по изучению кинетики окисления.

Методика основана на математической модели самонагрева материалов за счет химических реакций окисления и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор».

Результаты. Предложено использование решения линеаризованного уравнения неизотермической кинетики хемосорбции газов микропористыми сорбентами для определения минимальной толщины скопления породно-угольной массы, достигающей критического значения температуры самонагрева с учетом теплопотерь в окружающую среду. Выполнено моделирование процесса самонагрева для смесей породы с различными типами углей. Определены значения минимальной толщины скопления породно-угольной массы, исключающей ее возгорание.

Научная новизна. Даны аналитические зависимости для расчета минимальной толщины породной массы отвалов угольных шахт, исключающей ее самовозгорание.

Практическая значимость. Предложен способ предупреждения самовозгорания отвалов угольных шахт с различной характеристикой породно-угольной массы путем ограничения толщины ее скопления.

Ключевые слова: самовозгорание; толщина скопления материала; коэффициенты теплоотдачи; адсорбция; реакции.

Постановка проблемы. Первые породные отвалы в Донбассе появились с началом разработки угольных пластов, приходящейся на конец XVIII в., когда было заложено несколько шахт, объединенных в Лисичанский рудник, который начал добычу угля в 1796 г. Шахты закладывали вертикальными стволами глубиной порядка 30 м, породу от их проходки и выработок по углю направляли в отвалы. Под отвалы отводили места, не пригодные для строительства либо сельского хозяйства (балки, овраги и т.п.). Отвалы устраивали в отдалении от жилых поселков, так как при низкотемпературном окислении из содержащегося в породе угля, а в нем колчедана, выделялись вредные газы.

Когда рудники были расположены на ровной местности, для отвала породы строили эстакаду, на ней настилали рельсы, с конца эстакады разгружали породу вниз. Затем рельсы прокладывали непосредственно по породе и породу разгружали путем опрокидывания вагонеток. В дальнейшем

эстакаду с рельсовыми путями переносили в стороны, образуя отвал породы веером. Такие отвалы занимали большую площадь, однако были небольшими по высоте и в них не возникали очаги горения, приводящие к выделению вредных газов в значительных количествах.

Там, где за пользование земель взимали высокую плату, отвалам придавали форму конуса. По конусному отвалу укладывали рельсы, а на вершине устанавливали передвижную платформу со шкивом, через который перебрасывали канат. При высоте конуса до 20...30 м самовозгорания в отвалах не наблюдалось, однако с его дальнейшим ростом практически все отвалы начинали гореть.

С 1861 г. количество шахт и соответственно терриконов стало расти гигантскими темпами. Резко увеличившаяся стоимость земельных отводов под поверхность шахт вынудила складывать породу в конусообразные отвалы, которые росли по высоте с каждым днем и повсеместно начали возгораться. К началу 1917 г. несколько сотен терриконов горели по всему Донбассу. При восстановлении шахт после гражданской войны и гитлеровской оккупации почему-то конусные отвалы считали более прогрессивными, чем плоские, хотя они продолжали гореть. И только в начале 70-х годов XX в., когда экологи обратили на это внимание, стали переходить к плоским отвалам, иногда перемежая слои породы слоями глины для изоляции от кислорода. При этом размер слоя породы в плоском отвале, так же, как и в конусном, не допускающий его возгорания, оставался научно необоснованным и принимался волюнтаристическим методом. Документально необходимость сооружения породных отвалов в виде плоского слоя на вновь строящихся шахтах была записана только в Правилах безопасности издания 1973 г.

Анализ последних исследований. Вопросам возгорания породных отвалов посвящено относительно небольшое количество работ [1, 2]. Обычно горящий породный отвал представляется в виде отдельных очагов пожара на его поверхности, в которых в достаточном количестве содержится уголь и другие горючие материалы. Смесь породы и угля представляет собой твердую фазу, а пространство между ними (пустоты и трещины) – газовую фазу, состоящую из вредных веществ и воздуха [2].

Под напором ветра и тепловой депрессии воздух проникает в пустоты горизонтально, теряет кинетическую энергию и через очаг возвращается на поверхность. Предложены уравнения переноса кислорода в фильтрационном потоке, проникающем в пустоты породного отвала, динамики кислорода в неподвижной фазе и температуры, а также температуры в фильтрационном потоке. Дано аналитическое решение для стационарного случая и его анализ. Задача определения пожароопасных размеров скопления материала может быть решена усложнением предложенного решения с учетом времени нагревания материала и отдачи теплоты в окружающую среду, что возможно, но представляет значительные трудности.

Ниже предлагается более простая модель очагового самовозгорания породного отвала, позволяющая тем не менее согласно данным о горючем материале получить аналитическое выражение для расчета допустимого пожаробезопасного размера породного отвала.

Цель настоящей работы – установление минимальной толщины скопления породно-угольной массы, исключающей ее самовозгорание на основании ранее предложенной модели самонагрева материала [3] и результатов исследований коэффициентов теплоотдачи кускового материала в очаге самонагрева [4].

Материалы и результаты исследований. На тепловое самовозгорание породных отвалов влияет кинетика процесса окисления складированных веществ, параметры, характеризующие их структуру и теплофизические свойства, а также условия теплообмена материала с окружающей средой.

Ранее [5] была решена задача неизотермической кинетики адсорбции газов микропористыми сорбентами для случая линеаризации уравнения их нагрева путем замены аррениусовского выражения реакции окисления вещества линейной функцией, как было доказано, что допустимо в диапазоне температур $280\text{ К} < T < 350\text{ К}$ и энергий активаций $500 < E, \text{ Дж/моль} < 30000$.

Решение приведено в работе [3] в виде

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

$$\text{где } \Gamma_v = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1; \quad Bi = \frac{am}{\lambda}; \quad \Gamma_T = \frac{\xi C_{O_2} q k m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad Fo = \frac{a_T t}{m^2}; \quad (2)$$

T и T_0 – текущая и начальная температуры скопления горючего материала, К;

Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты;

ξ – доля реакционной поверхности;

C_{O_2} – концентрация кислорода в материале, моль/м³;

q – теплота реакции окисления, Дж/моль;

k – константа скорости окисления, с⁻¹;

ρ – плотность материала, кг/м³;

c_v – теплоемкость материала при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

m – толщина скопления материала, м;

a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с;

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

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

t – время, с.

Из выражения (1) следует, что динамика температуры скопления материала, подверженного самонагреванию, зависит от двух безразмерных параметров: $\Gamma_T Fo = \ln(T_{кр}/T_0)$, характеризующего температуру материала при $Bi = 0$, и Γ_v , определяющего приток Γ_T и отвод Bi теплоты. Здесь $T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания материала.

Решение (1) относительно t получено в виде

$$\tau_{Bi \neq 0} = -\Gamma_v^{-1} \ln \left[-\left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 - \frac{1}{\Gamma_v} \right) \Gamma_v \right] \frac{\rho c_v T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (3)$$

Если обозначить первый множитель как $\bar{t}$, то выражение (3) запишем в виде

$$\tau_{Bi \neq 0} = -\bar{t} \frac{\rho c_v T_0}{\xi a_{O_2} q k}. \quad (4)$$

Для случая $Bi = 0$ выражение (1) примет вид

$$\ln \frac{T}{T_0} = \Gamma_T Fo. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (5) выражение (2), получим

$$\ln \frac{T}{T_0} = \frac{\xi a_{O_2} q k}{\rho c_v T_0} t, \quad (6)$$

откуда

$$t = \ln \left[\frac{T}{T_0} \right] \frac{\rho c_v T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (7)$$

Из анализа (6) следует, что изменение температуры во времени не зависит от размеров скопления самоокисляющегося материала.

Сравнивая уравнения (3) и (7), нетрудно заметить, что при $\Gamma_v = 1$ ($Bi = 0$) выражение (3) переходит в (7). Таким образом, параметр Γ_v определяет инкубационный период t при наличии теплообмена скопления материала с окружающей средой.

При $Bi = \text{const}$ выражение (4) определяется значением $\bar{t}$. Зависимость $\bar{t} = f(T_{кр}/T_0, \Gamma_v)$ исследована в работе [3]. Показано, что при $\bar{t} \rightarrow \infty$ значение

$$\Gamma_v = \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 \right)^{-1}, \quad \text{т.е.} \quad \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1 = \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 \right)^{-1}. \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (8) выражения для Γ_T и Bi , найдем выражение для толщины скопления материала m , м, в виде

$$m = 3 \frac{\alpha}{\lambda} a B \left/ \left[\frac{1}{(T_{кр} / T_0) - 1} + 1 \right] \right. = \frac{T_{кр} - T_0}{T_{кр}} 3 \frac{\alpha}{\lambda} a B, \quad (9)$$

где $B = \frac{\rho c_v T_0}{\xi C_{O_2} q k}, \text{ с.}$ (10)

Для рассматриваемого в данной работе случая возникновения очагового самовозгорания угля в породном отвале необходимо учесть его долю в общем объеме материала. Тогда вместо уравнения (10) необходимо написать

$$B = \frac{\rho c_v T_0}{\xi C_{O_2} q k \gamma}, \quad (11)$$

где γ – доля угля в общей массе породного отвала.

Примем для примера данные для угля, приведенные в работе [6]: $\rho = 1690 \text{ кг/м}^3$; $\alpha = 0,078, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\lambda = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a = 17,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $T_{кр} = 380 \text{ К}$; $k = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $\gamma = 0,01$. Тогда согласно уравнению (11) параметр B будет равен $5,78 \cdot 10^6 \text{ с}$, а подсчитанное по формуле (9) значение $m = 19 \text{ м}$.

Таким образом, критический размер породного отвала, когда на нем начнут возникать очаги горения, в данном случае равен порядка 20 м.

Для ориентировочных расчетов критической толщины породных отвалов с различными видами углей воспользуемся данными об их характеристиках, взятых из работы [7]. Данные для углей различной степени метаморфизма, а также расчеты толщины породно-угольной массы для них в предположении доли угля в отвале, равной $\gamma = 0,01$, и концентрации кислорода $C_{O_2} = 3 \text{ моль/м}^3$ даны в таблице.

Как следует из представленных в таблице результатов расчетов, максимально допустимые значения толщин породных отвалов при доле в них угля 0,01 равны 17...37 м. В случае увеличения доли угля они будут пропорционально уменьшаться. Поэтому для породной массы отвалов каждой конкретной шахты толщину породного отвала необходимо рассчитывать с учетом ее физико-химических свойств и доли заключенного угля.

Характеристика углей и расчетные значения максимально допустимой толщины породного отвала

Марка угля	E , Дж/моль	V^f , %	$k \cdot 10^3$, $с^{-1}$	$T_{кр}$, К	α , $Вт/(м \cdot К)$	$a \cdot 10^7$, $м^2/с$	ρ , $кг/м^3$	λ , $Вт/(м \cdot К)$	c_v , Дж/К	$q \cdot 10^{-5}$, Дж/моль	ξ	$B \cdot 10^{-8}$, с	m , м
Д	5600	42,9	12,5	360	0,08	1,5	1300	0,3	1400	2,5	0,003	5,7	37
Г	6800	35,6	18	360	0,08	1,5	1300	0,3	1400	1,9	0,0055	3,2	21
Ж	6900	34,1	20	360	0,08	1,5	1300	0,3	1400	1,7	0,0056	3,0	20
К	8800	23,7	22	360	0,08	1,5	1400	0,3	1400	1,6	0,0068	2,6	17,5
ОС	9200	21,4	21	370	0,08	1,5	1500	0,3	1400	1,7	0,0069	2,8	19
Т	13000	11,2	15	380	0,08	1,5	1600	0,3	1400	2,2	0,0062	3,5	23,5
А	17000	7	12	380	0,08	1,5	1650	0,3	1400	2,6	0,0054	4,2	28,5

Выводы. Предложено на основании разработанной ранее математической модели неизотермической кинетики хемосорбции газов и их нагревания и универсального комплексного показателя пожароопасности выражение для расчета максимального размера породного отвала, исключающего переход очагового самонагревания в возгорание.

Список литературы / References

1. Греков, С.П. Тепломассообменные процессы в самовозгорающихся газоотдающих двухфазных средах [Текст] / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Вестник Херсонского национального технического университета: сб. науч. тр. – 2005. – № 22. – С. 124 – 133.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. *Teplomassoobmennyye protsessy v samovozgorayushchikhsya fazootdayushchikh dvukhfaznykh sredakh* [Heat-mass exchange processes in the spontaneously igniting gas recovering two-phase media] [Text]. *Vestnik Khersonskogo national'nogo tekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr.* [Bulletin of the Kherson National Technical University: collected scientific papers]. 2005, no. 22, pp. 124 – 133.

2. Пашковский, П.С. Тепломассообменные процессы при горении породных отвалов [Текст] / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Вестник Херсонского национального технического университета: сб. науч. тр. – 2008. – № 31. – С. 379 – 385.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Teplomassoobmennyye protsessy pri gorenii porodnykh otvalov* [Heat-mass exchange processes during the burning of waste heaps] [Text]. *Vestnik Khersonskogo national'nogo tekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr.* [Bulletin of the Kherson National Technical University: collected scientific papers]. 2008, no. 31, pp. 379 – 385.

3. Универсальный комплексный показатель эндогенной пожароопасности органических веществ [Текст] / С.П. Греков, П.С. Пашковский, А.А. Всякий, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2016. – № 4(53). – С. 24 – 36. – ISSN 2414-5769.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Orlikova, V.P., Vsyakiy, A.A. *Universal'nyy kompleksnyy pokazatel' endogennoy pozharoopasnosti organicheskikh veshchestv* [The universal complex factor of endogenous fire hazard of organic substances] [Text]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 4(53), pp. 24 – 36. – ISSN 2414-5769.

4. Греков, С.П. Расчет коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого вещества [Текст] / С.П. Греков, И.Г. Старикова, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 2(54). – С. 59 – 68. – ISSN 2414-5769.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Glushenko, K.V. *Raschyot koeffitsiyentov teplootdachi v sloye zernistogo veshchestva* [Calculation of heat-transfer coefficients in the layer of a granular substance] [Text]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2017, no. 2(54), pp. 59 – 68. – ISSN 2414-5769.

5. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya: sb. nauch. tr.* [Actual problems of control of the spontaneous combustion of coal: collected scientific papers]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

6. Греков, С.П. Минимально безопасное скопление органического материала [Текст] / С.П. Греков, И.Г. Старикова, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 1(53). – С. 23 – 30. – ISSN 2414-5769.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Orlikova, V.P. *Minimal'no bezopasnoye skopleniye organicheskogo materiala* [The minimally safe accumulation of an organic material] [Text]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 1 (53), pp. 23 – 30. – ISSN 2414-5769.

7. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах [Текст] / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.

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

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.

Дата поступления рукописи 01.11.2018

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

Oleg Petrovich Pashkovskiy, research associate; 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) 332-78-81

THE MINIMUM FIRE-SAFE DIMENSIONS OF WASTE HEAPS OF COAL MINES

Purpose. Ascertainment of the minimum thickness of an accumulation of the coal mine waste heap that excludes its spontaneous ignition on the basis of the investigations on studying the oxidation kinetics carried out earlier.

The **methods** are based on the mathematical model of self-heating the materials at the expense of chemical oxidation reactions and experimental data of the NIIGD "Respirator".

Results. The use of the solution of the linearized equation of nonisothermic kinetics of the chemical adsorption of gases with microporous sorbates to determine the minimum thickness of the accumulation of the rock-coal mass that reaches the critical value of the spontaneous heating temperature with due regard for heat losses into the environment has been proposed. The modeling of the self-heating process for the mixtures of rock with various types of coals has been fulfilled. The values of the minimum thickness of the rock-coal mass accumulation excluding its spontaneous ignition have been determined.

Scientific novelty. The analytical dependences to calculate the minimum thickness of the rock mass of the slag-heaps of the coal mines excluding its spontaneous ignition are given.

Practical value. The method for prevention of the spontaneous ignition of the coal mines slag-heaps with various characteristic of the rock-coal mass by means of limitation of the thickness of its accumulation is proposed.

Keywords: spontaneous ignition; thickness of the material accumulation; heat irradiation coefficient; adsorption; reactions.

УДК 547.532:[544.723.2:662.613.1]

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

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

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

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

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

СПОСОБНОСТЬ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОГЛОЩАТЬ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Цель. Сравнительные исследования сорбционной способности пористых материалов как исходного сырья для получения сорбентов, поглощающих аварийно химически опасные вещества.

Метод. Определение ускоренным и продолжительным взвешиванием статической сорбционной емкости пористых материалов по отношению к бензолу.

Результаты. Экспериментально изучена сорбционная способность шести марок каменного угля, кокса, металлургического и котельного шлака, золы-уноса и зольных алюмосиликатных микросфер тепловых электростанций. Установлено, что уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый) больше поглощает бензола, чем каменный уголь марок: А (антрацит), Т (тощий), К (кокосый), Г (газовый) и ЖК (жирный коксовый). Показана целесообразность использования отходов промышленного производства, котельного шлака и зольных алюмосиликатных микросфер как сырья для получения эффективных и экономически выгодных сорбентов, поглощающих аварийно химически опасные вещества.

Научная новизна. Впервые изучена способность серии каменных углей различной стадии метаморфизма одного месторождения, а также промышленных отходов предприятий Донецкого региона поглощать аварийно химически опасные вещества (бензол).

Практическая значимость. Результаты исследований – основа для разработки доступных сорбентов на основе природных пористых материалов. Сорбенты представляют собой одно из эффективных средств устранения отрицательных последствий техногенной и антропогенной деятельности общества.

Сорбенты необходимы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций при авариях на химически опасных объектах и транспорте, а также для решения экологических проблем. Применение относительно недорогих и крупнотоннажных материалов для получения сорбентов значительно расширит сырьевую базу без использования дефицитных и существенно более дорогих активированных углей и полимерных сорбентов.

Кроме этого, разработка и применение недорогих природных сорбентов позволит сократить затраты при ликвидации аварий техногенного характера, связанных с масштабными утечками и разливами аварийно химически опасных веществ в окружающую среду.

Ключевые слова: *аварийно химически опасное вещество; бензол; зола-унос; зольные алюмосиликатные микросферы; каменный уголь; кокс; сорбент; сорбционный объем; шлак.*

Постановка проблемы. Применение сыпучих пористых материалов, сорбирующих опасные вещества – один из эффективных способов сокращения времени испарения пролитых аварийно химически опасных веществ и изоляции очага заражения. В качестве таких материалов в настоящее время применяют материалы природного происхождения: уголь, угольную породу, доломит, песок,

а также отходы промышленного производства: шлак, золошлак, золу-уноса, доломитовую муку, керамзитовую крошку, древесные опилки и др.

Среди перечисленных пористых материалов физико-механические свойства (насыпная плотность, механическая прочность и др.) и сорбционные свойства (суммарный объем пор, удельная поверхность) каменных углей определяют в качестве перспективного исходного сырья для получения углеродных сорбентов [1].

Традиционные технологии получения углеродных сорбентов из каменного угля включают энергоемкие стадии карбонизации в интервале температур 650...700 °С и последующей парогазовой активации карбонизата в специальных печах при температуре 800...1000 °С водяным паром, углекислым и сернистым газом, кислородом, аммиаком и другими химическими реагентами. Технологии, определяющие высокую себестоимость готового продукта, активированных углей различных марок – главный сдерживающий фактор в их крупномасштабном использовании для ликвидации аварий техногенного характера, связанных с разливами токсичных веществ в значительных объемах.

Из этого обстоятельства вытекает актуальность проблемы, которая заключается в разработке сорбентов на основе доступных пористых материалов, позволяющих достичь уровня сорбционной емкости дорогостоящих активированных углей и снизить стоимость затрат при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в результате аварий на химически опасных объектах и транспорте. Один из путей решения проблемы состоит в использовании богатой сырьевой базы Донецкого региона для получения доступных сорбентов на основе местного сырья.

Анализ последних исследований. В последние годы приобретает все большее значение разработка углеродных сорбентов, интерес к которым в значительной степени связан с применением эффективных, доступных и дешевых материалов на основе местного сырья. Из литературных источников [2–4] известно о применении углеродных сорбентов для решения широкого круга экологических проблем. Углеродные сорбенты применяют в различных технологических процессах обезвреживания газовых выбросов, очистки природных и сточных вод от вредных примесей, таких, как нитриты, нитраты, пестициды, фенолы, формальдегиды, бензолы, кадмий, ртуть, свинец, цинк, хром и пр.

Другое перспективное направление использования дешевых сорбентов – нейтрализация химически опасных веществ при авариях техногенного характера, которые представляют потенциальную опасность возникновения масштабных химических заражений окружающей среды.

Цель работы – исследования сорбционной способности пористых материалов, которые представляют собой продукты и промышленные отходы производств Донецкого региона: каменных углей различных марок, кокса, шлаков, золы-уноса, зольных алюмосиликатных микросфер по отношению к бензолу ускоренным и продолжительным взвешиванием.

Изложение основного материала. Для исследований сорбционной способности перечисленных выше пористых углеродных материалов по отношению к аварийно химически опасным веществам из их широкого круга (72 вещества) выбран бензол, который используют и хранят в значительных количествах на химически опасных объектах Донецкого региона.

Бензол как неполярный углеводород используют в качестве стандартного вещества при исследовании сорбционных свойств гидрофобных углеродных сорбентов [5]. Поэтому в настоящей работе исследовали и оценивали способность пористых материалов поглощать бензол.

В качестве объектов исследования взяты 13 образцов пористых материалов разных промышленных предприятий Донецкого региона – каменный уголь шести марок: А (антрацит), Г (газовый), ДГ (длиннопламенный газовый), ЖК (жирный коксовый), К (коксовый) и Т (тощий) шахт Донецкого угольного бассейна, кокс ПАО «Ясиновский коксохимический завод» (Макеевка), отвальный шлак Донецкого металлургического комбината, два образца шлака с котельных тепловой сети коммунального хозяйства Донецка, зола-унос и зольные алюмосиликатные микросферы энергоблоков Старобешевской тепловой электростанции, а также зола-унос Зуевской тепловой электростанции.

Для сравнения и оценки сорбционных свойств пористых материалов проведены исследования двух образцов активированного угля промышленного производства – марки СКТ (синтезированный из торфа) и АГН (на основе полукокса и спекающегося угля), которые обладают высокой сорбирующей способностью.

Подготовка образцов каждого материала включала предварительное дробление, измельчение и отсев целевой фракции 0,315...0,500 мм.

Затем подготовленные образцы слоем не более 5 мм кондиционировали при температуре $(23 \pm 4)^\circ\text{C}$ не менее 24 ч в термошкафу, после чего выдерживали в открытом виде, позволяя прийти в состояние равновесия. Эксперименты проводили в одинаковых условиях: статическом режиме при температуре $(23 \pm 4)^\circ\text{C}$. Оценивали качество сорбентов по основному показателю – сорбируемости бензола. Исследования статической сорбционной емкости образцов пористых материалов основаны на ускоренном и продолжительном взвешивании, результаты которого использовали для сравнения сорбентов по их сорбционной способности и для сравнительной оценки их сорбционной эффективности.

Локализация пролитых аварийно химически опасных веществ на поверхностях различного рода (грунт, растительность, асфальт, бетон и др.), с учетом интенсивности их испарения и возможности воспламенения, требует минимизации времени насыщения сорбента. Учитывая это требование к сорбентам, их сорбционную эффективность оценивали по максимально возможной сорбционной способности за минимальное время (15 мин) насыщения образца материала бензолом.

Минимальная масса пробы пористого материала для испытания до обработки бензолом равна 4,0 г. В кристаллизатор наливали бензол слоем,

который обеспечивал полное погружение пробы исследуемого материала в жидкость. Испытуемую пробу помещали в металлическую сетчатую корзинку, взвешивали вместе с корзинкой и опускали в кристаллизатор с бензолом. Через 15 мин (ускоренные испытания) и 24 ч (продолжительные испытания) корзинку с пробой материала вынимали и давали бензолу стечь в течение (30 ± 3) с, а затем взвешивали. Испытания проводили трижды для получения и вычисления на их основе среднего значения насыщаемости бензолом единицы массы материала.

По результатам испытаний рассчитывали сорбируемость бензола как отношение массы сорбированного бензола m_s , г, к массе пробы материала до обработки бензолом m_0 , г, по формуле

$$a = m_s / m_0 ,$$

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

$(m_{ST}$ – масса пробы после обработки бензолом, г;

m_0 – масса пробы до обработки бензолом, г.

Сорбционные свойства пористых материалов к бензолу, которые получены ускоренным и продолжительным взвешиванием, приведены в таблице.

Сорбционные свойства пористых материалов

Номер образца	Пористый материал, место отбора образца	Сорбируемость бензола 1 г пористого материала	
		ускоренный метод (время контакта с бензолом 15 мин)	продолжительный метод (время контакта с бензолом 24 ч)
1	Уголь марки Т (тощий), пласт k_5 , шахта № 22 «Коммунарская»	0,65	0,70
2	Уголь марки Г (газовый), пласт l_6 , шахта «Белореченская»	0,72	0,73
3	Уголь марки К (коксый), пласт l_1^B , шахта «Щегловская-Глубокая»	0,60	0,65
4	Уголь марки ДГ (длиннопламенный газовый), пласт l_1 , шахта им. Челюскинцев	0,72	0,81
5	Уголь марки ЖК (жирный коксовый) шахта им. А.А. Скочинского	0,62	0,67
6	Уголь марки А (антрацит) шахта «Прогресс»	0,60	0,60
7	Уголь активированный марки СКТ (образец сравнения)	1,60	1,90
8	Уголь активированный марки АГН (образец сравнения)	1,32	1,42
9	Шлак металлургический отвальный (промышленный отход Донецкого металлургического комбината)	0,40	0,44

Окончание

Номер образ-ца	Пористый материал, место отбора образца	Сорбируемость бензола 1 г пористого материала	
		ускоренный метод (время контакта с бен-золом 15 мин)	продолжительный метод (время контакта с бензолом 24 ч)
10	Шлак котельный (образец № 1), котельная Петровского района, Донецк	1,20	1,31
11	Шлак котельный (образец № 2), котельная Петровского района, Донецк	1,30	1,35
12	Кокс ПАО «Ясиновский коксохимический завод», Макеевка	0,87	1,05
13	Зола-унос Зуевской тепловой электростанции	0,93	0,95
14	Зола-унос Старобешевской тепловой электростанции	0,39	0,41
15	Зольные алюмосиликатные микросферы Старобешевской тепловой электростанции	1,23	1,31

Анализ результатов сравнительных исследований (ускоренным и продолжительным взвешиванием образцов каменного угля показал, что максимальную сорбционную емкость имеют образцы газового угля (0,72 и 0,73 соответственно) и длиннопламенного газового угля (0,72 и 0,81 соответственно).

Максимальная сорбционная способность достигнута для образцов котельного шлака (1,20 и 1,30) и зольных алюмосиликатных микросфер (1,23) – их сорбция практически совпадает с сорбцией угля активированного марки АГН (1,32) в течение 15 мин насыщения образцов бензолом. Сорбционная способность, которую определяли продолжительным взвешиванием, выше единицы для двух образцов котельного шлака (1,31 и 1,35), кокса (1,05) и зольных алюмосиликатных микросфер (1,31). Для шлака металлургического отвального (0,40) и золы-уноса Старобешевской тепловой электростанции (0,39) получены минимальные значения сорбируемости бензола в двух режимах насыщения: ускоренном и продолжительном.

Следует отметить, что все исследованные образцы пористых материалов не достигли сорбционной способности образца угля активированного марки СКТ – 1,60 (15 мин насыщения бензолом) и 1,90 (24 ч насыщения бензолом).

Как видно из данных таблицы, пористые материалы обладают различными значениями сорбируемости, однако при этом максимальное насыщение образцов всех материалов бензолом происходит одинаково в течение первых 15 мин процесса сорбции.

Выводы. Результаты сравнительных экспериментальных исследований показали, что среди изученных пористых материалов наилучшими

сорбционными свойствами обладают образцы котельного шлака и зольных алюмосиликатных микросфер Старобешевской тепловой электростанции.

Установлено, что по способности поглощать бензол образцы котельного шлака и зольных алюмосиликатных микросфер достигают уровня некоторых известных сорбентов, выпускаемых промышленностью, в частности угля активированного марки АГН. В отличие от дорогостоящих и малорентабельных активированных углей, котельный шлак и зольные алюмосиликатные микросферы можно применять без предварительных энергоёмких стадий карбонизации и активации как перспективное и относительно дешёвое сырьё для получения экономически выгодных сорбентов, поглощающих химически опасные вещества при аварийных разливах на химически опасных объектах и транспорте.

Список литературы / References

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

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

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

Kompantsev, D.V., Stepanova, E.F., Mykots, L.P. etc. *Opredeleniye sorbtsionnoy sposobnosti razlichnykh sorbentov po otnosheniyu k 5-oksimetilfurfuroлу i rodstvennym soyedineniyam* [Determination of the sorption capacity of various sorbates with regard to 5-(hydroxymethyl)furfurol and analogous species. *Nauchnyye vedomosti. Meditsina. Farmatsiya – Scientific vedomosti. Medicine. Pharmacy*, 2012, no. 10 (129), issue 18/3, pp. 34 – 39.

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

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

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

Makhmudov, F.T., Ragimli, M.A., Aliyeva, S.A. etc. *Termodinamika sorbtsii toksichnykh komponentov organicheskoy prirody iz rastvorov na tvyerdykh sorbentakh* [Thermodynamics of sorption of organic toxic components from solutions on solid sorbates]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 338 – 345.

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

Thu Aung Si, Win Myint Saw, Klushin, V.N., Nistratov, A.V. etc. *Issledovaniye poristoy struktury aktivnogo uglya iz risovoy shelukhi* [Investigation of the porous structure of activated carbon from rice husks]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – Sorption and chromatographic processes*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 102 – 109.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 10.10.2018

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

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;

Victoria Valentynovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;

Oksana Nikolayevna Shcherbakova, engineer of the 1st category; e-mail: astra-jasmin@mail.ru

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

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

ABILITY OF POROUS MATERIALS TO ABSORB CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES CONDUCTIVE TO ACCIDENTS

Purpose. Comparative investigations of the sorption capacity of the porous materials as feed stock for generation of sorbates absorbing the chemically hazardous substances conducive to accidents.

Method. Determination of the static sorption capacity of the porous materials with regard to benzene using the accelerated and long-term weighting.

Results. The sorption ability of six ranks of coal, coke, metallurgical and boiler slag, ashes and ash aluminosilicate microspheres of thermal stations has been experimentally studied. It has been ascertained that coal of the ДГ rank (long flaming gas coal) absorbs more benzene than coal of the ranks: А (anthracite), Т (lean coal), К (coke coal), Г (gas coal) and ЖК (fat coke coal). The reasonability of the use of industrial production wastes, boiler slag and ash aluminosilicate microspheres as feed stock for generation of the efficient and economically sound sorbates absorbing the chemically hazardous substances conducive to accidents has been shown.

Scientific novelty. The ability of a series of coals with the various metamorphism stage of one coalfield as well as of industrial wastes of the enterprises of the Donetsk region to absorb the chemically hazardous substances conducive to accidents (benzene) has been studied for the first time.

Practical value. The results of the investigations are the base for generation of the accessible sorbates on the basis of the natural porous materials. The sorbates are one of the efficient means of elimination of negative consequences of the anthropogenic and man-induced activity of the society.

The sorbates are necessary for elimination of consequences of emergencies during the accidents at chemically hazardous objects and traffic accidents as well as for solving the ecological problems. The drawing of the relatively inexpensive and large-tonnage materials into generation of the sorbates will considerably extend the raw material base without use of the scarce and considerably more expensive activated charcoals and polymeric sorbates.

Besides that, the development and use of the inexpensive natural sorbates will allow reducing costs during elimination of the anthropogenic accidents associated with the large-scale leaks and spills of the chemically hazardous substances conducive to accidents into the environment.

Keywords: *chemically hazardous substance conducive to accidents; benzene; ashes; ash aluminosilicate microspheres; coal; coke; sorbate; sorption capacity; slag.*

УДК 614.8"363"

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

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

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

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

Анастасия Андреевна Симоненко, студентка; e-mail: cool.a@yandex.ru

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 071-371-48-60

ПОЖАРО-, ВЗРЫВООПАСНОСТЬ АВАРИЙНО ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Цель. Изучение вероятности возникновения пожаров и взрывов аварийно химически опасных веществ в аварийных ситуациях на промышленных предприятиях (химически опасных объектах).

Методика. Анализ, обобщение и статистическая обработка результатов исследований причин пожаров и взрывов аварийно химически опасных веществ в аварийных ситуациях.

Результаты. Изучены причины и следствия пожаров и взрывов аварийно химически опасных веществ в аварийных ситуациях.

Научная новизна. Обобщены имеющиеся в научной литературе знания по проблеме возникновения пожаров и взрывов аварийно химически опасных веществ в аварийных ситуациях.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят при оценке пожаро- и взрывоопасности аварийно химически опасных веществ при авариях на химически опасных объектах учитывать природу химического вещества, количество его выброса или разлива на землю или в поддон (обваловку), оценить количество аварийно химически опасных веществ, переходящее в первичное и вторичное облако

Ключевые слова: *аварийно химически опасные вещества; пожар; химически опасный объект; взрыв; вероятность возникновения пожара.*

Постановка проблемы. Изучение имевших место аварийных ситуаций на химически опасных объектах и проведенные расчеты показывают, что объекты с аварийно химически опасными веществами (АХОВ) могут быть источниками:

- залповых выбросов (проливов) АХОВ;
- сбросов АХОВ в водоемы;
- «химического пожара» с поступлением токсического продукта в окружающую среду;
- разрушительных взрывов;
- заражения объектов и местности в очаге аварии и на следе распространения химического облака;
- обширных зон задымления в сочетании с токсичными веществами.

Аварии, связанные с выбросом (разливом) АХОВ, можно условно разделить на: аварии с выбросом ядовитых веществ при их производстве, переработке, хранении; аварии на транспорте при перемещении ядовитых

веществ; образование и распространение АХОВ в процессе протекания химических реакций, начавшихся в результате других производственных аварий.

Анализ последних исследований. По статистическим данным, представленным в литературе о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера [1], основными причинами аварий с выбросом АХОВ явились: нарушение герметичности емкостей при хранении и транспортировании (37 %); нарушения мер безопасности при работе с ядовитыми веществами (24 %); непреднамеренный выброс АХОВ (16 %) и прочие аварии (23 %). Доля утечки АХОВ при аварии на химически опасных объектах составила по аммиаку 23 %, по хлору 15 %, по сернистому ангидриду и серной кислоте 14 %.

Согласно анализу американской страховой компании причины крупных пожаров и взрывов на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях группируются следующим образом: 31 % – повреждение оборудования; 20 % – неправильный выбор конструкционных и прочих материалов; 17 % – нарушение технологического процесса; 8 % – недостаточная профилактика; 4 % – аварии при перемещении материалов; 2 % – неудовлетворительная планировка установок; 7 % – прочие [2].

Цель исследований. Изучение вероятности возникновения пожаров и взрывов АХОВ в аварийных ситуациях на химически опасных объектах.

Результаты исследования. Распространение АХОВ при выбросе в окружающую среду может происходить в виде паров, газов, аэрозолей (грубо- и тонкодисперсных). Аэрозоли – гетерогенные (неоднородные) системы, вещества с размером твердых или жидких частиц от 10^{-6} до 10^{-2} см, взвешенных в воздухе. Различают аэрозоли тонкодисперсные, состоящие из практически не оседающих частиц размерами от 10^{-6} до 10^{-3} см, и аэрозоли грубодисперсные, состоящие из быстрооседающих частиц вещества размерами 10^{-2} см. Аэрозольные (паровые и газовые) химические облака образуются главным образом при мгновенном разрушении резервуаров хранения или при испарении разлитой криогенной жидкости. Наиболее опасны облака, образующиеся при мгновенном испарении.

Образование аэрозольного химического облака может привести к появлению в основном трех типов опасностей: крупному пожару, взрыву облака, токсическому воздействию, а в некоторых случаях (как пример – выброс аммиака) возникает опасность воспламенения и токсического воздействия. Причем воспламеняемость и взрываемость определяются концентрациями веществ в облаке. Облака токсичных газов (паров) представляют опасность на значительно больших расстояниях от точки выброса, чем горючие вещества. Степень опасности выброса будет определяться в основном физико-химическими и токсичными свойствами АХОВ.

Для оценки пожаро-, взрывоопасности различных материалов (веществ) введено понятие «пороговое количество». Под этим понимается то минимальное количество материала (вещества), меньше которого при аварии не возникает большой опасности. Основой для определения пороговых количеств пожароопасных веществ являются размеры территории, в пределах которых жизнь и здоровье людей не подвергается значительному риску. Авария считается крупной, если радиус этой территории превышает 100 м от точки, в которой авария может произойти. К легковоспламеняющимся и прочим отнесены вещества, для которых пороговое количество равно 10 т, к взрывоопасным – вещества, для которых пороговое значение 1 т (получено на основании экспериментов и расчетов, сравнивая с тротилом) [2].

Наиболее важным с точки зрения опасностей химических производств является сжиженный природный газ, состоящий главным образом из метана, но содержащий также небольшие количества углеводородов с двумя и более атомами углерода в молекуле. При разливе сжиженного природного газа будет происходить разделение на фракции, первыми из которых испаряются вещества с более низкой точкой кипения. Для сжиженного природного газа это означает, что слой вытекшей жидкости становится со временем все более богатым тяжелыми углеводородами и его температура будет повышаться. Это может привести к изменению теплового потока и способствовать возникновению быстрого фазового перехода или беспламенного взрыва.

Опасности, возникающие при утечке кислорода, связаны с повышенной его концентрацией в атмосфере, что приводит к снижению порога первоначальной энергии вспышки, увеличению скорости горения и горючести материалов, а также затруднению тушения пламени. Многие органические материалы, если их пропитать жидким кислородом, становятся сильными взрывчатыми веществами. Вполне очевидно, что при образовании жидкого кислорода в описанных ситуациях на предприятиях химической и нефтехимической промышленности могут происходить и происходили взрывы, о чем свидетельствует авария в Уолсенде (Великобритания), где из-за утечки кислорода из линии подачи и образования его высокой концентрации в трюме строящегося корабля возник сильный пожар.

Причиной аварий на транспортных, складских и производственных установках часто бывает выброс углеводородов с последующим воспламенением газовойоздушной смеси. В большинстве случаев промышленных аварий наблюдалось нарушение герметичности емкостей с воспламеняющейся жидкостью, находящейся под повышенным давлением и кипящей при атмосферном давлении. Такую утечку сжиженных газов считают основной, хотя и не единственной причиной взрывов.

Основное отличие жидкостей данной категории (к ним относятся пропан, бутан, аммиак, хлор) заключается в мгновенном испарении, которое возникает тогда, когда в системе, включающей жидкость, находящуюся в равновесии со своими парами, понижается давление (например, в случае утечки).

Определенное количество жидкости при этом мгновенно испаряется, а оставшееся достигает точки кипения. Этот процесс может проходить очень интенсивно и сопровождаться выбросом облака газа. Внезапное падение давления сопровождается мгновенным воспламенением испарившейся части жидкости, количество которой зависит от разности между температурой жидкости до нарушения герметичности резервуара и температурой ее кипения при атмосферном давлении, а также от соотношения между удельной теплоемкостью жидкости и ее скрытой теплотой испарения. «Мгновенное испарение» может происходить почти с взрывной силой, унося брызги и капли, которые могут фонтанировать и испаряться в контакте с воздухом. При этом условия не являются адиабатическими. Жидкость, если ее температура ниже температуры окружающей среды, испаряется.

Существует четыре возможных варианта развития событий при «мгновенном испарении» воспламеняющихся газов вследствие утечки. Утечка может вызвать появление пламени. Это наиболее вероятно при небольших трещинах. Воспламенение в этом случае может возникнуть в течение нескольких секунд.

Взрыв паровых облаков в незамкнутом пространстве зависит от: критического минимального количества выбрасываемых паров при взрыве, равного 5,5 т; достаточного смещения пара и воздуха; задержки воспламенения на 1...20 мин.

Из 177 исследованных аварий [3] при мгновенном испарении воспламеняющихся газов только семь случаев (4 %) не сопровождались возгоранием. А в остальных же 170 случаях 35 % аварий сопровождались взрывом. В 20 % случаев имело место сочетание взрыва с пожарами, в 34 % случаев происходил только пожар. Все эти данные говорят о том, что мгновенные утечки углеводородных паров почти неизбежно, а в двух случаях из трех сопровождаются взрывным эффектом. Горючие газы органического происхождения, содержащие от двух до шести атомов углерода в молекуле, являются причиной практически всех случаев взрыва пара в неограниченном пространстве с преобладающим участием углеводородов.

Наиболее опасны топлива с большой молекулярной массой, их пары опускаются в приземный слой атмосферы с ограниченным вертикальным рассеянием. На практике при аварийном истечении горючих сжиженных газов и жидкостей почти неизбежно происходит их воспламенение. Поэтому подобные чрезвычайные происшествия, как правило, сопровождаются пожарами. Воспламенение может произойти не непосредственно у места истечения огнеопасного продукта, а на довольно большом расстоянии, куда успели проникнуть жидкость, пар или газ и где они встретили случайный источник огня. Возникшее при этом пламя обязательно вернется к месту аварии.

С повышением температуры кипения жидкости истечение ее из поврежденного резервуара происходит спокойно, а фонтанирование возможно

лишь при значительном разогревании жидкости. Так, акриловая кислота при температуре ниже 13 °С вообще находится в твердом состоянии, а при температуре до 27 °С она, хотя и является жидкостью, но практически не испаряется. При более высокой температуре опасность представляет не только жидкость, но и ее токсичные и огнеопасные пары. В случае с уксусной кислотой лишь несколько смещаются температурные пределы опасности. При возникновении пожара разница в опасности между акриловой и уксусной кислотами практически исчезает [4].

Ряд химических продуктов, ингаляционно безопасных при обычных условиях, является потенциальным источником образования АХОВ при горении с последующим поражением производственного персонала и населения, что должно учитываться при планировании мероприятий по защите производственного персонала и населения. В основе образования токсичных продуктов горения лежат как физические, так и химические превращения. В зависимости от химического строения и степени горючести вещества в состав продуктов горения могут входить разнообразные продукты сложных химических реакций (окисления, пиролиза, крекинга, термической диссоциации и др.) различной степени токсичности.

Возможные органические и неорганические источники возникновения АХОВ при горении весьма многообразны. Неорганические источники в подавляющем большинстве относятся к группе негорючих веществ и образуют АХОВ в результате термической диссоциации (например, сера). К числу неорганических источников АХОВ относится ряд азот-, серо- и галогенсодержащих соединений, которые при воздействии высоких температур (преимущественно в интервале от 350 до 700 К) могут образовывать девять видов АХОВ. Это сернистый ангидрид, сероводород, оксиды азота, аммиак, хлор, водород хлористый, цианистый водород. В составе продуктов горения органических веществ различают продукты полного (диоксид углерода, вода, азот) и неполного сгорания (оксид углерода, сажа), а также многообразные токсичные, включая АХОВ, продукты термоокислительного разложения.

Природа образующихся в составе продуктов термоокислительного разложения АХОВ тесно связана с химическим строением органических веществ и материалов. Многочисленными исследованиями установлено, что подобно неорганическим веществам, при наличии в молекулах вещества атомов хлора и фтора в составе продуктов горения можно ожидать присутствие галогенов и галогенводородов, при наличии атомов азота – присутствие аммиака, оксидов азота, цианистого водорода, при наличии атомов серы – сероводорода, сернистого ангидрида.

Помимо химического строения источников, природа, а также количество образующихся АХОВ определяется рядом других факторов: температурой, концентрацией кислорода в окружающей среде, характером процесса горения (пламенное горение, тление) [5].

Для тушения пожаров в большинстве случаев используют воду и пену. В результате взаимодействия образующихся при горении твердых материалов АХОВ и огнетушащей воды образуется раствор, попадание которого в водоемы может привести к отравлению людей и животных. К аналогичному результату может привести и вымывание огнетушащей водой различных химических веществ, хранящихся на складах производств, в процессе тушения пожара.

Таким образом, при оценке пожаро- и взрывоопасности АХОВ при авариях на химически опасных объектах необходимо учитывать природу химического вещества, количество выброса или разлива на землю или в поддон (обваловку), количества АХОВ, переходящих в первичное и вторичное облако

Для приближенной оценки количества АХОВ Q_1 , кг, переходящих в первичное облако в момент разрушения оболочек емкостей, можно использовать формулу

$$Q_1 = \frac{QC_v(T_a - T_k)}{\lambda}, \quad (1)$$

где Q – масса АХОВ в емкости, кг;

C_v – удельная теплоемкость жидкости, кДж·кг⁻¹·К⁻¹;

T_a – температура жидких АХОВ до разрушения емкости, °С;

T_k – температура кипения АХОВ, °С;

λ – удельная теплота испарения, кДж·кг⁻¹.

При разрушении емкостей с высококипящими жидкостями (гидразин, тетраэтилсвинец, олеум, серная кислота и др.) первичное облако практически не образуется. Основным процессом, определяющим поступление АХОВ во вторичное облако, является процесс его испарения с площади поверхности зеркала разлива. Количество АХОВ Q_2 , кг, поступающих во вторичное облако, можно определить по формуле

$$Q_2 = 3600Est_{\text{исп}}, \quad (2)$$

где E – удельная скорость испарения, кг·м⁻²·с⁻¹;

S – площадь поверхности зеркала разлива АХОВ, м²;

$t_{\text{исп}}$ – время испарения, ч.

Площадь поверхности зеркала разлива S , м², определяют по формуле

$$S = \pi d_{\text{пр}}^2 / 4, \quad (3)$$

где $d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр площади разлива, м.

При наличии поддона (обваловки) приведенный диаметр площади разлива $d_{\text{пр}}$ определяют по формуле

$$d_{\text{пр}} = 1,22 \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4)$$

где ρ – плотность АХОВ, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

При отсутствии поддона (обваловки) $d_{\text{пр}}$ определяют по формуле

$$d_{\text{пр}} = 5,04 \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (5)$$

где 1,22 и 5,04 – размерные коэффициенты.

В формуле (3) высота поддона (обваловки) принята равной 1 м при его заполнении на 85 %. Для больших емкостей (емкостью более 2000 т) высота поддона (обваловки) может быть больше, поэтому для таких случаев диаметр площади разлива $d_{\text{пр}}$ равен

$$d_{\text{пр}} = \frac{1,22}{\sqrt{h}} \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (6)$$

где h – высота поддона (обваловки), м.

Удельную скорость испарения E , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, определяют по формуле

$$E = 0,041 \frac{UM}{d_{\text{пр}}^{0,14} T_k} \exp \left[\frac{\lambda M}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_n} \right) \right], \quad (7)$$

где U – скорость ветра (принимается на высоте 1 м), $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

M – молярная масса АХОВ, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$;

$d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр площади разлива, м;

T_n – температура испарения, К;

T_k – температура кипения, К;

λ – удельная теплота испарения, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

R – универсальная газовая постоянная, равная $8,3 \text{ кДж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Количество АХОВ Q_2 , кг, поступающее во вторичное облако, может быть представлено в виде

$$Q_2 = Q - Q_1. \quad (8)$$

Используя формулы (7) и (8), можно найти ориентировочное время испарения АХОВ с поверхности разлива.

Выводы. Оценка вероятности возникновения пожаров и взрывов АХОВ при аварийных ситуациях на химически опасных объектах при их производстве, хранении и транспортировании позволила изучить причины и следствия этого явления. Это позволит учесть влияние на пожаро-, взрывоопасность АХОВ природы химического вещества, количества его выброса или разлива на землю или в поддон (обваловку), а так же оценить количество АХОВ, переходящее в первичное и вторичное облако.

Список литературы / References

1. Вергейчик, Т.Х. Токсикологическая химия / Т.Х. Вергейчик. – М.: МЕДпресс-информ, 2009. – 400 с.

Vergeychik, T.Kh. Toksikologicheskaya khimiya [Toxicological chemistry]. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2009, 400 p.

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

Kobelev, A.A. Vyyavleniye i otsenka khimicheskoy obstanovki pri razrusheniyakh (avariyakh) na KHOO [Revelation and estimation of the chemical situation during implantation damages (accidents) at chemically hazardous objects]. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya: sb. tez. dokl. 4-y Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. T. 2* [Emergency situations: prevention and elimination: collection of theses of reports of the 4th International theoretical and practical conference. Vol. 2]. Minsk, 2007, pp. 139 – 141.

3. Егоров, А.Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая. – М.: КолосС, 2010. – 528 с.

Yegorov, A.F. Savitskaya, T.V. Analiz riska, otsenka posledstviy avariya i upravleniye bezopasnost'yu khimicheskikh neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv [Analysis of a risk, evaluation of consequences of accidents and security management of chemical, oil-processing and petrochemical productions]. Moscow, KolosS Publ., 2010, 528 p.

4. Савин, С.В. Опасные материалы и действия пожарных в критических условиях: обзор. Ч.2 / С.В. Савин, А.В. Карпов, В.И. Петров // Гражданская оборона: информ. сб. по материалам зарубежной печати / ВИМИ. – 1990. – Вып. 6. – С. 36 – 41.

Savin, S.V., Karpov, A.V., Petrov, V.I. Opasnyye materialy i deystviya pozharnykh v kriticheskikh usloviyakh: obzor. Ch. 2 [Hazardous materials and actions of firemen under critical conditions: review. Part 2]. *Grazhdanskaya oborona:*

inform. sb. po materialam zarubezhnoy pechati [Civil defense: information collection on materials of the foreign press]. VIMI, 1990, issue 6, pp. 36 – 41.

5. Эверет, Д. Введение в химическую термодинамику / Д. Эверет. – М.: Иностранная литература, 2009. – 300 с.

Everet, D. *Vvedeniye v khimicheskuyu termodinamiku* [Introduction in the chemical thermodynamics]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 2009, 300 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Сынковым.
Дата поступления рукописи 28.01.2019

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

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) 332-78-43;

Anastasia Andreyevna Simonenko, student; e-mail: cool.a@yandex.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone: +38 071-371-48-60

FIRE-, EXPLOSION HAZARD OF CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES CONDUCTIVE TO ACCIDENTS AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Purpose. Study of probability of origin of fires and explosions of chemically hazardous substances conductive to accidents in emergency situations at the industrial enterprises (at the chemically hazardous objects).

Methods. Analysis, generalization and statistical treatment of investigation results of the causes of the fires and explosions of the chemically hazardous substances conductive to accidents in the emergency situations.

Results. The causes and consequences of the fires and explosions of the chemically hazardous substances conductive to accidents in the emergency situations have been studied.

Scientific novelty. The knowledge on the problem of the origin of the fires and explosions of the chemically hazardous substances conductive to accidents in the emergency situations being available in the scientific literature has been generalized.

Practical value. The obtained results will permit by the assessment of the fire- and explosion hazard of the chemically hazardous substances conductive to accidents during the accidents at the chemically hazardous objects to take into account nature of the chemical substance, amount of its emission or spill on the ground or into the pallet (bund area), to estimate the amount of the chemically hazardous substances conductive to accidents turning into the primary or secondary cloud.

Keywords: *chemically hazardous substances conductive to accidents; chemical fire; chemically hazardous object; explosion; probability of origin of a fire.*

УДК [547.137+546.33-39]:536.46

*Валерий Васильевич Шаповалов, д-р хим. наук, завкафедрой; e-mail: wwshapovalov@gmail.com;**Алина Анатольевна Берестовая, ст. преподаватель; e-mail: berestova865@gmail.com**Государственное учреждение высшего и профессионального образования**«Донецкий национальный технический университет»**283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09*

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ГОРЕНИЕ В ПЕРОКСИДНО-СОЛЕВЫХ СИСТЕМАХ

Цель. Выяснение причин нестабильности выделения O_2 и особенностей горения пероксидно-перхлоратной системы типа $Me(ClO_4)_2-Na_2O_2(Na_2O_2)$.

Методика базируется на сопоставлении результатов математического моделирования горения пероксидно-перхлоратной системы с экспериментальными данными.

Результаты. Скорость распространения фронта горения, количество и скорость выделения кислорода в твердофазной системе $Mg(ClO_4)_2-Na_2O_2(Na_2O_2)$ существенно зависят от тепловых условий горения, геометрических характеристик и состава образцов. Совпадение расчетных параметров горения с экспериментальными свидетельствует, что скорость горения определяется обменом ионами Na^+ и Mg^{2+} в системе $Mg(ClO_4)_2-Na_2O_2$, а нестабильность выделения O_2 обусловлена наличием эндотермической стадии разложения образующегося $NaClO_4$ в $NaClO_3$.

Научная новизна. Установлен механизм горения пероксидно-перхлоратной системы и предложена теоретическая модель, учитывающая влияние на скорость горения и выделение кислорода термодинамических, кинетических параметров процесса, теплофизических и геометрических характеристик системы и внешних условий.

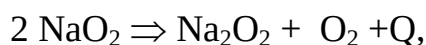
Практическая значимость. Создание автономных химических источников кислорода, а также генераторов других газов для обеспечения жизнедеятельности человека в различных ситуациях, а также решение ряда технических задач.

Ключевые слова: *горение; пероксиды; перхлораты; модель горения; фронт горения; кислород; условия горения.*

Постановка проблемы. Изучение влияния различных условий на процесс низкотемпературного горения в пероксидно-солевых системах.

Анализ последних исследований. Пероксидные и супероксидные соединения типа Me_2O_2 и MeO_2 , где Me – ионы одно- или двухвалентных металлов; достаточно широко используют в системах получения кислорода и связывания диоксида углерода. Вследствие высокой реакционной способности данные соединения реагируют с разными классами соединений, в частности с оксидами и солями, что может быть использовано для получения кислорода и в химической технологии для получения, например, наноразмерных суперпарамагнетиков [1].

Хорошо изучены экзотермические системы типа $MeSO_4-Na_2O_2(Na_2O_2)$ [2, 3]:



Эти системы легко инициируются тепловым импульсом и устойчиво горят при существенном изменении концентрационных, геометрических и внешних условий с температурой во фронте реакции от 800 до 1300 К в зависимости от качественного или количественного состава композиции. Это объясняется достаточно простым механизмом процесса горения и отсутствием стадий, тормозящих процесс [3].

Иная ситуация наблюдается при горении пероксидно-солевых систем типа $\text{Me}(\text{ClO}_4)_2\text{--Na}_2\text{O}_2(\text{NaO}_2)$, которые представляют интерес как твердофазные генераторы O_2 с емкостью по кислороду более 350 л/кг [4].

Твердофазное горение таких систем очень чувствительно к изменению как внешних теплофизических характеристик и геометрических параметров образцов, так и изменению или нарушению состава смеси.

Цель работы – выяснение причин нестабильности выделения O_2 и особенностей горения пероксидно-перхлоратной системы типа $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$.

Методика эксперимента. Смеси готовили в изолированном боксе. Образцы для исследований диаметром 10, 20, 40 и 90 мм и высотой от 60 до 200 мм прессовали под давлением 1000...1500 кг/см². Образцы длиной 200 мм изготавливали в щелевой пресс-форме.

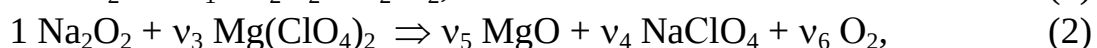
Горение осуществляли как в стальном реакторе, соединенном с газовым счетчиком, так и на воздухе. Линейную скорость горения определяли исходя из длины образца и времени горения. Инициировали процесс керамической пластинкой с $t = 800^\circ\text{C}$. За перемещением фронта реакций можно было наблюдать непосредственно по внешним изменениям состояния боковой поверхности образца и по показаниям газового счетчика, а скорость определять по углу наклона зависимости объем O_2 – время. Количество выделившегося кислорода контролировали взвешиванием.

Температуру горения определяли хромель-алюмелевыми термопарами диаметром 0,1 мм, соединенными с самописцем типа НЗ07.

Состав продуктов горения определяли на дифрактометре ДРОН-УМ1. ИК-спектры продуктов записывались на спектрофотометре SPECORD 75IR.

Результаты и их обсуждение

Процесс горения в системе $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$ протекает через образование ряда промежуточных соединений [5] и может быть представлен схемой:



где v_i – коэффициенты, характеризующие соотношения масс между компонентами каждой реакции, равные соответственно: 0,709; 0,291; 2,8623; 3,1403; 0,5168; 0,2052; 0,8693; 0,1307; 0,549; 0,451.

Расчет теоретической температуры горения для данной системы показывает, что она ограничена температурой плавления NaCl (800 °С) или немного ее превышает, что позволяет отнести данный процесс к низкотемпературному горению.

Модель рассматриваемой системы представляет собой цилиндр (рис.1) из однородной химической композиции с постоянными теплофизическими параметрами. Реакция начинается после срабатывания инициатора, а время выделения O₂ определяется линейной скоростью передвижения фронта горения и длиной образца. Сигнализатор регистрирует окончание процесса.

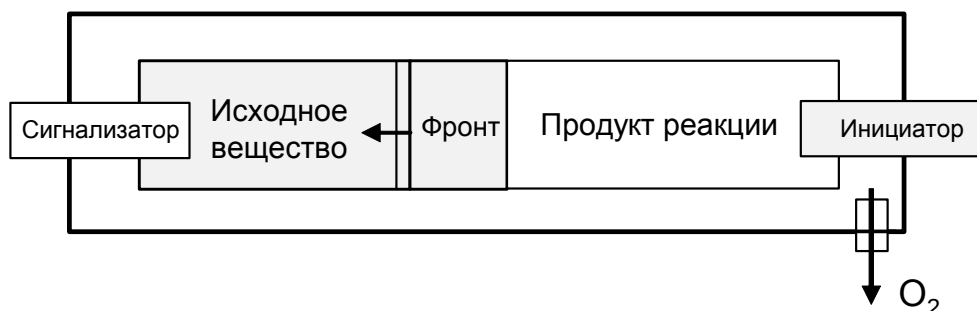


Рис. 1. Схема распространения фронта горения в системе $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2(\text{Na}_2\text{O}_2)$

В основу уравнения энергетического баланса горения рассматриваемой конденсированной системы может быть положено известное уравнение Фурье, дополненное внутренним источником теплоты, который в данном случае представлен системой реакций (1)-(4). В адиабатических условиях в общем виде уравнение сохранения энергии и твердофазной химической кинетики имеют вид

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dx} a \frac{dT}{dx} + \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n \left(Q_i \frac{d\alpha_i}{d\tau} \right), \quad (5)$$

$$d\alpha_i/d\tau = k_{0i} \exp(-E_i/RT) f(\alpha_i),$$

$$dx/d\tau = U,$$

с граничными условиями

$$1) x = 0: \alpha_i = 0, T = T_0; \quad 2) x \rightarrow \infty: \alpha_i = 1, T = T_{\text{адб}}; \quad \frac{dT}{dx} = 0, \quad (6)$$

где U – линейная скорость движения фронта горения, м/с;

C – средняя теплоемкость, кДж/(кг·К);

Q_i , – тепловой эффект i -й реакции, кДж/кг;

$d\alpha_i/d\tau$ – скорость i -й реакции, с⁻¹;

α_i – степень превращения i -го компонента;

T – текущая температура во фронте реакции, К;

x – линейная координата;

$f(\alpha)$ – кинетическая функция вида $f(\alpha) = (1-\alpha)^{2/3}$.

Вследствие того, что взаимодействие пероксидных соединений натрия с солями протекает многостадийно и характеризуется небольшой скоростью движения фронта U , использование модели адиабатического приближения (2) не объясняет следующих экспериментальных результатов: зависимости скорости распространения фронта U от диаметра образца; наличия критического диаметра, при уменьшении которого фронт реакции не распространяется; образования разных продуктов в зависимости от внешних условий. Для реальной системы, фронт горения в которой распространяется вдоль стержня с потерями теплоты через боковую поверхность и с учетом кинетических уравнений твердофазной кинетики, система уравнений, описывающих горение системы $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2$, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dx} a(T) \frac{dT}{dx} + \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n \left(Q_i \frac{dm_i}{d\tau} \right) - \frac{4}{C\rho D} \left[\beta(T - T_0) + \sigma_0 \varepsilon (T^4 - T_0^4) \right], \quad (7) \\ dx/d\tau = U, \\ dm_1/d\tau = -m_1^0 k_{01} \text{EXP}(-E_1/RT) f(\alpha_1), \quad \text{для NaO}_2 \quad (8) \\ dm_2/d\tau = -m_2^0 k_{02} \text{EXP}(-E_2/RT) f(\alpha_2) n, \quad \text{для Mg(ClO}_4)_2 \quad (9) \\ dm_3/d\tau = -\nu_1 (dm_1/d\tau) + (dm_2/d\tau) / \nu_3, \quad \text{для Na}_2\text{O}_2 \quad (10) \\ dm_4/d\tau = -\nu_4 / \nu_3 (dm_2/d\tau) - (dm_6/d\tau) / \nu_8, \quad \text{для NaClO}_4 \quad (11) \\ dm_5/d\tau = \nu_7 / \nu_8 (dm_6/d\tau) - (dm_7/d\tau) / \nu_9, \quad \text{для NaClO}_3 \quad (12) \\ dm_6/d\tau = \nu_8 k_{03} \text{EXP}(-E_3/RT) m_4, \quad \text{O}_2 \text{ из NaClO}_4 \quad (13) \\ dm_7/d\tau = \nu_9 k_{04} \text{EXP}(-E_4/RT) m_5, \quad \text{для NaCl}, \quad (14) \end{array} \right.$$

где D – диаметр образца, м;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

ε – степень черноты;

β – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К);

T_0 – температура окружающей среды, К;

m_i – массовые доли участников процесса. При решении системы уравнений (7)-(14) использовали следующие данные: средняя теплоемкость $C = 1,34$ кДж/(кг·К); плотность образца $\rho = 1600$ кг/м³; диаметр $D = 0,01 \dots 0,04$ м; коэффициент температуропроводности $a(T) = (9 \cdot 10^{-8} + 7 \cdot 10^{-10} T)$ м²/с; тепловые эффекты $Q_1 = -83,7$ кДж/кг; $Q_2 = 1360$ кДж/кг; $Q_3 = -1106$ кДж/кг; $Q_4 = 777,2$ кДж/кг; кинетические параметры [5] $\ln k_{01} = 19,4$; $\ln k_{02} = 8,34$; $\ln k_{03} = 28,6$; $\ln k_{04} = 30,9$; $E_1/R = 10400$ К; $E_2/R = 5650$ К; $E_3/R = 23800$ К; $E_4/R = 26800$ К.

Решение системы уравнений относительно скорости горения осуществлялся путем последовательных приближений значений скорости горения к значению, которое удовлетворяет граничным условиям (6). На рис. 2 представлен вид типичного результата численного решения данной системы уравнений по разработанной ДонНТУ программе. Как видно, весь комплекс

химических превращений осуществляется во фронте горения шириной около 1,3 мм ($1,3 \cdot 10^{-3}$ м).

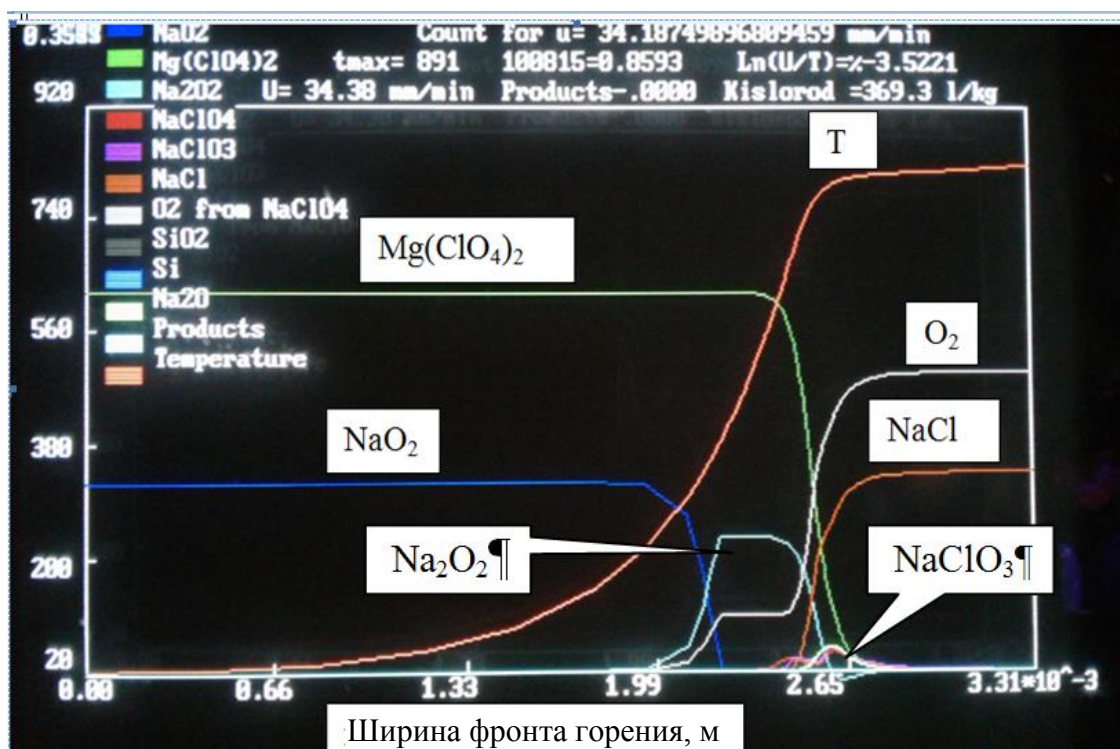


Рис. 2. Пример расчета химической структуры фронта горения системы $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2$, температуры и скорости горения, объема кислорода. Решение соответствует стабильному распространению фронта горения с полным выделением O_2

Влияние диаметра образца. Критический диаметр образца, меньше которого горение не происходит, зависит от температуры образца и теплопотерь. Расчет показывает, что при диаметре образца меньше 15 мм при температуре среды около 20 °С фронт не распространяется. В реальных условиях иногда горели и образцы диаметром 10 мм, что, вероятно, обусловлено горячим выделяющимся кислородом, который экранирует образец от окружающей среды. Это подтверждается тем, что устойчивость горения увеличивается при горении образцов в замкнутом пространстве. Вместе с тем и расчет, и эксперимент однозначно свидетельствуют, что до критического диаметра горение осуществляется с полным выделением кислорода.

Влияние температуры образца. При температуре около 20 °С все образцы с диаметром больше критического горят устойчиво с полным выделением кислорода (~360 л/кг). При температуре образцов 18 °С режим горения осуществлялся на образцах диаметром больше чем 40 мм. При этом кислород выделялся полностью.

Влияние инертного компонента. Введение в горючие смеси инертных компонентов – распространенный способ изменения температуры и скорости

горения. Оксид магния является продуктом реакции (2) и вследствие своей инертности в основном изменяет тепловые условия протекания СРВ. При введении в систему дополнительно до 0,15 массовых долей MgO расчетная и

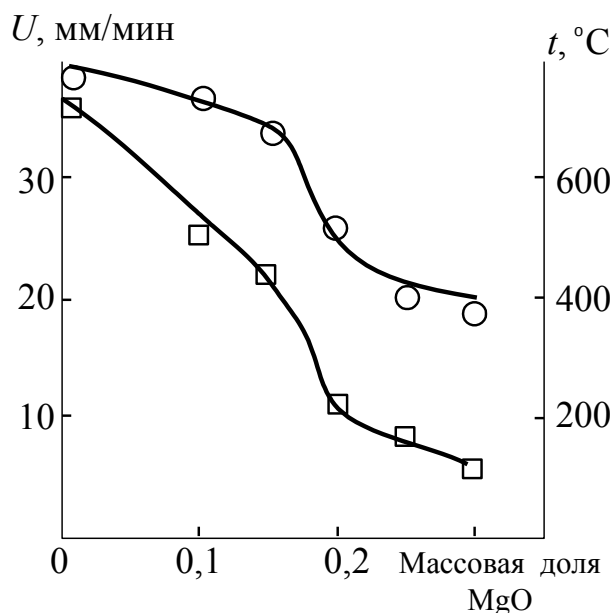


Рис. 3. Зависимость линейной скорости СРВ (1) и температуры (2) от массовой доли MgO в системе $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2$. $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{:NaO}_2=1\text{:}2$. Точки – экспериментальные данные. Сплошные линии – расчет по уравнениям (4)-(11)

присутствуют во фронте горения лишь как промежуточные вещества (рис. 4, а). Количество выделяемого кислорода остается высоким (около 300 л/кг) и лишь немного снижается пропорционально доле инертного компонента. При массовой доле разбавителя (MgO) 0,15...0,2 наблюдается неустойчивый режим СРВ. Этому режиму на кривых зависимости скорости и температуры от массовой доли MgO (см. рис. 3) соответствуют скачки, обусловленные резким уменьшением скорости горения, температуры и количества кислорода (< 90 л/кг). Расчет (рис. 4, б) и данные ИК-спектроскопии показывают, что основными продуктами являются NaClO_4 и MgO . В интервале массовой доли MgO 0,15...0,2 на скорость и температуру сильное влияние оказывают незначительное изменение теплотерь,

экспериментальная скорости горения линейно уменьшаются с увеличением массовых долей MgO (рис. 3). Температура во фронте изменяется от 800 до ~ 700 °C, что достаточно для разложения образующихся NaClO_4 и NaClO_3 . Расчет структуры фронта СРВ при массовой доле MgO меньше 0,15 (рис. 4), а также данные рентгеновского анализа показывают, что основными твердофазными продуктами являются NaCl и MgO . Согласно расчету, NaClO_4 и NaClO_3

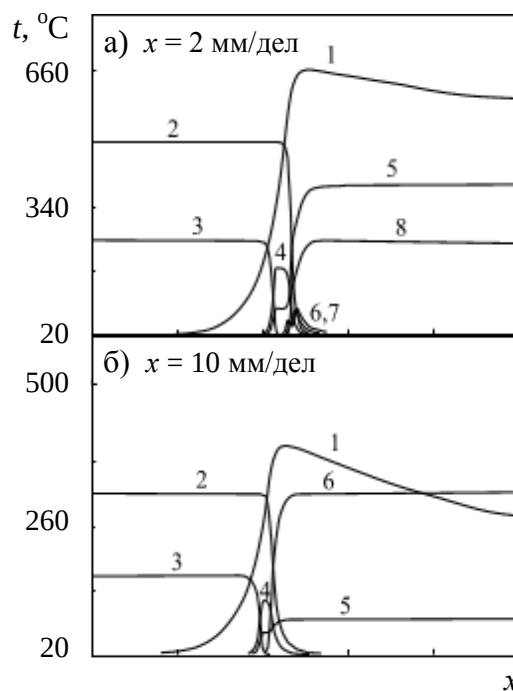


Рис. 4. Строение фронта СРВ для системы $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2\text{--NaO}_2$:
а – массовая доля $\text{MgO} = 0,1$;
б – массовая доля $\text{MgO} = 0,25$;
1 – температура во фронте СРВ;
2 – $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$; 3 – NaO_2 ; 4 – Na_2O_2 ;
5 – O_2 ; 6 – NaClO_4 ; 7 – NaClO_3 ; 8 – NaCl

температуры и диаметра образцов. В ряде случаев наблюдалось такое уникальное явление, как прохождение по образцу двух разделенных во времени фронтов горения, когда визуально отмечалось, что горение завершилось, но в образце в случайной точке формировался второй фронт горения. После первого фронта температура в образце поднималась до ~ 500 °С, а после второго – до ~ 700 °С. При больших диаметрах образцов в продуктах горения преимущественно обнаруживается NaCl и MgO, при малых – MgO и NaClO₄. В последнем и содержится основное количество невыделившегося кислорода.

Выводы. Горение пероксидно-перхлоратных систем является эффективным способом получения кислорода, скорость и количество получения которого зависят от теплофизических и геометрических характеристик образцов и их окружения. Скорость определяющей стадией горения является процесс обмена ионами Na⁺ и Mg²⁺ при взаимодействии Mg(ClO₄)₂ и Na₂O₂. Скорость горения в определенных пределах можно изменять, вводя в систему третий компонент, что, однако, может повлечь появление эффекта нестабильного горения. Основной причиной, вызывающей возможность нестабильного горения системы при изменении условий, является эндотермический процесс разложения во фронте реакции NaClO₄ в NaClO₃. При выборе соответствующих катализаторов негативные последствия данной стадии процесса, вероятно, можно уменьшить.

Список литературы / References

1. Берестовая, А.А. Синтез суперпарамагнетиков в режиме самораспространяющегося взаимодействия в системах MeSO₄-Fe₂(SO₄)₃-NaO₂(Na₂O₂) / А.А. Берестовая, В.В. Шаповалов // Физико-химия и технология неорганических материалов: XII Российская конференция молодых научных сотрудников и аспирантов. – М., 2015. – С. 17 – 18.

Berestovaya, A.A., Shapovalov, V.V. *Sintez superparamagnetikov v rezhime samorasprostranyayushchegosya vzaimodeystviya v sistemakh MeSO₄-Fe₂(SO₄)₃-NaO₂(Na₂O₂)* [Synthesis of superparamagnets in the mode of the self-propagating interaction in the systems MeSO₄-Fe₂(SO₄)₃-NaO₂(Na₂O₂)]. *Fisiko-khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov: XII Rossiyskaya konferentsiya molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Physicochemistry and technology of inorganic materials: The 12th Russian conference of young research assistants and postgraduate students]. Moscow, 2015, pp. 17 – 18.

2. Шаповалов, В.В. Самораспространяющееся взаимодействие в системе CoSO₄ – Fe₂(SO₄)₃ – NaO₂ / В.В. Шаповалов, А.А. Берестовая // Научные труды Донецкого национального технического университета. Сер.: Химия и химическая технология. – 2014. – Вып. 1. – С. 71 – 81.

Shapovalov, V.V., Berestovaya, A.A. *Samorasprostranyayushcheyesya vzaimodeystviye v sisteme CoSO₄ – Fe₂(SO₄)₃ – NaO₂* [The self-propagating interaction in the system CoSO₄ – Fe₂(SO₄)₃ – NaO₂]. *Nauchnyye trudy Donetskogo*

natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [Scientific transactions of the Donetsk National Technical University, Series: Chemistry and chemical technology]. 2014, issue 1, pp. 71 – 81.

3. Цапко, А.А. Самораспространяющееся взаимодействие в системе $\text{CoSO}_4 - \text{NaO}_2$ / А.А. Цапко, В.В. Шаповалов // Вопросы химии и хим. технологии. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012. – № 4. – С. 139 – 143.

Tsapko, A.A., Shapovalov, V.V. *Samorasprostranyayushcheyesya vzaimodeystviye v sisteme $\text{CoSO}_4 - \text{NaO}_2$* [The self-propagating interaction in the system $\text{CoSO}_4 - \text{NaO}_2$]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii – Problems of chemistry and chemical technology*, Dnepropetrovsk, UGKhTU, 2012, no. 4, pp. 139 – 143.

4. Пат. 2149136 РФ, МКИ С 01 В 13/02, А 62 В 21/00. Термохимический генератор кислорода, состав твердого кислородовыделяющего элемента и устройство для снабжения кислородом / И.А.Смирнов (РФ), А.Т. Логунов (РФ), В.В. Шаповалов (Украина), В.И. Ванин (Украина). – № 98116786/12; Опубл. 20.05.2000; Бюл. № 14.

Smirnov, I.A. (Ru), Logunov, A.T. (Ru), Shapovalov, V.V. (Ua), Vanin V.I. (Ua). *Termokhimicheskiy generator kisloroda, sostav tvyerdogo kislorodovydelyayushchego elementa i ustroystvo dlya snabzheniya kislorodom* [The thermochemical oxygen generator, composition of a solid oxygen-generating element and device for oxygen supply]. Patent RF, no. 12 2149136, 2000.

5. Шаповалов, В.В. Термографическое исследование взаимодействия пероксидных соединений натрия с перхлоратом магния / В.В. Шаповалов // Украинский хим. журнал. – 2000. – Т. 66, № 1. – С. 24 – 27.

Shapovalov, V.V. *Termograficheskoye issledovaniye vzaimodeystviya peroksidnykh soyedineniy natriya s perkhloratom magniya* [The thermographic investigation of interaction of sodium peroxide compounds with magnesium perchlorate]. *Ukrainskiy khim. zhurnal – Ukrainian chemical journal*, 2000, vol. 66, no. 1, pp. 24 – 27.

Рекомендовано к публикации д-ром хим. наук Ю.Б. Высоцким.
Дата поступления рукописи 31.01.2019

Valery Vasilyevich Shapovalov, Dr. Sci. (Chem.), head of subdepartment;

e-mail: wwshapovalov@gmail.com;

Alina Anatolyevna Berestovaya, senior teacher; e-mail: berestova865@gmail.com

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“Donetsk National Technical University”

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

LOW-TEMPERATURE COMBUSTION IN PEROXIDE-SALT SYSTEMS

Purpose. Looking into causes of instability of O_2 -release and peculiarities of combustion of the peroxide-perchlorate system, type $Me(ClO_4)_2-NaO_2(Na_2O_2)$.

The methods are based on comparison of results of the mathematical modeling of combustion of the peroxide-perchlorate system with the experimental data.

Results. The velocity of propagation of the burning front, the amount and velocity of oxygen release in the solid-phase system $Mg(ClO_4)_2-Na_2O_2(Na_2O_2)$ depend considerably on thermal conditions of the combustion, geometrical characteristics and composition of the specimens. The coincidence of the combustion design parameters with the experimental ones testifies that the combustion velocity is determined by the exchange of the ions Na^+ and Mg^{2+} in the system $Mg(ClO_4)_2-Na_2O_2$, and the instability of the O_2 -release is stipulated by availability of the endothermic decomposition stage of the generating compound $NaClO_4$ to $NaClO_3$.

Scientific novelty. The mechanism of combustion of the peroxide-perchlorate system has been established, and the theoretical model taking into account the influence on the combustion velocity and oxygen release of thermodynamic, kinetic parameters of the process, thermalphysic and geometric characteristics of the system and environmental conditions has been proposed.

Practical value. Creation of autonomous chemical oxygen sources as well as generators of other gases for guaranteeing the vital functions of a man in various situations and also solving a number of technical problems.

Keywords: combustion; peroxides; perchlorates; model of combustion; burning front; oxygen; combustion conditions.

Требования к оформлению статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи;
- описание методики (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 9 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2019, № 1(56)

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 07.02.2019г.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 2,6 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 14 февраля 2019 г.