



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 4(55)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2018

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 4(55). – 126 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	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 № 8 от 25.10.2018).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 4(55)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2018

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2018. – No.4 (55). – 126 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included in the list of reviewed scientific publications 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. 8 from 25.10.2018).

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная и промышленная
безопасность*****Агеев В.Г., Пефтибай Г.И.,
Марийчук И.Ф.**Напряженное состояние шахтной
взрывоустойчивой перемычки

7

Пашковский П.С.Совершенствование конструкции
закачных ручных огнетушителей

15

**Пашковский П.С., Пефтибай Г.И.,
Галухин Н.А., Болдырев М.Н.**Механизм первичного
каплеобразования в камере смешения
пожаротушающего устройства

25

Орликова В.П.Параметры адсорбции кислорода
на поверхности угля

36

***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях*****Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.**Моделирование действий органов
управления в чрезвычайных ситуациях
техногенного характера

44

**Долженков А.Ф., Мельниченко А.А.,
Мисинева А.Ф.**Поглощение АХОВ в закрытых
помещениях путем орошения водным
раствором нейтрализатора

51

Стариков Г.П., Шатохин С.В.Оценка склонности горной породы
к вывалам

58

TABLE OF CONTENTS***I. Fire and industrial safety*****Ageyev V.G., Peftibay G.I.,
Mariychuk I.F.**Stressed state of a mine blast-resistant
stopping**Pashkovskiy P.S.**Improvement of the construction
of stored-pressure hand fire-extinguishers**Pashkovskiy P.S., Peftibay G.I.,
Galukhin N.A., Boldyrev M.N.**A mechanism of initial drop formation
in a mixing chamber of a fire-fighting
equipment**Orlikova V.P.**Parameters of oxygen adsorption on coal
surface***II. Safety in emergencies*****Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.**Simulation of organs of government
actions in emergencies
of the anthropogenic nature**Dolzhenkov A.F., Mel'nichenko A.A.,
Misineva A.F.**Absorption of chemically hazardous
substances conducive to accidents in closed
premises by means of spraying the aqueous
neutralizer solution**Starikov G.P., Shatokhin S.V.**Evaluation of rock inrush
susceptibility

Плетенецкий Р.С., Зборщик Л.А.
 Параметры аварийного
 воздухообеспечения системы
 жизнеобеспечения бокса-базы
 горноспасательной

71

Карнаух Н.В., Мавроди А.В.
 Условия ведения аварийно-
 спасательных работ на выемочных
 участках

78

Pletenetskiy R.S., Zborshchik L.A.
 Parameters of emergency air supply for
 a life support system of a mine-rescue
 refuge chamber

Karnaukh N.V., Mavrodi A.V.
 Conditions for carrying-out the emergency
 rescue operations in mine working areas

III. Охрана труда и экологическая безопасность

Высоцкий С.П.
 Ожидаемые или неожиданные
 изменения климата

87

**Мамаев В.В., Кирьян А.П.,
 Толкачев О.Э.**
 Оценка возможности увеличения
 времени защитного действия
 регенеративного патрона респиратора

99

**Коптиков В.П., Греков С.П.,
 Всякий А.А.**
 Охлаждение угля при истечении метана

108

**Зинченко И.Н., Момот Д.И.,
 Пашковский О.П.**
 Количественная оценка вредных
 веществ при горении породных отвалов

119

III. Labor protection and environmental safety

Vysotsky S.P.
 Expected or unexpected changes of climate

**Mamayev V.V., Kir'yan A.P.,
 Tolkachyev O.E.**
 Estimate of possibility of duration increase
 of a breathing apparatus regenerative
 cartridge

**Koptikov V.P., Grekov S.P.,
 Vsyakiy A.A.**
 Cooling the coal during methane release

**Zinchenko I.N., Momot D.I.,
 Pashkovskiy O.P.**
 Quantity evaluation of harmful substances
 during burning of the spoil heaps

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [622.868.42:622.81]:001.891.572

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

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

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

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

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

Государственное учреждение высшего и профессионального образования

«Донецкий национальный технический университет»

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

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ШАХТНОЙ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Цель. Сравнение разработанной ранее математической модели напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возведенной из гипсового материала или на основе цементного вяжущего, с зарубежными аналогами.

Методы. Теоретический метод исследований объемного напряженно-деформированного состояния шахтной анизотропной (изотропной) взрывоустойчивой перемычки, представленной в виде толстой пластины, радиус кривизны которой меняется по параболической зависимости под действием нагрузки от взрывной ударной волны. Перемычку возводят горноспасатели из цементно-шлакового материала с использованием в расчетах одного из основных численных методов решения краевых задач теории упругости – вариационного.

Результаты. Проверена сходимость результатов разработанной математической модели напряженно-деформированного состояния шахтной монолитной взрывоустойчивой перемычки, представленной в виде толстой пластины с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости, под действием нормальной нагрузки от взрывной ударной волны с жесткими и шарнирными граничными креплениями по контуру. Получены распределения напряжений в перемычках по относительным координатам с исходными данными и результатами, полученными при натурных испытаниях в США и Польше. Установлено, что превалируют напряжения при шарнирном креплении перемычек, причем в США максимальные их значения на растяжения при двух граничных условиях превышают предельные, поэтому они разрушились, в Польше – наоборот.

Научная новизна. Впервые принята расчетная схема взрывоустойчивой перемычки в виде анизотропной толстой пластины с защемленными или шарнирно опертыми краями и радиусом кривизны, меняющимся по параболическому закону под действием нагрузки от взрывной ударной волны без учета влияния металлических труб в проемах на ее напряженно-деформированное состояние, поперечные деформации сдвига и внутренние силы которой варьируются по квадратичному закону. Это позволило существенно упростить решение задачи по сравнению с предыдущей математической моделью за счет отыскания одной функции перемещений вместо двух.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки позволяет научно обосновать ее основную техническую характеристику – толщину в зависимости от механических характеристик материала, нагрузки, площади сечения и глубины расположения выработки, что обеспечит безопасную работу горноспасателей при возведении перемычек из материала на основе цементного вяжущего в результате ликвидации подземных пожаров в угольных шахтах.

Ключевые слова: горная выработка; взрыв; перемычка; толщина; цементное вяжущее; вариационный метод; напряжения; математическая модель.

Постановка проблемы. В настоящее время для безопасного ведения работ по изоляции и тушению подземных пожаров, а также при взрывах метановоздушных смесей горноспасатели применяют взрывоустойчивые перемычки, возводимые из строительного или высокопрочного гипсового вяжущего с металлическими трубами в проемах [1].

Взрывоустойчивые перемычки из гипсового вяжущего обладают существенными недостатками: быстрое схватывание раствора ограничивает дальность транспортирования гидромеханическим способом, следовательно, усложняет эксплуатацию оборудования для их возведения; низкая водостойкость материала уменьшает надежность работы конструкции и исключает возможность ее применения в обводненных выработках.

Анализ последних исследований. В работе [2] приведена математическая модель напряженно-деформированного состояния анизотропной (изотропной) взрывоустойчивой гипсовой перемычки в виде толстой пластины с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, под действием нагрузки от взрывной ударной волны и сжимающей – разрушенных пород в верхней ее части при жестком защемлении по остальному контуру. Для решения задачи использован прием, заключающийся в представлении полного прогиба в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба и сдвига.

Как указано выше, взрывоустойчивые перемычки из гипсового вяжущего обладают некоторыми существенными недостатками.

В то же время для возведения изолирующих сооружений целесообразно использование цементного вяжущего с ускорителем твердения, доменным шлаком и золой-уноса, то есть побочных продуктов и отходов местного производства, что позволит снизить стоимость их возведения и способствовать охране окружающей среды [3].

Кроме этого, следует отметить, что в работе [2] не учтено граничное условие перемычки в виде шарнирного опирания по контуру.

В работе [4] на основании результатов экспериментальных исследований методом эквивалентных материалов установлено, что влиянием металлических труб в проемах на напряженно-деформированное состояние перемычки можно пренебречь, а их прочность обеспечена, поэтому крепление труб различными конструктивными элементами внутри опалубочного пространства не обязательно.

Цель исследований. Сравнение разработанной ранее математической модели напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возведенной из гипсового материала, с зарубежными аналогами.

Материалы и результаты исследований. В работе [5] разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния перемычки, представленная в виде анизотропной (изотропной) толстой пластины с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности под действием нагрузки от взрывной ударной волны, с заземленными или шарнирными краями.

Отличительной особенностью этой модели от полученной в работе [2] является учет шарнирного крепления перемычки, что принимает абсолютное большинство авторов, а также учет квадратичного закона распределения поперечных деформаций и касательных сил, что дает возможность отыскать одну функцию перемещений вместо двух и упростить решение задачи.

Разработанный алгоритм (рис. 1) и составленная программа позволяют выносить на печать распределение напряжений в относительных координатах (0,1) в плоском и двухмерном изображениях. Реализация программы выполнена следующим образом. Сначала провели сравнение разработанного метода при исследовании напряженно-деформированного состояния перемычек США (разрушены при натурных испытаниях) и перемычек Польши (отсутствие разрушения) при известных исходных данных. Затем привели результаты исследований напряжений в перемычках с параболической формой кривизны, возведенных из цементно-шлаковой смеси, под действием взрывной ударной волны при минимальной и максимальной площадях сечений и толщинах для двух граничных условий, определили максимальные их значения.

В работе [6] приведены данные экспериментальных исследований прочности перемычек в натурных условиях при действии взрывной ударной волны с их геометрическими размерами и механическими характеристиками. Для сравнения приняты перемычки, значения прочности которых получены в США и Польше (рис. 2 – 4).

Ранее установлено, что значение напряжений σ_x , возникающих по высоте перемычек с шарнирными краями, больше, чем с заземленными. При этом, как и следовало ожидать, они возникают в средней части и превышают предельные значения для строительного гипса (на растяжение при изгибе 0,3 МПа). Даже напряжения на сжатие превышают предельные их значения (2,8 МПа, см. рис. 2), т.е. перемычка разрушится.



Рис. 1. Алгоритм решения задачи

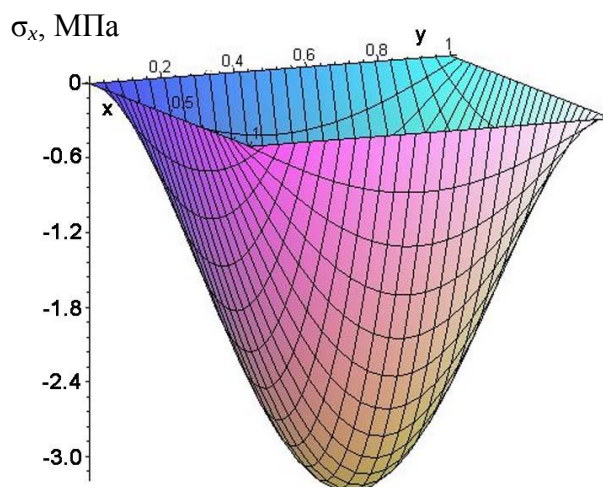


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений σ_x в перемычке из строительного гипса с параболической кривизной, шарнирными краями при максимальной высоте $f = 2,0$ м, ширине $B = 6,0$ м, толщине $h = 1,0$ м, модуле упругости $E = 3 \cdot 10^3$ МПа, коэффициенте Пуассона $\nu = 0,32$, нагрузке $q_z = 0,5$ МПа (США)

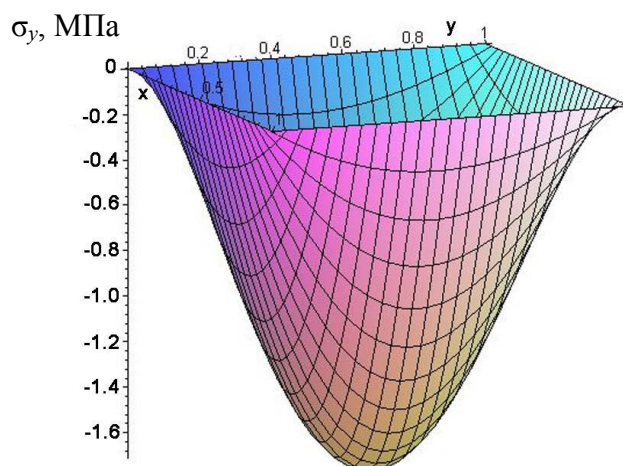


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений σ_y в перемычке из строительного гипса с параболической кривизной, шарнирными краями при максимальной высоте $f = 2,0$ м, ширине $B = 6,0$ м, толщине $h = 1,0$ м, модуле упругости $E = 3 \cdot 10^3$ МПа, коэффициенте Пуассона $\nu = 0,32$, нагрузке $q_z = 0,5$ МПа (США)

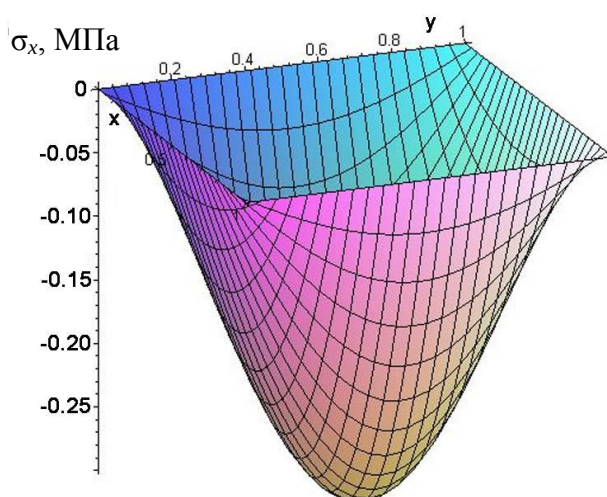


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений σ_x в перемычке из строительного гипса с параболической кривизной, шарнирными краями при максимальной высоте $f = 5,0$ м, ширине $B = 6,0$ м, толщине $h = 3,0$ м, модуле упругости $E = 3 \cdot 10^3$ МПа, коэффициенте Пуассона $\nu = 0,32$, нагрузке $q_z = 0,5$ МПа (Польша)

В то же время максимальные нормальные напряжения в перемычке, возведенной в Польше с шарнирными краями, не превышают предельных их значений (см. рис. 4), в результате чего она не разрушена.

Выводы

1. Опробована в сравнении с зарубежными аналогами разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки с заземленными или шарнирно опертыми краями под действием взрывной ударной волны. В этой модели принят квадратичный закон распределения касательных поперечных сил и деформаций.

2. Установлено, что максимальные нормальные напряжения в перемычках, возведенных в натурных условиях в США, превышают предельные значения, поэтому они разрушились, а максимальные нормальные напряжения в перемычке, возведенной в Польше, не превышают предельных значений, в результате чего она не разрушена.

3. Апробированная математическая модель позволяет научно обоснованно определить основную ее техническую характеристику в зависимости от механических характеристик, нагрузок, сечения и глубины расположения выработки – толщину, обеспечивающую безопасную работу горноспасателей, и снизить затраты на возведение перемычек при ликвидации аварий.

Список литературы / References

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

Smolantov, S.N., Golin'ko, V.I., Martinenko, M.S. *Izolyatsionnyye, ventilyatsionnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Isolation, ventilation and blast-resistant stoppings]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye Publ., 2002, 260 p.

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

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

3. Пефтибай, Г.И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли. – 2018. – № 1. – С. 47 – 52.

Peftibay, G.I., *Malokomponentnyye bystrotverdeyushchiye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustoychivyykh peremychek* [Low-component rapid-hardening mixtures for erection of blast-resistant stoppings]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti v gornoy otrasli* [Bulletin of the Scientific centre of the VostNII on industrial and ecological safety in a mining branch]. 2018, no. 1, pp. 47 – 52.

4. Агеев, В.Г. Моделирование воздействия горного давления на взрывоустойчивую перемычку / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, И.Ф. Марийчук // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 2(55). – С. 44 – 52.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I., Mariychuk, I.F. *Modelirovaniye vozdeystviya gornogo davleniya na vzryvoustoychivuyu peremychku* [Modeling the influence of the underground pressure on the blast-resistant stopping]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2018, no. 2 (55), pp. 44 – 52.

5. Агеев, В.Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударных волн / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 3(55). – С. 7 – 18.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I. *Matematicheskaya model' napryazhyenno-deformirovannogo sostoyaniya vzryvoustoychivoy peremychki pod deystviyem udarnyykh voln* [The mathematical model of the blast-resistant stopping deflected mode under the influence of shock waves]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2018, no. 3 (55), pp. 7 – 18.

6. Zipf, R.K., Jr., Sapko, M.J., Brune, J.F. Explosion pressure design criteria for new seals in U.S. coal mines. Pittsburgh, PA, U.S. Dept. HHS, NIOSH, IC 9500, 2007, 76 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 30.08.2018*

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

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

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

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

Ivan Filippovich Mariychuk, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: rpm2000avanek@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education "The Donetsk National Technical University"

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

STRESSED STATE OF A MINE BLAST-RESISTANT STOPPING

Purpose. Comparison of the previously developed mathematical model of the deflected mode of the blast-resistant stopping erected from an alabaster binding material or based on a cement bonding agent with foreign analogs.

Methods. The theoretical method for investigating of the three-dimensional deflected mode of the mine anisotropic (isotropic) blast-resistant stopping represented in the form of a thick plate which radius of curvature is changing according to the parabolic dependence under the influence of an explosion shock wave load. The stopping is erected from the cement-slag material by mine rescuers using one of the basic numerical methods for solving the elastic boundary value problems, i.e. the variation method, in the calculations.

Results. The convergence of the results of the developed mathematical model of the deflected mode of the mine monolithic blast-resistant stopping represented in the form of the thick plate with rigid and jointed boundary fastenings along the contour has been checked. The radius of curvature of the thick plate is changing according to the parabolic dependence under the influence of the standard load from the explosion shock wave. The stress distributions in the stoppings have been obtained according to the differential coordinates with the initial data and results received during the full-scale tests in the USA and Poland. It has been stated that the stresses prevail by the jointed fastening of the stoppings, and in the USA their maximum values for tensions by two boundary conditions exceed the limit values, that is why they have been destroyed. In the case with Poland they have been not destroyed.

Scientific novelty. For the first time the design model for a blast-resistant stopping has been accepted in the form of the anisotropic thick plate with the rigid or simply supported borders and the radius of curvature changing according to the parabolic law under the influence of the explosion shock wave load without taking into account the influence of metal pipes in the apertures on its deflected mode which lateral shear deformations and internal forces are varying according to the square law. It has allowed simplifying the problem solving significantly in comparison with the previous mathematical model by finding one displacement function instead of two.

Practical value. The developed mathematical model of the blast-resistant stopping deflected mode permits to substantiate scientifically its basic technical characteristic, i.e. thickness, in accordance with mechanical characteristics of the material, load, sectional area and location depth of a mine working, what will provide the safe labor of the mine rescuers during erection of the stoppings from the cement bonding agent as a result of elimination of underground fires in the coal mines.

Key words: mine working; explosion; stopping; thickness; cement bonding material; variation method; stresses; mathematical model.

УДК 614.845

Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по научной работе;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-02

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАКАЧНЫХ РУЧНЫХ ОГNETУШИТЕЛЕЙ

Цель. Обеспечение эффективной работы закачных огнетушителей при любом их пространственном расположении.

Методика. Аналитические и экспериментальные исследования процессов и условий вытеснения огнетушащих веществ из закачных ручных огнетушителей.

Результаты. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процессов вытеснения огнетушащих веществ из закачных ручных огнетушителей позволили внести изменения в конструкцию огнетушителя, что обеспечивает эффективную его работу в любом пространственном положении.

Научная новизна. Разработана математическая модель рабочего процесса вытеснения огнетушащей жидкости в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, обосновано оптимальное значение конструктивного параметра закачного огнетушителя – площади сечения его сопла.

Практическая значимость. Разработанная конструкция закачного ручного огнетушителя обеспечивает наиболее полное вытеснение огнетушащего вещества из его корпуса.

Ключевые слова: *закачной огнетушитель; эластичная емкость; корпус; огнетушащее вещество; пространственное расположение огнетушителя; эффективность работы.*

Постановка проблемы. Наиболее распространенными средствами тушения пожаров всех видов в начальный период их возникновения являются ручные огнетушители в качестве первичных средств пожаротушения. В настоящее время, как правило, используют порошковые, углекислотные, воздушно-пенные и водные огнетушители [1].

Для любого огнетушителя процесс вытеснения огнетушащего вещества из корпуса является важным условием его эффективной работы. В последние годы наблюдается устойчивая тенденция использования для этих целей сжатого воздуха, который закачивают в свободный объем корпуса огнетушителя над огнетушащим веществом [2]. Такие огнетушители называют закачными.

Основными достоинствами закачных огнетушителей является простота конструкции из-за отсутствия баллона со сжатым воздухом и механизма разрушения мембраны, возможность постоянного контроля давления в корпусе огнетушителя и повышенная оперативная готовность его к применению.

При работе с закачными огнетушителями приходится сталкиваться с неполным вытеснением огнетушащего вещества из корпуса.

Так, при проведении специальных испытаний порошковых закачных огнетушителей различных типоразмеров установлено, что остаток огнетушащего вещества в корпусе огнетушителя в среднем составляет 30 % [3]. Неполный выход огнетушащего вещества из огнетушителей происходит вследствие их конструктивных особенностей [4].

Основным условием вытеснения максимального количества огнетушащего вещества из корпуса закачного огнетушителя является вертикальное положение при его работе, что при тушении пожара по разным причинам не всегда выполнимо.

В этой связи разработка новых технических решений, повышающих эффективность использования закачных огнетушителей, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований. Во многих странах ведутся поиски путей повышения эффективности первичных средств пожаротушения. В основном они направлены на совершенствование конструкции огнетушителей. Это изменение геометрических параметров корпуса и сифонных трубок, параметров газа, вытесняющего огнетушащее вещество из корпуса, массы огнетушащего вещества и продолжительности его истечения [5].

Эффективная и безопасная эксплуатация закачных огнетушителей может быть, по мнению авторов работы [6], обеспечена оптимальным давлением вытесняющего газа в корпусе огнетушителя, равномерной подачей огнетушащего вещества на очаг горения, что в основном зависит от сечения выходного отверстия. Важным показателем эффективной работы закачного огнетушителя является полнота вытеснения огнетушащего вещества.

В качестве показателя полноты вытеснения огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя принимается [2]

$$k_o = \Delta G / G_o, \quad (1)$$

где k_o – коэффициент остатка огнетушащего вещества;

ΔG – масса огнетушащего вещества в корпусе после полного срабатывания, кг;

G_o – начальная масса огнетушащего вещества в огнетушителе, кг.

На коэффициент остатка огнетушащего вещества влияет степень заполнения им корпуса огнетушителя:

$$\varepsilon = 1 - V_{\text{ов}} / V_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{ов}}$ – объем огнетушащего вещества в корпусе огнетушителя, м³;

$V_{\text{к}}$ – объем корпуса огнетушителя, м³.

Цель исследования. Разработка математической модели газодинамического процесса вытеснения огнетушащего вещества в закачном ручном огнетушителе, обоснование оптимального сечения ствола.

Результаты исследований. Рассмотрим условия и процессы вытеснения огнетушащих веществ из корпуса закачного огнетушителя. При этом будем исходить из двух условий: давление на выходе из корпуса огнетушителя перед распылителем, во время его работы, должно быть постоянным; в любом пространственном положении обеспечивается полное истечение огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя.

Первое условие в серийно выпускаемых огнетушителях в основном соблюдается. Относительно второго условия следует отметить, что оно выполняется не в полном объеме. Обусловлено это тем, что рабочее положение огнетушителей по отношению к очагу горения допускает отклонение их корпуса от вертикальной оси до 15° . Увеличение этого угла при тушении пожара приводит к резкому уменьшению количества вытесняемого из корпуса огнетушащего вещества.

В работе [7] рассмотрены результаты испытаний экспериментальных образцов огнетушителей, ориентированных в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В каждом из этих положений обеспечивается полное вытеснение огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя. Это может быть обеспечено в том случае, если огнетушащее вещество поместить в эластичную емкость, располагаемую внутри корпуса огнетушителя. Пространство между эластичной емкостью и внутренней поверхностью корпуса огнетушителя заполнить сжатым воздухом, что обеспечивает полное вытеснение огнетушащего вещества из огнетушителя при включении его в работу.

Рассматриваемый огнетушитель (рис. 1) состоит из корпуса 1, помещенной внутри него эластичной емкости 2 с огнетушащим веществом 3. Пространство между корпусом и емкостью заполнено сжатым воздухом. При включении огнетушителя в работу сжатый воздух, находящийся в объеме V_1 под давлением P_1 , вытесняет огнетушащее вещество из эластичной емкости через отверстие с площадью сечения S_2 .

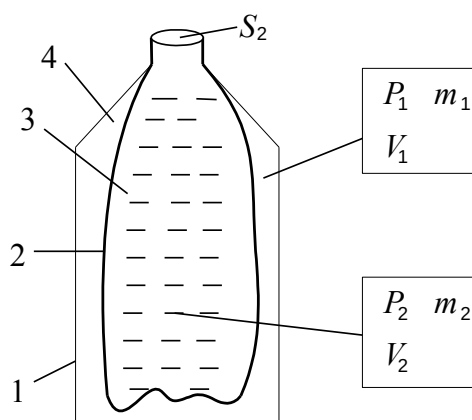


Рис. 1. Схема ручного закачного огнетушителя:

- 1 – корпус огнетушителя; 2 – эластичная емкость; 3 – огнетушащее вещество;
4 – пространство между корпусом огнетушителя и эластичной емкостью

При работе огнетушителя происходит непрерывное изменение давления P_1 , объемов V_1 и V_2 , т.е. имеет место неустановившийся процесс движения газа и огнетушащего вещества.

Запишем уравнение энергетического баланса [8] наполняющейся газовой полости переменного объема 4 при истечении огнетушащего вещества (при сжатии эластичной емкости 1). В общем виде в дифференциальной форме уравнение имеет вид

$$\frac{dP_1}{d\tau} = kP_1 \left(\frac{1}{m} \frac{dm}{d\tau} - \frac{1}{V_1} \frac{dV_1}{d\tau} \right), \quad (3)$$

где P_1 – давление газа, Па;

τ – время, с;

$k = 1,1$ – показатель политропы;

m – масса газа, кг;

V_1 – объем газа, м³.

В уравнении (3) значение $k = 1,1$ выбрано на основании того, что процесс расширения газа является политропным, соответствующим среднему режиму расширения, заключенному между двумя крайними процессами: изотермическим $k = 1,0$ и адиабатным $k = 1,4$, редко встречающимися в чистом виде.

Поскольку сжатый газ не поступает от внешнего источника, а находится в сжатом состоянии внутри полости наддува, то его масса m при расширении (вытеснении огнетушащего вещества из огнетушителя) не изменяется, т.е.

$m = \text{const}$. Поэтому производная $\frac{dm}{d\tau} = 0$, а уравнение (3) принимает вид

$$\frac{dP}{d\tau} = -kP_1 \frac{1}{V_1} \frac{dV_1}{d\tau}. \quad (4)$$

Применение уравнения (3) общего энергетического баланса в газовой полости ручного закачного огнетушителя позволяет (в отличие от предыдущих работ) учесть влияние скорости расширения газа на динамические процессы за счет учета показателя политропы.

Запишем уравнение расхода огнетушащего вещества в дифференциальной форме в виде

$$\frac{dV_2}{d\tau} = -v_2 S_2, \quad (5)$$

где V_2 – объем огнетушащего вещества, м³;

v_2 – скорость истечения огнетушащего вещества, м/с;

S_2 – площадь сечения сопла, м².

Скорость v_2 истечения огнетушащего вещества находим по формуле

$$v_2 = \gamma \sqrt{\frac{2(P_2 - P_0)}{\rho_{ож}}}, \quad (6)$$

где $\gamma = 0,95...0,97$ – коэффициент скорости истечения из сопла;

P_2 – давление в эластичной камере, Па;

P_0 – атмосферное давление, Па;

$\rho_{ож}$ – плотность огнетушащего вещества, кг/м³.

Подставляем выражение (6) в (5) и получаем уравнение

$$\frac{dV_2}{d\tau} = -\gamma \sqrt{\frac{2(P_2 - P_0)}{\rho_{ож}}} S_2. \quad (7)$$

Очевидно, что давление газа P_1 равно давлению огнетушащего вещества в эластичной емкости 3 (см. рис. 1):

$$P_1 = P_2. \quad (8)$$

Связь между объемом газа V_1 и объемом огнетушащего вещества V_2 выражается уравнением

$$V_1 = V_k - V_2. \quad (9)$$

Записываем уравнение (9) в приращениях $\Delta V_1 = -\Delta V_2$, относим эти приращения к бесконечно малым отрезкам времени и переходим к пределам, получаем

$$\frac{dV_1}{d\tau} = -\frac{dV_2}{d\tau}. \quad (10)$$

Подставляем из уравнений (8) и (10) выражения для P_2 и $\frac{dV_2}{d\tau}$ в уравнение (7), имеем

$$\frac{dV_1}{d\tau} = \gamma \sqrt{\frac{2(P_1 - P_o)}{\rho_{ож}}} S_2. \quad (11)$$

Подставляем полученное выражение для $\frac{dV_1}{d\tau}$ из уравнения (11) в уравнение (4), получаем

$$\frac{dP_1}{d\tau} = -kP_1 \frac{1}{V_1} \gamma \sqrt{\frac{2(P_1 - P_o)}{\rho_{ож}}} S_2. \quad (12)$$

Объединяем уравнения (11) и (12) в систему

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\tau} = -kP_1 \frac{1}{V_1} \gamma \sqrt{\frac{2(P_1 - P_o)}{\rho_{ож}}} S_2; \\ \frac{dV_1}{d\tau} = \gamma \sqrt{\frac{2(P_1 - P_o)}{\rho_{ож}}} S_2. \end{cases} \quad (13)$$

Начальные условия системы уравнений (13) принимаем следующие: $P_1(0) = 1,5$ МПа; $V_1(0) = 2$ дм³.

Система дифференциальных уравнений (13) является нелинейной и не имеет аналитического решения. Численное решение возможно с помощью компьютерной программы. Получено оно путем применения метода Рунге-Кутты четвертого порядка с помощью компьютерной программы Statistika 6.0.

Решением системы уравнений (13) являются функции $P_1(\tau)$ и $V_1(\tau)$ – законы изменения параметров во времени. Переходный процесс $P_1(\tau)$ играет важную роль, поскольку определяет согласно (6) закон изменения скорости струи на срезе сопла огнетушителя, а также закон изменения расхода пожаротушающей жидкости. Естественно стремление получить апериодическое (плавное) изменение $P_1(\tau)$, что позволяет обеспечить стабильность подачи огнетушащего вещества и щадящий режим деформации эластичной емкости 2. В качестве регулируемого параметра, влияющего на характер изменения давления $P_1(\tau)$, целесообразно принять конструктивный параметр сопла –

площадь его сечения S_2 . Для этого с помощью компьютерного моделирования решаем систему дифференциальных уравнений (13), находим $P_1(\tau)$ при различных значениях S_2 . Диапазон варьирования S_2 из практических соображений выбираем от 4 до 12 мм².

Характерной особенностью приведенного семейства кривых (рис. 2) является наличие остаточного давления, равного примерно 0,2 МПа, в газовой камере при полной разрядке огнетушителя. Это объясняется изолированностью газовой камеры от атмосферы.

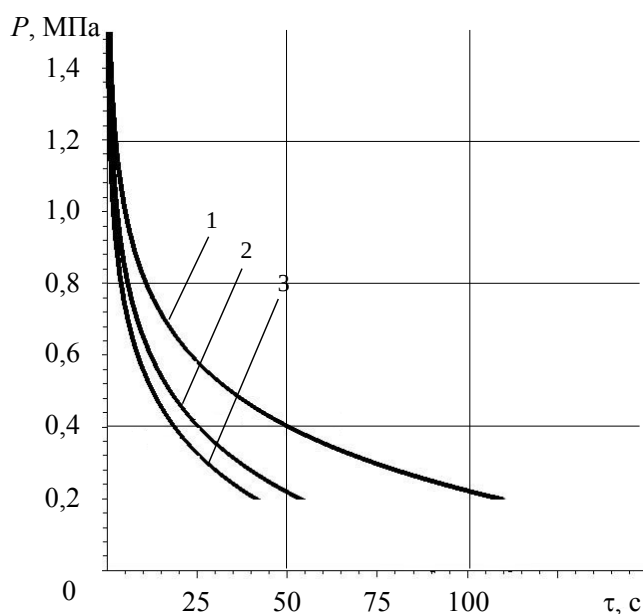


Рис. 2. Семейство кривых изменения давления в зависимости от площади сечения сопла:

1 — площадь сопла 4 мм²; 2 — площадь сопла 8 мм²; 3 — площадь сопла 12 мм²

Длительность подачи огнетушащего вещества составляет 113, 57 и 37 с для площадей сечения сопла 4 (кривая 1), 8 (кривая 2) и 12 мм² (кривая 3) соответственно. Наиболее плавное изменение давления соответствует кривой 1. На основании этого можно считать, что сопло с площадью сечения 4 мм² предпочтительно по сравнению с другими вариантами. При необходимости расхода огнетушащего вещества площадь сопла можно увеличить до 6 мм².

В зависимости от площади сечения сопла наблюдается плавное расширение газа, что создает удовлетворительные условия деформации эластичной емкости (рис. 3). Кривые 1, 2 и 3 соответствуют истечению пожаротушащего вещества через сопла с сечением 4, 8 и 12 мм².

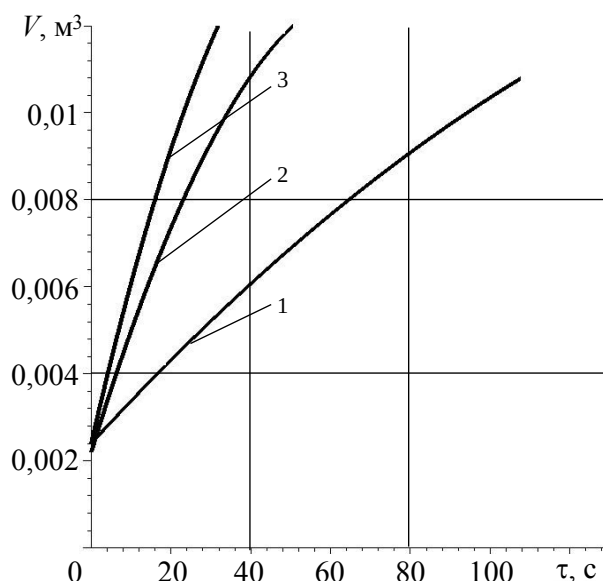


Рис. 3. Семейство кривых изменения объема газа в зависимости от площади сечения сопла:

1 – площадь сопла 4 мм²; 2 – площадь сопла 8 мм²; 3 – площадь сопла 12 мм²

Максимальный объем, равный 12 дм³ (2 дм³ первоначальная зарядка и 10 дм³ вытесненного вещества), достигается при полной разрядке огнетушителя.

Выводы

Разработана математическая модель рабочих процессов в газовой камере ручного закачного огнетушителя, представляющая собой систему из двух нелинейных дифференциальных уравнений. Методом Рунге-Кутты получено численное решение системы уравнений. На основании изучения закономерностей изменения давления в газовой камере установлено, что оптимальное значение конструктивного параметра огнетушителя – площади сечения сопла, равно 4...6 мм².

Список литературы / References

1. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ / А.В. Карпышев, А.Л. Душкин, Н.Н. Рязанцев, А.А. Афанасьев, В.В. Матушкин, М.Д. Сигаль // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 2. – С. 69 – 74.

Karpyshev, A.V., Dushkin, A.L., Ryazantsev, N.N., Afanas'yev, A.A., Matushkin, V.V., Sigal', M.D. *Razrabotka vysokoeffektivnogo universal'nogo ognetushitelya na osnove generatsii struy tonkoraspylyennykh ognetushashchikh veshchestv* [Development of the high-performance universal fire-extinguisher on the

basis of jet generation of fine-air fire-fighting substances]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69 – 74.

2. Мамаев, В.В. Параметры газоаккумулятора автоматического порошкового огнетушителя / В.В. Мамаев, И.Ф. Дикенштейн, А.А. Пилипенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 90 – 98.

Мамayev, V.V., Dikenshteyn, I.F., Pilipenko, A.A. *Parametry gazoakkumulyatora avtomaticheskogo poroshkovogo ognetushitelya* [Parameters of a gas accumulator of an automatic dry powder fire-extinguisher]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 90 – 98.

3. Сытдыков, М.Р. Оценка совершенства пневматического тракта порошковых огнетушителей на основе метода анализа размерностей / М.Р. Сытдыков, Д.Ф. Кожевин, А.С. Поляков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 4. – С. 51 – 54.

Sytdykov, M.R., Kozhevin, D.F., Polyakov, A.S. *Otsenka sovershenstva pnevmaticheskogo trakta poroshkovykh ognetushiteley na osnove metoda analiza razmernostey* [Estimation of perfection of the pneumatic tract of dry powder fire-extinguishers on the basis of the dimensional analysis method]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 51 – 54.

4. Кожевин, Д.Ф. Полезная модель порошкового огнетушителя с пористым сосудом для огнетушащего состава / Д.Ф. Кожевин, М.Р. Сытдыков, А.С. Поляков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 79 – 82.

Kozhevin, D.F., Sytdykov, M.R., Polyakov, A.S. *Poleznaya model' poroshkovogo ognetushitelya s poristym sosudom dlya ognetushashchego sostava* [The useful model of the dry powder fire-extinguisher with the porous vessel for a fire-fighting composition]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 79 – 82.

5. Сытдыков, М.Р. Оценка характеристик порошковых огнетушителей, определяющих полноту вытеснения огнетушащего состава / М.Р. Сытдыков, Д.Ф. Кожевин, А.С. Поляков / Проблемы управления рисками в техносфере. – 2011. – № 4. – С. 16 – 24.

Sytdykov, M.R., Kozhevin, D.F., Polyakov, A.S. *Otsenka kharakteristik poroshkovykh ognetushiteley, opredelyayushchikh polnotu vytesneniya ognetushashchego sostava* [Estimation of characteristics of dry powder fire-extinguishers determining displacement efficiency of a fire-fighting composition]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of risk management in the technosphere*, 2011, no. 4, pp. 16 – 24.

6. Орлов, В.С. Оптимизация давления сжатого газа в порошковых закачных огнетушителях / В.С. Орлов, Ю.И. Осенин // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2011. – № 4, ч. 2. – С. 154 – 161.

Orlov, V.S., Osenin, Yu.I. *Optimizatsiya davleniya szhatogo gaza v poroshkovykh zakachnykh ognetushitelyakh* [Optimization of the compressed gas pressure in dry powder stored-pressure fire-extinguishers]. *Visnyk SNU im. V. Dalya – Bulletin of the V. Dal' SNU*. 2011, no. 4, part 2, pp. 154 – 161.

7. Балта, Д.Ф. Повышение эффективности переносного огнетушителя / Д.Ф. Балта // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 148 – 152.

Balta, D.F. *Povysheniye effektivnosti perenosnogo ognetyshitelya* [Effectiveness increase of the portable fire-extinguisher]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2015, issue 52, pp. 148 – 152.

8. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков [Электронный ресурс]. URL: <https://books.google.com.ua/books?isbn=5458483952> (дата обращения: 25.10.2018).

Gidroprivody i gidropnevmoavtomatika stankov [Hydraulic drives and air hydraulic automatics of machines]. [Electronic resource]. Available at: <https://books.google.com.ua/books?isbn=5458483952> (assessed: 25.10.2018).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 24.10.2018

Pyotr Semyonovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science;

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-02

IMPROVEMENT OF THE CONSTRUCTION OF STORED-PRESSURE HAND FIRE-EXTINGUISHERS

Purpose. Ensuring of the efficient operation of the stored-pressure fire-extinguishers by any spatial disposition of them.

Methods. Analytical and experimental investigations of processes and conditions of displacement of fire-fighting substances out of the stored-pressure hand fire-extinguishers.

Results. The conducted theoretical and experimental investigations of the processes of displacement of the fire-fighting substances out of the stored-pressure hand fire-extinguishers have allowed making changes in the construction of the fire-extinguisher, what ensures its effective operation in any spatial position.

Scientific novelty. The mathematical model of the working process of displacement of the fire-fighting liquid has been worked out in the form of nonlinear differential equations, the optimal value of a design factor of the stored-pressure fire-extinguisher, i.e. the sectional area of its nozzle, has been substantiated.

Practical value. The worked out construction of the stored-pressure hand fire-extinguisher guarantees the most total displacement of the fire-fighting substance out of its case.

Key words: stored-pressure fire-extinguisher; flexible container; case; fire-fighting substance; spatial disposition of the fire-extinguisher; working efficiency.

УДК [614.844.2:614.842.612]:001.891.57

*Петр Семёнович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по научной работе;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;*

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

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

Михаил Никитович Болдырев, завсектором; e-mail: mihnik68@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*

МЕХАНИЗМ ПЕРВИЧНОГО КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ ПОЖАРОТУШАЩЕГО УСТРОЙСТВА

Цель. Определение механизма и времени первичного каплеобразования в камере смешения пожаротушащего устройства газодинамического типа, исследование движения капли в процессе отделения от струи, параметров капли.

Метод. Учёт системы сил, действующих на элемент струи в камере смешения, составление и решение дифференциальных уравнений движения, нахождение времени каплеобразования и диаметра капли.

Результаты. Сделано предположение о том, что первичное каплеобразование в камере смешения пожаротушащего устройства осуществляется за счет продольных осевых сил, действующих на элемент струи. Элемент струи превращается в каплю при действии сдвигающих сил аэродинамического сопротивления и силы вязкого трения, когда смещение превышает диаметр жиклерного отверстия. В результате решения дифференциальных уравнений получены законы изменения скорости и пути капли в функции времени. Получено время каплеобразования и диаметр капли. Диаметр капли получен в предположении, что элемент струи при его отделении от струи превращается в равновеликую по объему сферическую жидкую частицу.

Научная новизна. Предложен механизм первичного каплеобразования в камере смешения пожаротушащего вещества, при котором образование капли осуществляется за счет продольных осевых сил аэродинамического сопротивления и вязкого трения. Получены дифференциальные уравнения движения, найдены законы изменения скорости и пути капли. Показано, что время каплеобразования находят из условия смещения капли на размер диаметра струи. Уравнение, соответствующее этому условию, является трансцендентным и не имеет решения в элементарных функциях.

Практическая значимость. Построена математическая модель процесса первичного каплеобразования, связывающая конструктивные и режимные параметры камеры смешения и диаметр генерируемых капель. Предложенная математическая модель совместно с математической моделью газодинамических процессов в двухфазном сопле образует обобщенную модель, которая может быть использована на этапе проектирования пожаротушащего устройства.

Ключевые слова: газодинамическое устройство; камера смешения; механизм каплеобразования; математическая модель; двухфазное пожаротушащее устройство.

Постановка проблемы. Одной из ведущих тенденций развития пожаротушащих устройств является технология пожаротушения

тонкораспыленной водой, основанная на ликвидации возгорания каплями воды с эффективным диаметром не более 150 мкм. Это объясняется тем, что при уменьшении диаметра водяной капли менее 150 мкм механизм тушения огня существенно меняется. Тонкораспыленная вода обладает высокой проникающей и охлаждающей способностью, эффективно поглощает твердые частицы дыма, позволяет надежно тушить пожары при интенсивности подачи огнетушащего вещества менее $0,03 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ в течение 10...60 с [1]. Для повышения эффективности применения пожаротушащего вещества необходимо добиваться как можно большей диспергации воды, то есть ее дробления до частиц, соответствующих размерам капель тумана (5...10 мкм) при одновременном увеличении дальности заброса.

Увеличение дальноточности устройства пожаротушения тонкораспыленной водой однозначно связано с существенным увеличением скорости газокпельного потока на выходе сопла. Эффективное решение такой двойственной задачи (уменьшение диаметра капель и повышение скорости) в ранцевых устройствах пожаротушения осуществляется за счет применения газодинамических (двухфазных) сопел с внутренним распылением пожаротушащего вещества. Конструкция устройств газодинамического распыления предусматривает размещение камеры смешения жидкости и газа перед входом в газовый канал сопла. Поток воды под избыточным давлением около 0,7...1,0 МПа подается через жиклерные отверстия в распылительной втулке во внутреннюю полость камеры смешения. При взаимодействии высокоскоростного осевого газового потока с перпендикулярно направленными струйками жидкости происходит первичное каплеобразование. В дальнейшем капли выносятся в газовый канал сопла, где разгоняются и подвергаются разрушению в соответствии с критерием Вебера. Течение двухфазной жидкости в разгонном сопле рассмотрено в работах [2, 3], где считается заданным диаметр частиц, поступающих на вход сопла. Вопрос аналитического определения диаметра капель при их первичном образовании в камере смешения в известной литературе не рассматривался. Поэтому создание полной математической модели всего ранцевого устройства пожаротушения, включающей исследование механизма первичного каплеобразования, является актуальной проблемой, решение которой позволяет установить связь конструктивных параметров камеры смешения с газодинамическими характеристиками сопла.

Анализ последних исследований. В работе [4] представлен механизм тушения тонкораспыленной водой и доказана эффективность применения систем пожаротушения тонкораспыленной водой на ранней стадии. Получение тонкораспыленной воды в высокоскоростном газовом потоке рассмотрено в статье [5]. Воду подают в коллекторную полость через жиклеры перед самым выходом из сопла – в сверхзвуковой части струи. Струи жидкости дробятся на крупные капли, которые затем распадаются на более мелкие в высокоскоростном газовом потоке. В работе [6] исследовано распределение

среднемассовых капель, их скоростей во входном сечении каплеотделителя теплообменного аппарата, причем начальное распределение капельной среды задавалось с помощью функции распределения капель по размерам, полученной экспериментальным (счетно-импульсным) путем. В работе [3] исследованы двухфазные сопла, в которых для повышения скорости жидкости используют энергию газовой фазы, а в начальном сечении получаемой струи присутствует и газ, и жидкость, разработаны физическая и математическая модели потока, проведены экспериментальные исследования его пространственной структуры.

Во всех приведенных работах основное внимание уделено описанию процессов в газовом канале газодинамического сопла. При этом начальное распределение капель по диаметру считают заданным или экспериментально определенным. При этом механизм первичного каплеобразования в камере смешения в литературе не рассмотрен, отсутствует теоретическая оценка капель, поступающих на вход разгонного сопла.

Цель работы – исследование процесса первичного каплеобразования в камере смешения пожаротушающего устройства газодинамического типа.

Материалы исследования. Процесс первичной генерации капель из подводимого потока воды осуществляется в специальной камере смешения, расположенной перед газодинамическим соплом. Внутреннее распыление жидкости осуществляется за счет взаимодействия высокоскоростного осевого газового потока с перпендикулярно направленными струйками жидкости, поступающими через систему мелких отверстий в распылительной втулке. Для впрыскивания в камеру смешения воды используют отверстия с минимально возможным (технически осуществимым) диаметром. На практике диаметр отверстия выбирают в пределах 1,0...1,2 мм. Стремление получить как можно более тонкие струйки жидкости объясняется тем, что при генерации капель осевой газовый поток теряет меньше кинетической энергии, одновременно увеличивается количество капель, уменьшается их диаметр.

Схема формирования газокapельного потока в ранцевом устройстве пожаротушения показана на рис. 1. Для понимания механизма каплеобразования в камере смешения рассмотрим систему сил, действующих на элемент тонкой струйки. Под элементом тонкой струйки будем понимать малую часть струйки, превращающуюся в каплю при ее срыве осевым газовым потоком. На элемент струйки действуют следующие силы:

F_g – сила гидравлического давления, Н;

F_c – сила аэродинамического сопротивления, Н;

F_T – сила вязкого трения Ньютона (сила сдвига), Н.

Результирующая сила R является векторной суммой трех вышеперечисленных сил и направлена под углом к осевому газовому потоку.

С точки зрения отрыва капли от струи важны только горизонтальные силы F_c и F_T . На основании этого уравнение перемещения (сдвига) элемента струи запишем в следующем виде:

$$m \frac{d\omega}{dt} = F_c - F_T, \quad (1)$$

где m – масса капли, кг;

ω – скорость капли, м/с.

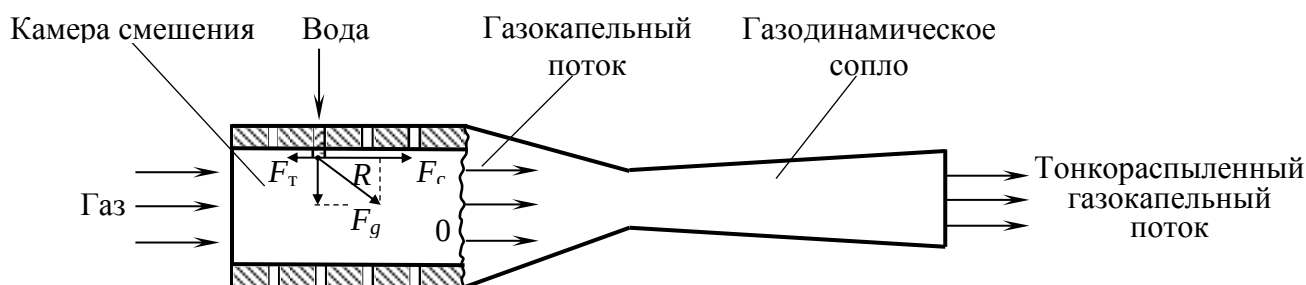


Рис. 1. Схема формирования газокapельного потока в ранцевом устройстве пожаротушения

Сила аэродинамического сопротивления имеет вид

$$F_c = \frac{\rho C_D A_D}{2} |u - \omega| (u - \omega), \quad (2)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;

C_D – коэффициент сопротивления;

A_D – миделевое сечение капли, м²;

u – скорость газа, м/с.

Сила вязкого трения Ньютона находится из равенства

$$F_T = \mu S \frac{d\omega}{dy}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воды, Па·с;

S – площадь трения, м²;

$\frac{d\omega}{dy}$ – градиент скорости, с⁻¹;

y – координата поперечного перемещения капли, м.

Из уравнений (1) и (3) следует, что переменная ω имеет две производных: по времени и по координате поперечного перемещения y . Детальный анализ

показывает, что y не является независимой переменной. Действительно, поперечное перемещение капли можно представить в виде уравнения

$$y = vt,$$

где v – скорость струи жидкости в отверстии, м/с;

t – время, с.

На незначительном расстоянии от отверстия скорость струи не изменяется, поэтому

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p},$$

где φ – коэффициент скорости;

Δp – перепад давления на отверстии, Па.

Следовательно $y = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} t$, а дифференциал $dy = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} dt$.

Подставляя dy в уравнение (3), получим

$$F_T = \frac{\mu S}{\varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} \frac{d\omega}{dt}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (2) и (4) в (1), получаем уравнение движения капли

$$m \frac{d\omega}{dt} = \frac{\rho C_D A_D}{2} \left| u - \omega \right| (u - \omega) - \frac{\mu S}{\varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

Массу капли находим по формуле

$$m = \frac{\rho \pi D^2}{4} y = \frac{\rho \pi D^2}{4} \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} t, \quad (6)$$

где D – диаметр отверстия распылителя, м.

Площадь миделевого сечения равна

$$A_D = D \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} t, \quad (7)$$

Подставляя выражения (6) и (7) в (5), получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{\pi D^2}{4} \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} t \frac{d\omega}{dt} = \frac{C_D D \varphi \sqrt{2\rho} \sqrt{\Delta p} t}{2} (u - \omega)^2 - \frac{\mu S}{\varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} \frac{d\omega}{dt}. \quad (8)$$

Уравнение (8) допускает аналитическое решение методом разделения переменных. Для этого выполним преобразование

$$\frac{d\omega}{(u - \omega)^2} = C_D D \varphi \sqrt{2\rho} \sqrt{\Delta p} t dt / \left[2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \varphi \sqrt{2\rho} \sqrt{\Delta p} t + \frac{\mu S}{\varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p}} \right) \right]. \quad (9)$$

Полагаем, что начальные условия $\omega(0) = t(0) = 0$.

Интегрируем обе части уравнения (9):

$$\frac{1}{u - \omega} \Big|_0^\omega = \int_0^t t dt / \left(\frac{\pi D}{2 C_D} t + \frac{\mu S}{D \Delta p \varphi^2 C_D} \right).$$

Подынтегральная функция в правой части уравнения является неправильной дробно-рациональной функцией, поскольку показатель степени числителя равен показателю степени знаменателя. Поэтому в подынтегральном выражении выделяем целую и дробную части, складываем и почленно интегрируем:

$$\frac{1}{u - \omega} \Big|_0^\omega = \left[\frac{2 C_D}{\pi D} t - \frac{4 \mu C_D S}{\pi^2 \varphi^2 D^3 \Delta p} \ln \left(\frac{\pi D}{2 C_D} t + \frac{\mu S}{D \Delta p \varphi^2 C_D} \right) \right] \Big|_0^t.$$

Отсюда получаем

$$\omega = u - \left(\frac{2 C_D}{\pi D} t - \frac{4 \mu C_D S}{\pi^2 \varphi^2 D^3 \Delta p} \ln \left(\frac{\pi D^2 \varphi^2 \Delta p}{2 \mu S} t + 1 \right) + \frac{1}{u} \right)^{-1}.$$

Учитывая, что $\omega = \frac{dx}{dt}$, снова получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dx}{dt} = u - \left(\frac{2C_D}{\pi D} t - \frac{4\mu C_D S}{\pi^2 \varphi^2 D^3 \Delta p} \ln \left(\frac{\pi D^2 \varphi^2 \Delta p}{2\mu S} t + 1 \right) + \frac{1}{u} \right)^{-1}.$$

Интегрируя полученное дифференциальное уравнение по переменной t , получаем

$$x = ut - \int_0^t dt \left/ \left[\frac{2C_D}{\pi D} t - \frac{4\mu C_D S}{\pi^2 \varphi^2 D^3 \Delta p} \ln \left(\frac{\pi D^2 \varphi^2 \Delta p}{2\mu S} t + 1 \right) + \frac{1}{u} \right] \right. \quad (10)$$

В найденном выражении для x интеграл, стоящий в правой части уравнения, не выражается через стандартные функции (интегральный логарифм), то есть не берётся.

Для приближенного интегрирования разложим в степенной ряд Тейлора логарифмическую функцию, ограничиваясь двумя первыми членами ряда, и получим

$$\ln \left(\frac{\pi D^2 \varphi^2 \Delta p}{2\mu S} t + 1 \right) \approx \frac{\pi D^2 \varphi^2 \Delta p}{2\mu S} t - \frac{\pi^2 D^4 \varphi^4 \Delta p^2}{8\mu^2 S^2} t^2.$$

Подставляя приближенное значение логарифма в уравнение (10) и произведя интегрирование, получаем

$$x = ut - \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2\mu S U}{C_D D \Delta p}} \operatorname{arctg} \left(\varphi \sqrt{\frac{C_D D \Delta p U}{2\mu S}} t \right).$$

Будем считать, что каплеобразование происходит при условии сдвига элемента струи на размер диаметра распылительного отверстия, то есть при $x = D$. Следовательно, условие отделения капли от струи можно записать в виде

$$D = ut - \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2\mu S U}{C_D D \Delta p}} \operatorname{arctg} \left(\varphi \sqrt{\frac{C_D D \Delta p U}{2\mu S}} t \right). \quad (11)$$

Из этого уравнения находим время t первичного каплеобразования. Однако уравнение (11) является трансцендентным и не имеет аналитического решения в стандартных функциях. Приближенное графическое решение уравнения (11) получено с помощью компьютерной программы Mapl-9 как точка пересечения двух функций: $y_1 = ut - D$ и

$$y_2 = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2\mu SU}{C_D D \Delta p}} \operatorname{arctg} \left(\varphi \sqrt{\frac{C_D D \Delta p U}{2\mu S}} t \right) \quad (\text{рис. 2}).$$

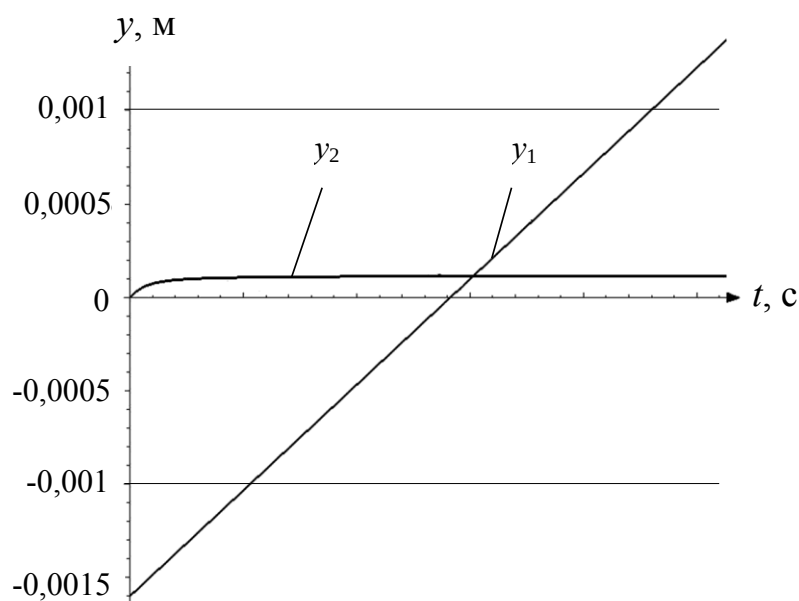


Рис. 2. Графическое решение трансцендентного уравнения

Абсцисса точки пересечения графиков y_1 и y_2 дает значение, приблизительно равное $3,03 \cdot 10^{-5}$ с (более точное значение, выданное компьютером, равно $0,00003027131688$ с). Зная время каплеобразования, находим объем капли:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} t,$$

где V – объем капли, м^3 .

Подставляя численные значения, имеем $V = 0,0744 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$.

После отрыва от струи капля приобретает под действием сил поверхностного натяжения форму, близкую к сферической. Поэтому диаметр d равновеликого жидкого шара найдем из выражения $d = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = 1,1244 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,12 \text{ мм}$.

Диаметр капли, полученный теоретическим путем, требует экспериментального подтверждения. Однако провести экспериментальные исследования по определению диаметра капли внутри камеры смешения чрезвычайно сложно, отсутствуют примеры таких исследований. Выходом из этой ситуации может быть предлагаемый расчетно-экспериментальный способ определения диаметра капли, основанный на выполнении уравнения неразрывности капельного потока в произвольном сечении ствола пожаротушащего устройства, включая и камеру смешения. Ранее проведенные экспериментальные исследования по определению массового расхода пожаротушащего вещества позволили установить фактическое значение расхода, равное 0,35 кг/с, что соответствует объемному расходу 0,35 дм³/с. В камере смешения указанный расход составляет сумма расходов распылительных отверстий одинакового сечения. При количестве отверстий, равном 16, расход, приходящийся на одно распылительное отверстие, равен $0,35/16 = 21875 \text{ мм}^3/\text{с}$. Зная время каплеобразования из одного распылительного отверстия, находим объем одной капли: $V = 0,6628125 \text{ мм}^3$.

По объему капли определяем ее диаметр: $d = 1,08 \text{ мм}$.

Сравнивая диаметр капли, найденный теоретическим путем (1,12 мм), с диаметром капли, найденным расчетно-экспериментальным путем (1,08 мм), приходим к выводу, что расхождение составляет 3,7 %. Хорошее совпадение диаметра капли, полученное теоретически и расчетно-экспериментально, подтверждает правильность проведенных расчетов.

Выводы

1. Определён механизм первичного каплеобразования в камере смешения пожаротушащего вещества, заключающийся в том, что отделение капли от струи осуществляется за счет двух продольных осевых сил – аэродинамического сопротивления и вязкого трения.

2. Получены уравнения движения капли в процессе отделения от струи. Предложен критерий каплеобразования, согласно которому отделение капли от струи происходит в момент, когда координата перемещения капли равна диаметру отверстия распылителя.

3. Получено трансцендентное уравнение для определения времени каплеобразования. Численное решение уравнения в среде Maple-9 дает время первичного каплеобразования, равное $3,03 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

4. Получено выражение и определен диаметр жидкой сферической капли, равный 1,12 мм.

5. Сравнение диаметра капли, полученного теоретически, с диаметром капли, найденным расчетно-экспериментальным путем, показывает хорошее совпадение результатов. Расхождение составляет 3,7 %, что подтверждает правильность теоретических исследований и численных расчетов.

Список литературы / References

1. Пожаротушение тонкораспыленной водой [Электронный ресурс]. URL: http://www.atsyst.ru/fighting_watersprinkl.html (дата обращения: 13.03.2018). *Pozharotusheniye tonkoraspylyennoy vodoy* [Fire-extinguishing with fine-air water] [Electronic resource]. Available at: http://www.atsyst.ru/fighting_watersprinkl.html (accessed: 13.03.2018).
2. Бариллович, В.А. Основы термобагазодинамических двухфазных потоков и их численное решение / В.А. Бариллович. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 425 с.
Barilovich, V.A. *Osnovy termogazodinamicheskikh dvukhfaznykh potokov i ikh chislennoye resheniye* [Grounds of thermogas dynamic two-phase flows and their numerical solution]. Saint Petersburg, Izd-vo Politekh. un-ta Publ., 2009, 425 p.
3. Ципенко, А.В. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.02 / А.В. Ципенко. – М., 2006. – 41 с.
Tsipenko, A.V. *Teoriya i metody povysheniya effektivnosti protivopozharnykh sistem na vozdushnom transporte. Avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk: 05.26.02* [Theory and methods of effectiveness increase of fire-control systems in air transport. Abstract of a thesis dr. tech. sci. diss.: 05.26.02]. Moscow, 2006, 41 p.
4. Корольченко, Д.А. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях / Д.А. Корольченко, Ю.В. Громовой, О.О. Ворогушин // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т.20, № 9. – С. 54 – 56.
Korol'chenko, D.A., Gromovoy, Yu.V., Vorogushin, O.O. *Primeneniye tonkoraspylyennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh* [Use of the fine-air water for fighting the fires in high-rise buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire and explosion safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54 – 56.
5. Андриюшкин, А.Ю. Получение тонкораспыленной воды газодинамическим распылением / А.Ю. Андриюшкин, М.Т. Пелех // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. – С. 53 – 58.
Andryushkin, A.Yu., Pelekh, M.T. *Polucheniye tonkoraspylyennoy vody gazodinamicheskim raspyleniyem* [Generation of the fine-air water by means of the gas-dynamic atomization]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii* – *Bulletin of the Saint-Petersburg University of the State fire-prevention service of the Ministry of Emergency Situations (Russia)*, 2012, no. 1, pp. 53 – 58.
6. Братута, Э.Г. Определение исходных данных для расчета каплеотделителей контактных теплообменных аппаратов / Э.Г. Братута, Р.Т. Акпен, С.В. Боровок // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – Киев: Техника, 2007. – Вып. 76. – С. 221 – 226.

Bratuta, E.G., Akpen, R.T., Borovok, S.V. *Opredeleniye iskhodnykh dannykh dlya raschyeta kapleotdeliteley kontaknykh teplomassoobmennyykh apparatov* [Determination of basic data for calculation of drop separators of contact heat-mass exchange apparatus]. *Kommunal'noye khozyaystvo gorodov: nauch.-tekhn. sb. – Community facilities of towns: scientific-technical collected articles*. Kiev, Tekhnika Publ., 2007, issue 76, pp. 221 – 226.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 06.04.2018

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;

Mikhail Nikitovich Boldyrev, sector head; e-mail: mihnik68@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

A MECHANISM OF INITIAL DROP FORMATION IN A MIXING CHAMBER OF A FIRE-FIGHTING EQUIPMENT

Purpose. Determination of the mechanism and time of the initial drop formation in the mixing chamber of the fire-fighting equipment, gas-dynamic type, investigation of the drop motion in the process of separation from the jet, of drop parameters.

Method. Registration of the system of forces having an effect upon an element of the jet in the mixing chamber, generation and solving the differential motion equations, finding the time of the drop formation and the drop diameter.

Results. The assumption has been made that the initial drop formation is put into effect in the mixing chamber of the fire-fighting equipment by the longitudinal axial forces influencing on the element of the jet. The element of the jet changes into the drop by the action of the aerodynamic drag shearing forces and the viscous friction force when the removal exceeds the diameter of the jet opening. As a result of solving the differential equations the laws of velocity and drop way variation in terms of time have been obtained. The time of drop formation and the drop diameter have been obtained. The drop diameter has been obtained on the assumption that the element of the jet changes by its separation from the jet into the spherical liquid particle which is equivalent by volume.

Scientific novelty. The mechanism of the initial drop formation in the mixing chamber of the fire-fighting equipment has been proposed which the drop formation is put into effect by the aerodynamic resistance longitudinal axial forces and the viscous friction by. The differential motion equations have been obtained, the laws of velocity and drop way variation have been found. It is shown that one find the time of drop formation from the condition of drop removal by the jet diameter size. The equation that corresponds with this condition is transcendent and has no solution in elementary functions.

Practical value. The mathematical model of the process of the initial drop formation connecting the design and operating parameters of the mixing chamber and the diameter of the drops being generated has been built. The proposed mathematical model and the mathematical model of the gas-dynamic processes in the two-phase nozzle form the generalized model in common that can be used at the stage of projecting the fire-fighting equipment.

Keywords: gas-dynamic equipment; mixing chamber; mechanism of drop formation; mathematical model; two-phase fire-fighting equipment.

УДК 552.57:[544.723:546.21]

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

ПАРАМЕТРЫ АДСОРБЦИИ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТИ УГЛЯ

Цель. Исследовать процесс адсорбции кислорода на поверхности угля с помощью газохроматографического метода.

Методика. Экспериментальное исследование изотерм адсорбции кислорода на хроматографическом комплексе «ХРОМОС ГХ-1000» с автоматической разметкой пиков, что позволяет повысить точность определения параметров удерживания анализируемого вещества.

Результаты. Рассмотрен принцип построения изотерм Генри и Ленгмюра на примере адсорбции кислорода углем марки Т шахты «Коммунарская» с использованием хроматографических параметров удерживания. Установлено, что зависимость концентрации адсорбированного кислорода уменьшается с увеличением температуры. Это связано с влиянием температурных условий на протекание процесса физической адсорбции. Рассчитаны значения максимальной концентрации адсорбированного кислорода в диапазоне температур от 303 до 403 К. Показано, что для значений предельной концентрации адсорбированного кислорода характерен минимум, соответствующий критической температуре самовозгорания угля, установленной в результате исследования его химической активности в данном температурном диапазоне. С использованием построенной изотермы Ленгмюра при одинаковой степени заполнения монослоя рассчитана теплота адсорбции для двух температурных диапазонов. Полученные данные позволяют говорить об изменении механизма взаимодействия кислорода с поверхностью угля при достижении углем критической температуры самовозгорания.

Научная новизна. Хроматографический метод позволяет на основании параметров адсорбции рассмотреть процесс окисления угля, ответственный за развитие его самонагревания.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют оценить вклад физической и химической адсорбции в процесс окисления угля, используя данные хроматографического исследования его химической активности.

Ключевые слова: *изотерма адсорбции; физическая и химическая адсорбция; теплота адсорбции; кислород; уголь.*

Постановка проблемы. Окисление углей представляет собой сложный гетерогенный процесс, в котором первоначальной простейшей формой взаимодействия с кислородом является адсорбция, заключающаяся в поглощении газа твердой поверхностью. Сорбционные процессы являются источником самонагревания угля и формирования условий теплового баланса при переходе самонагревания в самовозгорание, поэтому представляют интерес с точки зрения предупреждения пожароопасной ситуации.

По механизму взаимодействия молекул кислорода (адсорбата) с активными центрами поверхности угля (адсорбента) выделяют физическую и химическую адсорбцию, которые отличаются природой реагирования и энергетическим барьером. Для физической адсорбции характерно взаимодействие

между молекулами адсорбата и адсорбента за счет сил Ван-дер-Ваальса с энергией адсорбционного взаимодействия около 10 кДж/моль. Из-за низкого значения потенциального барьера физическую адсорбцию называют неактивированной. Химическая адсорбция – реакция взаимодействия молекул адсорбата с активными центрами адсорбента – с энергией адсорбционного взаимодействия более 60 кДж/моль может быть активированной и неактивированной, но всегда локализованной из-за прочной связи между молекулами (атомами) реагирующих веществ [1, 2].

Адсорбцию газов характеризуют количеством вещества, поглощенного 1 см³ или 1 г поверхности адсорбента, и устанавливают зависимость его от давления системы, т.е. определяют уравнение изотермы адсорбции. Форма изотермы зависит от многих параметров, таких, как свойства адсорбента и адсорбата, их взаимодействия между собой в газовой фазе и в адсорбированном состоянии [3].

Для определения количества адсорбированного вещества a , моль/см³, используют статические или проточные методы, когда адсорбция протекает в закрытой или открытой системе соответственно. Контролируют уменьшение количества адсорбтива (волюметрические методы с измерением объема сорбируемого газа) и увеличение количества адсорбата (гравиметрические методы с измерением привеса на твердом образце). Широкое распространение вследствие достаточной простоты стандартной газохроматографической аппаратуры получили проточные методы, в которых поверхность угля непрерывно продувается газообразной смесью адсорбтива и низкокипящего газа.

Цель данных исследований – изучение параметров адсорбции кислорода на поверхности угля с помощью хроматографического комплекса «ХРОМОС ГХ-1000», имеющего автоматическую разметку пиков и позволяющего с высокой точностью определять параметры удерживания анализируемого вещества.

Если рассматривать динамику процесса адсорбции, то концентрация поглощенного вещества будет тем больше, чем больше количество ударов молекул газа о поверхность (т.е. чем больше давление газа) и чем больше время пребывания молекулы на поверхности от момента удара до момента ее перехода обратно в газовую фазу. Предполагают, что каждый удар молекулы сопровождается задержкой ее на поверхности, независимо от того, есть уже на ней другие молекулы или нет. В действительности молекула, ударившаяся в уже занятое место, может отразиться обратно в газовую фазу или задержаться, но время ее удержания будет другим. С учетом этого Генри предложено простое уравнение мономолекулярной адсорбции [1, 3]

$$\Theta = kP, \quad (1)$$

где Θ – доля заполнения поверхности адсорбированными молекулами;

k – коэффициент пропорциональности, Па⁻¹;

P – давление, Па.

Изотерма Генри показывает, что адсорбция пропорциональна давлению газа и может быть использована в отсутствие межмолекулярных взаимодействий в адсорбционном слое, т.е. для случая физической адсорбции. Уравнение Генри справедливо при очень низких степенях заполнения Θ молекулами адсорбата однородной поверхности адсорбента. Коэффициент пропорциональности k зависит главным образом от температуры и характера взаимодействия адсорбента с адсорбатом.

Доля заполнения поверхности адсорбированными молекулами прямо пропорциональна концентрации адсорбированного вещества a , моль/см³, поэтому на примере угля марки Т шахты «Коммунарская», пласта h_3 рассмотрим хроматографический метод исследования процесса адсорбции кислорода.

Абсолютная скорость перемещения зоны адсорбированного кислорода по слою угля в колонке w , см/мин, равна

$$w = \frac{\alpha_s}{\vartheta_c + \Gamma \vartheta_a}, \quad (2)$$

где α_s – объемная скорость потока газа-носителя, см³/мин;

ϑ_c и ϑ_a – объем пространства в колонке, занимаемый подвижной и неподвижной фазой соответственно на 1 см длины колонки, см³;

Γ – коэффициент адсорбции Генри;

$$\Gamma = C_a / C; \quad (3)$$

C_a и C – концентрация введенного в колонку кислорода в неподвижной и подвижной фазе соответственно, моль/см³.

Если в уравнении (3) заменить C_a концентрацией адсорбированного кислорода и использовать параметры хроматографического пика, то

$$\frac{da}{dC} = \frac{V - V_0}{V_a}, \quad (4)$$

где V – объем удерживания десорбирующегося кислорода, см³;

V_0 – объем удерживания газа-носителя, см³;

V_a – объем, занимаемый углем, см³.

Интегрируя уравнение (4), получим выражение, связывающее концентрацию адсорбированного вещества a_i с его равновесной концентрацией C_i :

$$a_i = \frac{1}{V_a} \int_0^{C_i} (V_i - V_0) dC. \quad (5)$$

Так как концентрация кислорода в любой точке хроматографической кривой пропорциональна значению сигнала детектора и равна

$$C = Kh, \quad (6)$$

где K – постоянная прибора, моль/(см³·мВ);

h – высота, мВ,

то выражение (5) запишем в виде

$$a_i = f(C_i) = \frac{\alpha_s K}{V_a} S_i, \quad (7)$$

где S_i – площадь пика, мВ·мин.

Постоянную прибора определим из хроматографической кривой для известного количества кислорода по формуле

$$K = \frac{q}{\alpha_s S}, \quad (8)$$

где q – количество кислорода, моль.

Полученные экспериментальные значения a_i , обозначенные на рис. 1 маркерами, при различных значениях давления P для диапазона температур от 303 до 403 К аппроксимированы линейной зависимостью с коэффициентом корреляции $r = 0,99$.

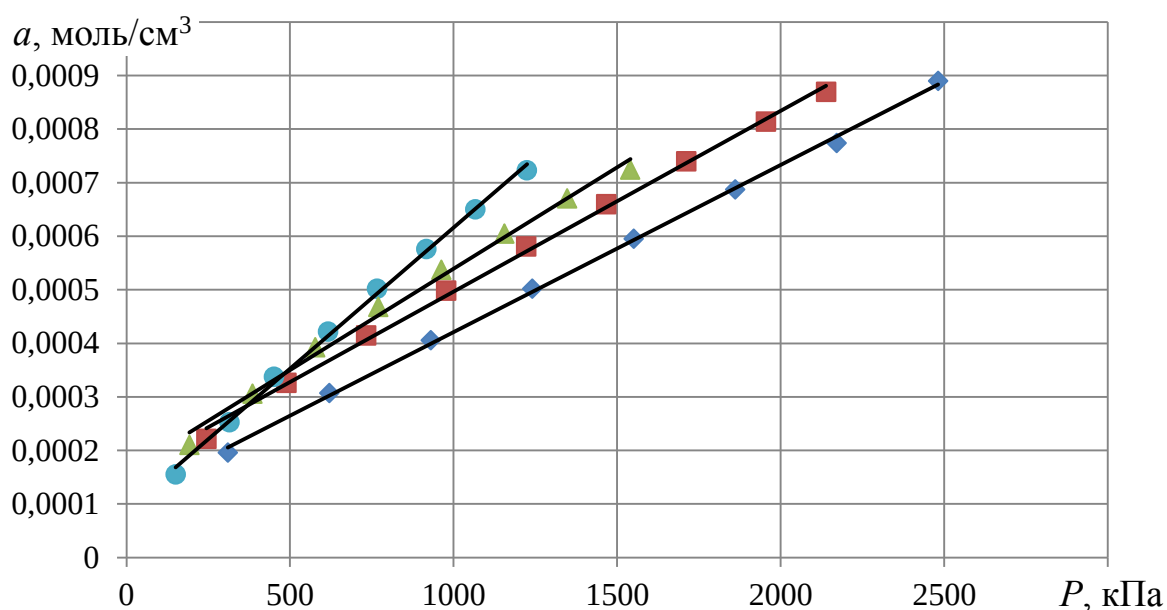


Рис. 1. Зависимость концентрации адсорбированного кислорода от давления при различной температуре:

● 303 К; ▲ 343 К; ■ 383 К; ◆ 403 К

Как видно из полученных данных, при одном значении P концентрация адсорбированного кислорода уменьшается с увеличением температуры. Это связано с влиянием температурных условий на протекание процесса физической адсорбции. Высокая подвижность молекул на поверхности при повышении температуры приводит к десорбции образующегося слоя. Дальнейшее повышение температуры может переводить физическую адсорбцию в химическую, имеющую более прочные связи. С увеличением давления рост адсорбированного мономолекулярного слоя замедляется, так как молекула адсорбата испытывает трудности в закреплении на еще не занятом пространстве поверхности адсорбента.

Однако изотерма Генри не позволяет определить значение максимального количества кислорода, которое может быть адсорбировано на поверхности угля, поэтому рассмотрим модель Ленгмюра, описывающую случай монослойной адсорбции в виде [4, 5]

$$\Theta = \frac{bP}{1+bP}, \quad (9)$$

где b – адсорбционный коэффициент, зависящий от энергии адсорбции, Па^{-1} .

Если использовать соотношение $\Theta = a/a_m$, то уравнение (9) примет вид

$$a = a_m \frac{bP}{1+bP} \text{ или в линеаризованном виде } \frac{P}{a} = \frac{1}{a_m b} + \frac{P}{a_m}, \quad (10)$$

где a – концентрация адсорбированного кислорода, моль/см^3 , при его парциальном давлении P , кПа ;

a_m – максимальная концентрация кислорода в монослое, моль/см^3 .

Установление зависимости $P/a = f(P)$ дает возможность с помощью коэффициентов линейного уравнения (10) определить a_m при различной температуре. На рис. 2 представлены линейные зависимости и рассчитанные значения максимальной концентрации кислорода в монослое.

Анализ полученных данных показывает, что при температуре 343 К определено минимальное значение a_m , которое соответствует критической температуре самовозгорания угля ($T_{\text{кр}} = 346 \text{ К}$), установленной в результате исследования его химической активности в данном температурном диапазоне. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению реакционной активности угля, связанной с изменением механизма адсорбции. Прочность адсорбционного слоя может быть оценена по теплоте адсорбции.

Используя изотермы адсорбции, построенные при разных температурах, можно рассчитать теплоту адсорбции ΔH_s , Дж/моль, по уравнению Клаузиуса-Клапейрона [3]

$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_{\Theta} = -\frac{\Delta H_s}{RT^2} \text{ или } \left(\frac{\partial \ln P}{\partial (1/T)}\right)_{\Theta} = -\frac{\Delta H_s}{R}. \quad (11)$$

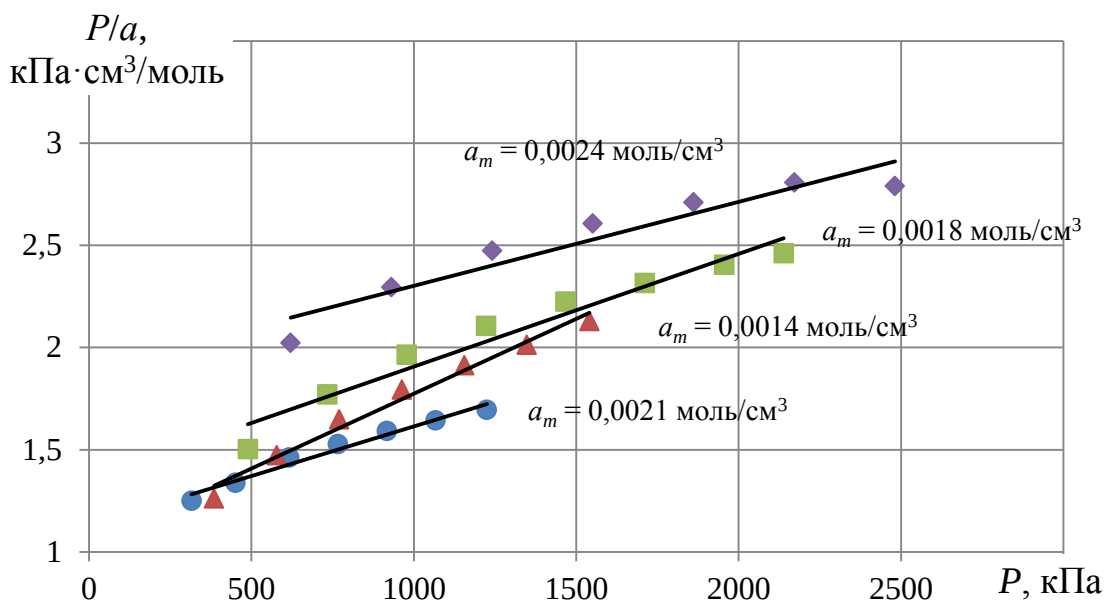


Рис. 2. Зависимость отношения P/a от давления при различной температуре:

● 303 К; ▲ 343 К; ■ 383 К; ◆ 403 К

Одинаковая степень заполнения Θ при двух разных температурах будет получена при разных парциальных давлениях, поэтому теплоту адсорбции рассчитываем по формуле

$$\Delta H_s = R \frac{\ln(P_2/P_1)}{1/T_2 - 1/T_1}. \quad (12)$$

Значения теплоты адсорбции кислорода на поверхности исследуемого угля, полученные обработкой изотерм Генри и Ленгмюра, рассчитаны для двух участков температурного диапазона и представлены в таблице.

Теплота адсорбции кислорода

T , К	P , Па	Θ	ΔH_s , Дж/моль
303	916,6	0,280	9939,3
343	577,7		
383	1466,8	0,364	-33625,7
403	2481,5		

Значение ΔH_s для первого диапазона температур характерно при физической адсорбции кислорода. Во втором температурном диапазоне значение ΔH_s увеличилось более чем в три раза, что свидетельствует о возрастании прочности адсорбции, однако недостаточно для образования новых химических соединений. Тем не менее полученные данные позволяют говорить об изменении механизма взаимодействия кислорода с поверхностью угля при достижении углем критической температуры самовозгорания.

Выводы. Показана принципиальная возможность исследования процесса адсорбции кислорода на поверхности угля с помощью хроматографического метода. На основании изотерм мономолекулярной адсорбции рассмотрено изменение межмолекулярного взаимодействия кислорода с углем. Представляет интерес сопоставление аналогичных данных для углей различной стадии метаморфизма.

Список литературы / References

1. Толмачев, А.М. Адсорбция газов, паров и растворов / А.М. Толмачев. – М.: ООО Издательская группа «Граница». – 239 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://granicagroup.ru> (дата обращения: 21.06.2018).

Tolmachyov, A.M. *Adsorbtsiya gazov, parov i rastvorov* [Adsorption of gases, vapor and solutions]. Moscow, ООО “Izdatel’skaya gruppа “Granitsa”” Publ., 239 p. [Electronic resource]. Available at: <http://granicagroup.ru> (accessed: 21.06.2018).

2. Потапов, С.В. Исследование процессов адсорбции ксенона, криптона, кислорода и азота на микропористом углеродном адсорбенте при повышенных давлениях применительно к системам аккумуляирования газов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03 / Сергей Владимирович Потапов. – М., 2011. – 18 с.

Potapov, S.V. *Issledovaniye protsessov adsorbtsii ksenona, kriptona, kisloroda i azota na mikroporistom uglerodnom adsorbente pri povyshennykh davleniyakh primenitel’no k sistemam akumulirovaniya gazov: avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.04.03* [Research of the processes of xenon, krypton, oxygen and nitrogen adsorption on the microporous carbonaceous adsorbent under overpressures with regard to gas accumulation systems: author’s abstract of diss. ...cand tech. sci.: 05.04.03]. Moscow, 2011, 18 p.

3. Исаев, А.В. Экспериментальное определение параметров уравнений адсорбции / А.В. Исаев // Наука и инновации: инж. журн. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – № 5. – 9 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/articles/751/751.pdf> (дата обращения: 21.06.2018).

Isayev, A.V. *Eksperimental’noye opredeleniye parametrov uravneniy adsorbtsii* [The experimental determination of parameters of equations of adsorption]. *Nauka i innovatsii: Inzh. zhurn.* – Science and innovations: Engineer journal, Moscow, MGTU im. N.E. Baumanna Publ., 2013, no. 5, 9 p. (Electronic resource). Available at: <http://engjournal.ru/articles/751/751.pdf> (accessed: 21.06.2018).

4. Определение термодинамических характеристик адсорбции наночастиц серебра в условиях обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии / А.Д. Шафигулина, О.Г. Ларионов, А.А. Ревина, К.В. Пономарёв, А.О. Ларионова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2013. – Т. 13, вып. 6. – С. 920 – 927.

Shafigulina, A.D., Larionov, O.G., Revina, A.A., Ponomaryov, K.V., Larionova, A.O. *Opredeleniye termodinamicheskikh kharakteristik adsorbtsii*

nanochastits serebra v usloviyakh obrashchyenno-fazovoy vysokoeffektivnoy zhidkostnoy khromatografii [Determination of thermodynamic characteristics of adsorption of silver nanoparticles under conditions of the reversed phase high-performance liquid chromatography]. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – The sorption and chromatographic processes*, 2013, vol. 13, issue 6, pp. 920 – 927.

5. Макаревич, Н.А. Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности / Н.А. Макаревич // Материалы XV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых. – М., 2005. – С. 29.

Makarevich, N.A. *Aktual'nyye problemy teorii adsorbtsii, poristosti i adsorbtsionnoy selektivnosti* [Actual problems of theory of adsorption, porosity and adsorptive selectivity]. *Materialy XV Vserossiyskogo simpoziuma s uchastiyem inostrannykh uchenykh* [Materials of the 15th All-Russian symposium with the participation of foreign scientists]. Moscow, 2005, p. 29.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 25.06.2018

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

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

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

PARAMETERS OF OXYGEN ADSORPTION ON COAL SURFACE

Purpose. To investigate the process of the oxygen adsorption on the coal surface with the help of a gas chromatographic method.

Methods. Experimental study of the oxygen adsorption isotherms using the “XPOMOC GX-1000” chromatographic complex with the automatic peaks marking that allows improving the precision of the parameters calculation for confinement of an analyzed substance.

Results. The Henry and Langmuir principle of plotting the isotherms has been studied on the example of the oxygen adsorption by the T-rank coal from the “Kommunarskaya” coal mine using the chromatographic parameters of confinement. It has been determined that the dependence of the adsorbed oxygen concentration decreases with the temperature increase. It is connected with the influence of temperature conditions on the progress of the physical adsorption process. The values of the adsorbed oxygen maximum concentration have been calculated within the temperature range from 303 up to 403 K. It is shown that the minimum concentration corresponding with the critical temperature of the coal spontaneous combustion determined as a result of the investigation of its chemical activity within this temperature range is characteristic for the values of the ultimate concentration of the adsorbed oxygen. The adsorption heat for two temperature ranges has been calculated using the plotted Langmuir isotherm by the similar degree of filling the monolayer. The obtained data permit to state that the mechanism of oxygen interaction with the coal surface changes when coal reaches the critical temperature of the spontaneous combustion.

Scientific novelty. The chromatographic method allows observing the coal oxidation process which is responsible for the development of its self-heating using the adsorption parameters.

Practical value. The obtained results permit to estimate the contribution of the physical and chemical adsorption to the coal oxidation process using the data of the chromatographic investigation of its chemical activity.

Key words: *adsorption isotherm; physical and chemical adsorption; adsorption heat; oxygen; coal.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [614.8,,363”:005.7]:001.891.572

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

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

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

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА

Цель. Разработка алгоритма организации деятельности органов управления при реагировании на чрезвычайные ситуации техногенного характера государственного уровня.

Методика основана на применении теории алгоритмов и теории конечных автоматов.

Результаты. Уточнены существующие математические модели, построен алгоритм деятельности органов управления при реагировании на чрезвычайные ситуации техногенного характера государственного уровня.

Научная новизна. Разработан алгоритм деятельности органов управления при реагировании на чрезвычайные ситуации техногенного характера государственного уровня.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для выявления направлений повышения эффективности действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций, способов сокращения времени реагирования на них, путей экономии сил и средств, привлекаемых для ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: алгоритм; блок-схема; модель; реагирование; чрезвычайная ситуация.

Постановка проблемы. Регламентация действий органов управления является гарантией своевременности и полноты выполнения запланированных мероприятий по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС). Одним из способов достижения целей управления в ЧС является разработка и реализация алгоритмов организации деятельности, представляющих собой последовательность действий, установленную с учётом утверждённых требований, природно-техногенных характеристик территорий и возможностей органов управления.

Проблема состоит в существующем на современном этапе развития противоречии между наличием и потребностями в необходимой методической базе функционирования Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЕГСЧС).

Анализ последних исследований и публикаций. Математическому моделированию действий органов управления в ЧС техногенного характера посвящены исследования В.В. Меньших, А.В. Корчагина и других [1-3]. В работах данных авторов с помощью теории конечных автоматов [4] построена имитационная модель, которая описывает содержание и последовательность действий органов управления в зависимости от складывающейся обстановки.

Цель исследования. Разработка алгоритма организации деятельности органов управления при реагировании на ЧС техногенного характера государственного уровня на основе уточнённых математических моделей.

Результаты исследований. Информационная модель действий органов управления в ЧС техногенного характера [1], уточнённая в соответствии с возложенными на ЕГСЧС задачами, представлена следующими элементами:

k_0 – организация повседневной деятельности;

k_1 – сбор информации, прогнозирование возможной обстановки, организация наблюдения и лабораторного контроля;

k_2 – планирование аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР), сбор Государственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности (КЧС и ОПБ), организация взаимодействия между подсистемами ЕГСЧС;

k_3 – перевод ЕГСЧС в режим повышенной готовности;

k_4 – прогнозирование возникновения ЧС и их последствий, усиление контроля за состоянием объектов и окружающей природной среды;

k_5 – организация проведения разведки, непрерывного контроля и сбора информации об обстановке;

k_6 – перевод органов управления и сил ЕГСЧС в режим ЧС;

k_7 – проведение мероприятий по защите населения и территорий от ЧС; организация работ по ликвидации ЧС, обеспечению действий сил ЕГСЧС;

k_8 – завершение выполнения поставленных задач, подведение итогов.

Условия переходов между выполняемыми задачами приведены в таблице.

Имитационная модель действий органов управления в ЧС техногенного характера представлена в виде конечного автомата (диаграммы) Мура: $B = (K, Z, \beta)$ с алфавитом состояний $K = \{k_0, \dots, k_8\}$, алфавитом входов $Z = \{z_0, \dots, z_{17}\}$ и функциями переходов (рис. 1) [1].

Спецификация уточнённой информационной модели действий органов управления в ЧС техногенного характера

Переход	Обозначение	Описание перехода между мероприятиями
$k_0 - k_0$	z_0	Выполнение мероприятий в режиме повседневной деятельности
$k_0 - k_1$	z_1	Проведение профилактических мероприятий, установление взаимодействия между функциональными и территориальными подсистемами ЕГСЧС
$k_0 - k_3$	z_2	Фиксация изменений в данных наблюдений и лабораторного контроля, подтверждающих возможность реализации опасности
$k_0 - k_6$	z_3	Внезапная реализация опасности, приводящая к ЧС
$k_1 - k_2$	z_4	Организация выполнения плановых мероприятий согласно собранной информации
$k_2 - k_3$	z_5	Уточнение планов действий и организация взаимодействия органов управления и сил ЕГСЧС
$k_3 - k_3$	z_6	Нахождение объекта в состоянии повышенной готовности
$k_3 - k_0$	z_7	Перевод объекта в режим нормального функционирования в результате прекращения воздействия источников опасности или проведённых мероприятий по их устранению
$k_3 - k_6$	z_8	Последовательная реализация опасности от угрозы возникновения к возникновению ЧС
$k_3 - k_4$	z_9	Нахождение объекта в состоянии, близком к реализации опасности
$k_4 - k_1$	z_{10}	Отсутствие достаточной информации об объекте, источниках опасности и факторах, влияющих на их изменение
$k_4 - k_0$	z_{11}	Перевод объекта из режима повышенной готовности в режим повседневной деятельности
$k_4 - k_5$	z_{12}	Сбор и обработка информации об объекте, источниках опасности и факторах, влияющих на их изменение
$k_5 - k_6$	z_{13}	Перевод органов управления и сил ЕГСЧС из режима повышенной готовности в режим ЧС
$k_6 - k_6$	z_{14}	Выявление воздействия опасных факторов на объект
$k_6 - k_7$	z_{15}	Реализация опасности, приводящая к ЧС
$k_7 - k_8$	z_{16}	Проведение АСДНР в зоне ЧС
$k_8 - k_0$	z_{17}	Перевод органов управления и сил ЕГСЧС из режима ЧС в режим повседневной деятельности

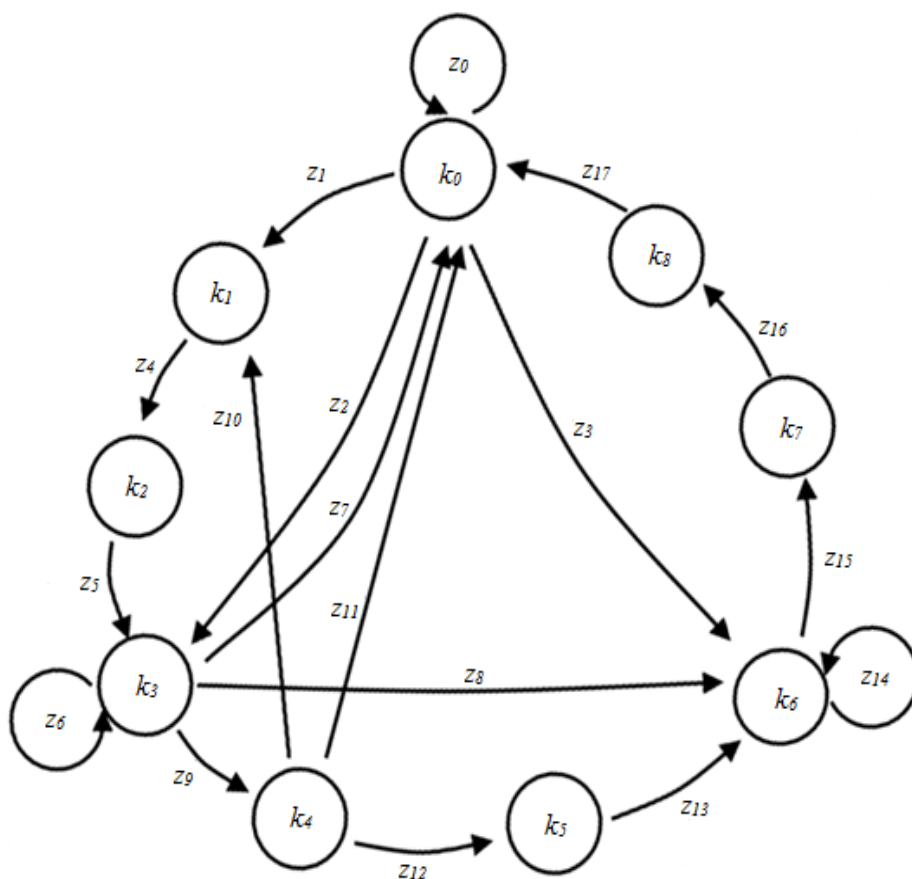


Рис. 1. Диаграмма Мура автоматной модели действий органов управления в ЧС техногенного характера

Используя рассмотренные модели действий органов управления в ЧС, планы действий по предупреждению и ликвидации ЧС природного и техногенного характера, построим алгоритм деятельности органов управления при реагировании на ЧС техногенного характера государственного уровня.

Поскольку графический способ представления алгоритмов – более компактный и наглядный по сравнению с вербальным, воспроизведем его на рис. 2.



Выводы. Построенный алгоритм деятельности органов при реагировании на ЧС техногенного характера государственного уровня, а также уточнённые математические модели действий органов управления в ЧС могут быть использованы в дальнейших исследованиях при подготовке административных и технических регламентов организации деятельности действий органов управления в ЧС. Результаты моделирования будут обладать большей информативностью за счёт наращивания детализации информационных моделей. Особый интерес представляет рассмотрение действий отдельных органов управления в ЧС, а также проведение сравнительного анализа действий органов управления в ЧС различного уровня и характера.

Список литературы / References

1. Меньших, В.В. Автоматная модель действий подразделений МЧС при возникновении чрезвычайной ситуации техногенного характера / В.В. Меньших, А.Ф. Самороковский, А.В. Корчагин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2014. – №1(10). – С. 57 – 60.

Men'shikh, V.V., Samorokovskiy, A.F., Korchagin, A.V. *Avtomatnaya model' deystviy podrazdeleniy MChS pri vozniknovenii chrezvychaynoy situatsii tekhnogenogo kharaktera* [The automata model of actions of subdivisions of the Ministry of Emergency Situations by origin of an extraordinary situation of the anthropogenic nature]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2014, no. 1(10), pp. 57 – 60.

2. Меньших, В.В. Алгоритм имитационного моделирования действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера / В.В. Меньших, А. В. Корчагин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2013. – № 3. – С. 164 – 171.

Men'shikh, V.V., Korchagin, A.V. *Algoritm imitatsionnogo modelirovaniya deystviy organov vnutrennikh del pri chrezvychaynykh situatsiyakh kriminal'nogo kharaktera* [The algorithm of the simulation modeling of actions of internal affairs agencies by emergencies of the criminal nature]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2013, no. 3, pp. 164 – 171.

3. Меньших, В.В. Алгоритм имитационного моделирования действий органов управления и подразделений ОВД при возникновении чрезвычайных обстоятельств / В. В. Меньших, Ю. С. Лунев, А. Ф. Самороковский // Вестник Воронежского института МВД России. – 2007. – № 2. – С. 125 – 129.

Men'shikh, V.V., Lunyov, Yu.S., Samorokovskiy, A.F. *Algoritm imitatsionnogo modelirovaniya deystviy organov upravleniya i podrazdeleniy OVD pri vozniknovenii chrezvychaynykh obstoyatel'stv* [The algorithm of the simulation modeling of actions of organs of government and subdivisions of the Internal Affairs Agencies by origin of emergencies]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2007, no. 2, pp. 125 – 129.

4. Хопкрофт, Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Джон Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джеффри Ульман. – Изд. 2-е. – М.: Вильямс, 2015. – 528 с. – ISBN 978-5-8459-1347-0 (рус.); ISBN 0-201-44124-1 (англ.).

Hopcroft, J.E., Motwani, R., Ullman J.D. *Vvedeniye v teoriyu avtomatov, yazykov i vychisleniy* [Introduction to automata theory, languages, and computation]. 2nd ed. Moscow, Izdatel'skiy Dom Williams Publ., 2015, 528 p. ISBN 978-5-8459-1347-0 (Russian). ISBN 0-201-44124-1 (English).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 24.10.2018

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

The Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters

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

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

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

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

SIMULATION OF ORGANS OF GOVERNMENT ACTIONS IN EMERGENCIES OF THE ANTHROPOGENIC NATURE

Purpose. Development of an algorithm of activities organization of the organs of government by reaction on the emergencies of the anthropogenic nature of the government level.

The methods are based on application of the theory of algorithms and the finite automata theory.

Results. The existent mathematical models have been specified, the algorithm of activities of the organs of government by reaction on the emergencies of the anthropogenic nature of the government level has been constructed.

Scientific novelty. The algorithm of activities of the organs of government by reaction on the emergencies of the anthropogenic nature of the government level has been worked out.

Practical value. The obtained results can be used to detect the directions of improvement of the actions of the forces for elimination of the emergencies, methods of reaction time reduction on them, ways for economy of forces and means being involved for elimination of the extraordinary situations.

Key words: *algorithm; block-diagram; model; reaction; emergency.*

УДК 614.841.13:[614.842.612:614.844.2]

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

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

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

Алина Александровна Мельниченко, студентка; e-mail: melnichenko.a.o-ekol-19@donnasa.ru;

Анна Федоровна Мисинева, студентка; e-mail: amisineva@bk.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 071-349-17-16

ПОГЛОЩЕНИЕ АХОВ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПУТЕМ ОРОШЕНИЯ ВОДНЫМ РАСТВОРОМ НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Цель. Исследование возможности поглощения вредных веществ гидрокарбонатом натрия, растворенным в дистиллированной воде и воде естественных водоемов при орошении многокомпонентной газовой смеси.

Методика. Анализ, обобщение и статистическая обработка результатов экспериментальных исследований поглощения вредных веществ.

Результаты. Получены зависимости степени поглощения хлорида водорода от времени орошения гидрокарбонатом натрия, растворенным в дистиллированной воде и воде естественных водоемов.

Научная новизна. Найдена зависимость, связывающая между собой параметры, характеризующие процессы поглощения вредных веществ водяной завесой с добавками к ней гидрокарбоната натрия, и параметры капель жидкости в поле силы тяжести.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют снизить концентрацию вредного вещества в газовой смеси путем применения водяной завесы с растворенным гидрокарбонатом натрия.

Ключевые слова: аварийно химически опасные вещества; газозавесы; константа диссоциации; термодеструкция; хлорид водорода.

Постановка проблемы. Источниками выделения аварийно химически опасных веществ (АХОВ) в различных отраслях промышленности могут быть негерметичное оборудование, недостаточно механизированные (автоматизированные) операции загрузки сырья и выгрузки готовой продукции, ремонтные работы [1]. АХОВ могут поступать в производственные и складские помещения. Особое значение имеют выбросы АХОВ в результате чрезвычайных ситуаций [2], что является предметом рассмотрения в данной работе. Для снижения концентрации вредных веществ в помещении используют водяные завесы из водных композиций, обладающих поглотительной способностью по отношению к основным вредным веществам [3].

Анализ последних исследований. Анализ литературных источников [4] показывает, что в условиях поглощения АХОВ из воздуха закрытых помещений за счет процессов хемосорбции снизить концентрацию вредного

вещества до максимально или предельно допустимого уровня с применением водяной завесы без химических добавок не удаётся. Следовательно, для снижения концентрации АХОВ в помещении водяной завесой необходимо исследовать в лабораторных условиях составы водных композиций, обладающих поглотительной способностью по отношению к вредным веществам.

Цель исследований. В данной работе исследовался процесс поглощения АХОВ, образующихся при термодеструкции полимерных материалов с применением лабораторной установки, созданной на базе НИИГД «Респиратор» для моделирования процесса орошения водой и водными композициями газового потока, насыщенного различными АХОВ. Концентрацию АХОВ в газозооопределителе химического ГХ-М [5] и аттестованных методик определения вредных веществ.

Результаты исследования. Орошение газозооопределительной смеси проводилось в реакционной камере водным раствором нейтрализующего реагента. Объемная скорость подаваемого раствора на форсунку составляла $1,08 \cdot 10^{-3}$ дм³/с.

Средний диаметр образующихся капель воды [6] находили по формуле

$$d = \frac{3,24 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{P_{\text{ж}}}} \sqrt{\frac{Dc}{\text{tg}^{\frac{\alpha}{2}}}}, \quad (1)$$

где $3,24 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент, м^{1/2}·МПа^{1/3};

Dc – диаметр сопла форсунки, равный $0,65 \cdot 10^{-3}$ м;

$P_{\text{ж}}$ – давление жидкости перед форсункой, равное 0,04 МПа;

α – угол раскрытия, который образует распыляемый раствор, ...°;

$\alpha = 40^\circ$.

Расчет по уравнению (1) показал, что средний диаметр капель воды, используемый для орошения газового потока, равен 0,0006 м. После проведения орошения в реакционной камере отбирали пробу газозооопределительной смеси и измеряли концентрацию. По разности концентраций определяли степень поглощения анализируемого вещества по формуле

$$\delta = (C - C_{\text{п}}) \cdot 100 / C_L, \quad (2)$$

где δ – степень поглощения, %;

$C_{\text{п}}$ – концентрация АХОВ после проведения процесса поглощения, мг/м³.

Для определения констант скорости поглощения водой ω_0 и химическими добавками к ней ω_1 использовали формулу для расчёта значения общей константы скорости поглощения ω , которая является суммой констант скоростей поглощения АХОВ водой и водой с химической добавкой

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 = \frac{Q_0}{Q_b} \frac{ud}{6x_3} \ln(C / C_1), \quad (3)$$

где ω – общая (суммарная) константа скорости поглощения, м/с;

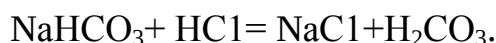
Q_0 – расход воздуха, м³/с;

Q_b – расход воды, м³/с;

x_3 – длина завесы, м.

Для определения констант скорости поглощения водой и химическими добавками к ней по формуле (3) в лабораторных условиях учитывали следующие данные: отношение расхода воздуха к расходу воды $Q_0/Q_b = 0,83/1,083 \cdot 10^{-3}$, отношение концентраций вредных веществ до орошения и после C/C_{Π} , время пребывания вредного вещества в зоне орошения, температура 20 °С и средний диаметр капель воды $d_k = 0,0006$ м.

Для исследования поглотительных свойств водных растворов в качестве реагента был изучен гидрокарбонат натрия (NaHCO_3). Его поглотительную способность определяли по отношению к хлориду водорода, с которым он реагирует по реакции



Поскольку одним из факторов, влияющих на процесс поглощения, является время пребывания АХОВ в зоне орошения, было исследовано влияние времени орошения на степень поглощения (табл. 1). Исходную концентрацию хлорида водорода получали испарением в условиях вынужденной конвекции под действием воздушного потока в замкнутом объеме, в котором проводили орошение.

Таблица 1

Зависимость от степени поглощения хлорида водорода от времени орошения

Поглотительный раствор	Поглощение хлорида водорода за 6 с орошения			Поглощение хлорида водорода за 10 с орошения			Поглощение хлорида водорода за 16 с орошения		
	C^* , мг/м ³	C_{Π}^{**} , мг/м ³	δ , % ($\omega_0 \cdot 10^3$, м/с)	C , мг/м ³	C_{Π} , мг/м ³	δ , % ($\omega_0 \cdot 10^3$, м/с)	C , мг/м ³	C_{Π} , мг/м ³	δ , % ($\omega_0 \cdot 10^3$, м/с)
0,5 %-й раствор гидрокарбоната натрия (дистиллированная вода)	1998	339	80,0 (13,72)	199 8	42,5	87,5 (10,61)	1998	22,5	97,9 (12,30)
0,5 %-й раствор гидрокарбоната натрия (вода водоемов)	718	326	77,9 (12,89)	718	144	79,9 (8,21)	718	44	95,6 (9,96)

C^* – концентрация вредного вещества в воздухе;

C_{Π}^{**} – концентрация вредного вещества после поглощения.

Для оценки влияния факторов на поглотительную способность водного раствора гидрокарбоната натрия применили метод планирования эксперимента. В качестве влияющих факторов были использованы значения концентрации АХОВ и температуры, в качестве выходной переменной – степень поглощения. На основании полного двухфакторного эксперимента была исследована степень поглощения хлорида водорода раствором гидрокарбоната натрия различной температуры (5, 20 и 35 °С) и получено уравнение процесса поглощения хлорида водорода, в котором степень поглощения δ зависит от массовой концентрации гидрокарбоната натрия x_c и от температуры раствора x_t . Математическую зависимость можно представить в виде полинома первого порядка:

где b_0 – свободный член уравнения (4);

Использован полный факторный эксперимент, при котором общее количество проводимых опытов определяли из соотношения $N = 2^2 = 4$ (табл. 2).

Матрица планирования и результаты эксперимента

Наименование		Факторы		Коэффициент регрессии		
		$x_c, \%$	$x_t, ^\circ\text{C}$			
Основной уровень		0,50	20	$b_0 = 76,7$ $b_c = -15,3$ $b_t = 5,3$		
Интервал варьирования		0,25	15			
Верхний уровень		0,75	35			
Нижний уровень		0,25	5			
Номер опыта	x_0	План		Эксперимент	Расчет	
		X_c	X_t	δ	Δ	S_0^2
1	+1	-1	-1	87,0	87,0	2,00
2	+1	+1	-1	55,8	55,8	0,08
3	+1	-1	+1	97,0	97,0	4,50
4	+1	+1	+1	67,0	66,7	8,00
$S_0^2 = 3,645$ $S_{bs} = 0,9546$; $t_T = 2,78$ ($f_0 = 4, q = 0,05$); $ \Delta b_{\text{ыл}} = 2,6538$ $S_{\text{Ад}}^2 = 0,36$ $F_P = 0,098765$; $F_T = 7,71$ ($f_{\text{Ад}} = 1, f_0 = 4, q = 0,05$); $F_P < F_T$						

В результате факторного эксперимента получено следующее линейное уравнение регрессии:

$$\delta = 76,7 - 15,3X_c + 5,3X_t, \quad (5)$$

где X_c и X_t – кодированные координаты в методе планирования эксперимента.

Для расчета ошибки эксперимента S_0^2 осуществляли проверку однородности дисперсий параллельных определений степени поглощения S^2 , используя критерий Кохрена. Результаты расчета ошибки эксперимента, проверка значимости коэффициентов регрессии, проверка адекватности уравнения регрессии, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод о том, что полученный линейный полином является адекватным, что позволяет использовать его для поиска области оптимума процесса поглощения.

Используя выражения для кодированных координат $X_c = (x_c - x_{0c}) / \Delta x_c$ и $X_t = (x_t - x_{0t}) / \Delta x_t$, а также значения табл. 1, получаем уравнение, показывающее влияние массовой концентрации гидрокарбоната натрия x_1 и температуры раствора x_2 на процесс поглощения хлорида водорода, образующегося при термодеструкции полимерного материала:

$$\delta = 100,24 - 61,20x_c + 0,353x_t. \quad (6)$$

Выводы. Проведенные исследования и полученное уравнение регрессии (6) позволяют получить качественную и количественную информацию о влиянии каждого фактора, рассчитать значение функции поглотительной способности при задаваемых параметрах, определить оптимальные значения концентраций реагента.

Список литературы / References

1. Определение выделений вредных веществ в атмосферу / сост. О.О. Герасимова. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного ун-та, 2006. – 35 с.

Gerasimova, O.O. (author). *Opredeleniye vydeleniy vrednykh veshchestv v atmosferu* [Identification of emissions of harmful substances into the atmosphere]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo un-ta Publ., 2006, 35 p.

2. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. – М.: Высш. шк., 2007. – 592 с.

Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnogo i tekhnogenno kharaktera [Safety of vital functions. Safety in emergency situations of the natural and anthropogenic nature]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007, 592 p.

3. Мاستрюков, Б.С. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них / Б.С. Мастрюков. – М.: Академия, 2009. – 320 с.

Mastryukov, B.S. Opasnyye situatsii tekhnogenno kharaktera i zashchita ot nikh [The hazardous situations of the anthropogenic nature and protection against them]. Moscow, Akademiya Publ., 2009, 320 p.

4. Количественный анализ продуктов горения и термодеструкции материалов / Л.С. Беляева, Н.Н. Бойко, В.П. Орликова, О.А. Жадан // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 77 – 80.

Belyayeva, L.S., Boyko, N.N., Orlikova, V.P., Zhadan, O.A. Kolichestvennyy analiz produktov goreniya i termodestruktsii materialov [The quantitative analysis of combustion products and products of thermal degradation of materials]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2000, pp. 77 – 80.

5. Шумилин, В.К. Чрезвычайные ситуации. Защита населения и предприятий / В.К. Шумилин. – М.: Альфа-Пресс, 2011. – 176 с.

Shumilin, V.K. Chrezvychaynyye situatsii. Zashchita naseleniya i predpriyatiy [Emergency situations. Protection of population and enterprises]. Moscow, Al'fa-Press Publ., 2011, 176 p.

6. Рогов, В.П. Расчет коэффициента сопротивления крупных капель воды / В.П. Рогов // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2007. – Вып. 15. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-soprotivleniya-chastits-i-kapel> (дата обращения: 19.07.2018).

Rogov, V.P. Raschet koeffitsiyenta soprotivleniya krupnykh kapel' vody [Calculation of the resistance coefficient of large water drops]. *Nauch. tr. Dal'rybvtuza* [Scientific proceedings of the Dal'rybvtuz]. Vladivostok, 2007, issue 15. [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-soprotivleniya-chastits-i-kapel> (accessed: 19.07.2018).

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-43;

Alina Aleksandrovna Mel’nichenko, student; e-mail: melnichenko.a.o.-ecol-19@donnasa.ru;

Anna Fyodorovna Misineva, student; e-mail: amisineva@bk.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donbas National Academy
of Civil Engineering and Architecture”

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone: +38 071-349-17-16

ABSORPTION OF CHEMICALLY HAZARDOUS SUBSTANCES CONDUCTIVE TO ACCIDENTS IN CLOSED PREMISES BY MEANS OF SPRAYING THE AQUEOUS NEUTRALIZER SOLUTION

Purpose. Investigation of a possibility to absorb the hazardous substances by sodium bicarbonate dissolved in the distilled water and water from natural reservoirs by spraying the multicomponent gas-air mixture.

Methods. Analysis, generalization and statistical processing of results concerning the experimental researches of absorption of the hazardous substances.

Results. The dependences of the absorption degree of hydrogen chloride on the time of the spraying with sodium bicarbonate dissolved in the distilled water and in water from natural reservoirs have been obtained.

Scientific novelty. The dependence connecting the parameters which characterize the processes of absorption of the hazardous substances by a water curtain with sodium bicarbonate added to it and the parameters of drops of liquid under gravity has been found.

Practical value. The obtained results will allow reducing the concentration of the hazardous substance in the gas-air mixtures by means of the use of the water curtain with sodium bicarbonate dissolved in it.

Key words: *chemically hazardous substances conducive to accidents; gas-air mixtures; dissociation constant; thermal destruction; hydrogen chloride.*

УДК 622.831.3:546.212

Геннадий Петрович Стариков, д-р техн. наук, директор; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;

Сергей Васильевич Шатохин, аспирант, инж.; e-mail: shatohin-sergej@mail.ru

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов» ДНР

283114, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 381-13-55

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ К ВЫВАЛАМ

Цель. Получение данных для расчёта склонности горной породы к вывалам.

Методика. Использовали термобарические методы исследований образцов песчано-глинистых сланцев, подвергнутых гидростатическому давлению 600 МПа, которые моделируют большое давление горного массива. Определена энергия активации химически связанной воды в образцах по методу Бройдо-Прокопчука.

Результаты. Полученные результаты исследований позволили установить степень влияния химически связанной воды в динамических процессах. Выполнены расчеты, позволяющие объяснить локальность вывалов в 6-м бортовом ходе СП № 3 пл. h_8 Фоминской шахты «Прогресс».

Научная новизна. Впервые проверена гипотеза, объясняющая локальность процесса вывала фазовым переходом твердофазной воды в жидкое состояние, снижающее физико-механические свойства горной породы по типу эффекта Ребиндера.

Практическое значение. Установлено, что по совокупности учета энергетических показателей, в частности при отношении минимальной энергии дегидратации химически связанной воды $U_{\min}$ к энергии формоизменения при большом давлении W_{ϕ} в условиях объемного нагружения горные породы, вмещающие угольные пласты, склонны к внезапным обрушениям при $U_{\min} / W_{\phi} \leq 1$.

Ключевые слова: вывал; модуль упругости; энергия активации; химически связанная вода; энергия формоизменения горной породы; критерий склонности горной породы к внезапному обрушению.

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследования.

Одно из характерных катастрофических явлений в выработках глубоких шахт – вывал. В процессе проведения общей протяженности горизонтальных горных выработок около 56 % породных обнажений теряют устойчивость непосредственно при обнажении или спустя некоторое время после обнажения (20...350 мин в зависимости от мощности слоя), в целом это приводит к снижению скорости проведения выработок на 40...50 % и увеличению на 20...30 % расходов на их крепление и поддержание. Кроме этого, 35...40 % несчастных случаев происходит непосредственно при проведении горных выработок [1].

Явление вывала является предметом многочисленных исследований. Все гипотезы, объясняющие механизм этого явления, по общности исходных предпосылок могут быть отнесены как минимум к пяти большим группам (табл. 1).

Таблица 1

Причины (механизм) вывалов [2]

Теоретическое обоснование	Механизм вывалов
В. Риттер, Ф. Энгессер, О. Коммерель, М. Протодяконов	Вывалы считаются результатом действия сил тяжести пород в объеме сводообрушения
А. Динник, Ж. Ержанов	Ответственными за сводообразование считаются растягивающие напряжения
Ф. Мор, К. Ирвинг, Э. Айзаксон, Г. Черепанов	Свод обрушения в условиях упругосжатого контура
А. Лаблас, К. Руппенейт, Ю. Либермане	Свод обрушения есть результат образования вокруг выработки области неупругих деформаций
К. Терцаги, В. Слесарев, Н. Покровский и др.	Оценка процесса вывала основана на данных практических наблюдений

Гипотезы первых трех групп в большей степени характерны для условий эксплуатации выработок на небольшой глубине и при относительно крепких устойчивых породах. Гипотезы четвертой группы характеризуют условия эксплуатации выработок на глубоких горизонтах. Гипотезы пятой группы оценивают процесс вывала путем инструментальных измерений в шахтных условиях.

Однако ни одна из теорий не объясняет локальности процесса вывала. Существующие рекомендации, ориентированные на повышение устойчивости породных обнажений, не в полной мере могут дать необходимые сведения для своевременного уточнения и принятия мер по повышению устойчивости и снижению травматизма в процессе сооружения и поддержания горных выработок (табл. 2, 3).

Таблица 2

Места проявления вывалов в подготовительной выработке
в зависимости от технологических причин

Место вывала	%
Ведение буровзрывных работ (БВР), вывалы непосредственно в забое до установки крепи	35,4
Ведение БВР, вывалы на расстоянии 5...10 м от забоя	14,6

Окончание табл. 2

Место вывала	%
Ведение БВР в режиме сотрясательного взрывания, вывалы в близлежащих выработках	8,7
Перекрепление и расширение проектного сечения выработок, разделка сопряжений	31,9
Комбайновое проведение горной выработки, вывалы на расстоянии более 10 м от забоя	9,4

Таблица 3

Взаимосвязь формы вывала и его гранулометрического состава

Форма вывала	Гранулометрический состав				
	< 3 см	3...10 см	10...30 см	30...40 см	> 40 см
Сводчатая	49	35	16	-	-
Конусная	25	30	35	10	-
Призматическая	20		25	40	15
Ступенчатая	20		25	40	15

Анализ статистических показателей свидетельствует, что высокоскоростная разгрузка горного массива за счет буровзрывных работ является одним из необходимых условий инициирования горных пород к внезапному обрушению (вывалам). Однако анализ форм вывалов и их гранулометрического состава свидетельствует, что существуют локальные зоны, как правило, приуроченные к мелкоамплитудным геологическим нарушениям, в которых формируются области высокой степени нарушенности вмещающих горных пород. Кроме этого, неоднократно фиксировалось, что в горных породах из зон вывалов концентрация влаги в 1,3...1,8 раз больше, чем в ненарушенной породе. Такое увеличение влажности в соответствии с [3] уменьшает упругие свойства твердого тела, особенно если оно имеет поры или трещины. Например, прочность на сжатие у песчаников с пористостью около 10 % снижается на 70 %, у известняков с пористостью 15 % на 50 %, у габбро-долеритов и базальтов с пористостью 3...5 % на 20 % [3].

Эти изменения обуславливает эффект адсорбционного понижения прочности твердых тел, реализующийся в условиях обобщенного растяжения с жидкой адсорбционно-активной средой. Характерная форма проявления эффекта – многократное падение прочности, повышение хрупкости твердого тела, снижение его долговечности.

Одним из возможных поставщиков свободной фазы воды в горных породах могут являться твердофазные (кристаллогидратные) воды [3].

В целом анализ рассматриваемых факторов вывалов свидетельствует о преобладании геологических причин над технологическими, а это, прежде всего, связано с тем, что вывалы пород кровли – локальные явления, а нарушения технологической дисциплины носят систематический характер. Геологическая первооснова, связанная с локальными нарушениями физико-механических характеристик горных пород и фазовым состоянием воды в них, играет роль катализатора, который при прочих равных условиях оказывается причиной развития вывалов.

Целью данной работы является обоснование критерия оценки склонности горной породы к вывалам, основанного на определении параметра, характеризующего соотношение энергии активации фазового перехода кристаллогидратной воды в горной породе к плотности энергии формоизменения в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения.

Материалы и результаты исследований. Весь цикл исследований включал:

- экспериментальное определение энергетических показателей горных пород, зависящих от уровня и соотношения главных напряжений и деформирования их вплоть до разрушения;
- экспериментальное определение энергии активации дегидратации кристаллогидратной воды в интервале температур 100...900 °С и гидростатическом нагружении $P = 600$ МПа.

Для выполнения первого цикла исследования были отобраны штуфы песчано-глинистого сланца в 6-м бортовом ходке СП № 3 пл. h_8 Фоминской шахты «Прогресс», в районе происшедшего вывала. Из отобранных штуфов изготавливали образцы кубической формы с размерами грани ребра 5,5...6,0 см. Проводили механические испытания на установке объемного нагружения, позволяющей деформировать кубические образцы в трех взаимоперпендикулярных направлениях.

Процесс создания предельного напряженного состояния включал подъем главного напряжения σ_1 до уровня, при котором становилось заметным его воздействие через образец на боковые нажимные плиты – по появлению растягивающих деформаций. Промежуточные напряжения по линии σ_2 формировались самопроизвольно либо поддерживались на заданном уровне, а величина σ_3 соответствовала минимальной прочности горной породы на одноосное сжатие. По достижении предельного значения σ_1 производили снижения σ_3 до 0. При этом через каждые 2,5...3,0 МПа нагружения или разгрузки фиксировали показания манометров. Смещение граней образца отмечали по индикаторам часового типа с точностью 0,01 мм. Разрушение образца фиксировали по спаду наибольшего напряжения и появлению деформаций растяжений.

Для анализа полученных экспериментальных данных, физико-механических свойств породы для оценки степени его повреждаемости рассчитывали следующие параметры [4].

Напряжения в трех взаимно перпендикулярных направлениях:

$$\sigma_i = \frac{314}{S_i} \Pi_{Д_i} \Pi_{Д_i}, \quad (1)$$

где 314 – площадь штока гидроцилиндра, м²;

S_i – площадь грани образца, м²;

$\Pi_{Д_i}$ – количество делений по i -му образцовому манометру;

$\Pi_{Д_i}$ – цена деления i -го манометра, МПа.

Деформация по трем осям:

$$\varepsilon_i = \frac{L_1^i - L_i^1}{L_1^i}, \quad (2)$$

где L_1^i, L_i^1 – соответственно размер и смещение грани образца, м.

Средние напряжения:

$$3\sigma_{\text{ср}} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (3)$$

где σ_1 – вертикальная составляющая тензора напряжения;

σ_2, σ_3 – горизонтальные составляющие тензора напряжения.

Средние деформации:

$$3\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (4)$$

где ε_1 – вертикальная составляющая тензора напряжения;

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ – горизонтальные составляющие тензора напряжения.

Объемный модуль деформации:

$$K = \frac{1}{3} \frac{\sigma_{\text{ср}}}{\varepsilon_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

Модуль сдвига, МПа:

$$G = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3}{\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_1\varepsilon_3}}. \quad (6)$$

Модуль Юнга, МПа:

$$E = \frac{9KG}{3K + G}. \quad (7)$$

Коэффициент Пуассона, МПа:

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G}. \quad (8)$$

Параметр Надаи-Лоде по напряжениям μ_σ и деформациям μ_ε :

$$\mu_\sigma = 2 \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1; \quad (9)$$

$$\mu_\varepsilon = 2 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1. \quad (10)$$

Энергия работы сил изменения объема:

$$W_0 = \frac{3}{2}(\sigma_{cp}\varepsilon_{cp}). \quad (11)$$

Энергия работы сил формоизменения:

$$W_\phi = \frac{1}{12E} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]. \quad (12)$$

Применительно к поставленной цели, практическое значение имеют численные значения показателей упругих и деформационных характеристик: E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; K – объемный модуль деформации, определяющие W_0 – энергию изменения объема и W_ϕ – энергию формоизменения.

Разрушение горных пород фиксируется при двукратном превышении W_ϕ над W_0 , т.е. $W_\phi / W_0 > 2$.

Кроме этого, для детальной классификации механизма разрушения рассчитаны параметры вида напряженного и деформационного состояния горной породы μ_σ , μ_ε в предельном и запредельном состояниях.

Оба параметра имеют три значения: 1 – обобщенное сжатие; 0 – обобщенный сдвиг; 1 – обобщенное растяжение (табл. 4, рис. 1).

Таблица 4

Физико-механические характеристики песчано-глинистого сланца
при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

№ образ-ца	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	μ_σ	μ_ϵ	$\frac{W_\phi}{\text{кДж моль}}$	$\frac{W_0}{\text{кДж моль}}$	$\frac{W_\phi}{W_0} > 2$	$G \cdot 10^3$, МПа
№ 1	41	82,0	35,8	20,0	-0,35	-0,36	3,7	2,1	1,76	2,6
		20,5	10,5	0,0	0	0	4,0	1,98	2,0	0,75
№ 2	65	177	40,0	196	-0,75	0,32	28,8	11,2	2,48	3,2
		47,2	25,0	0,0	0	0	47,8	8,7	5,5	0,32

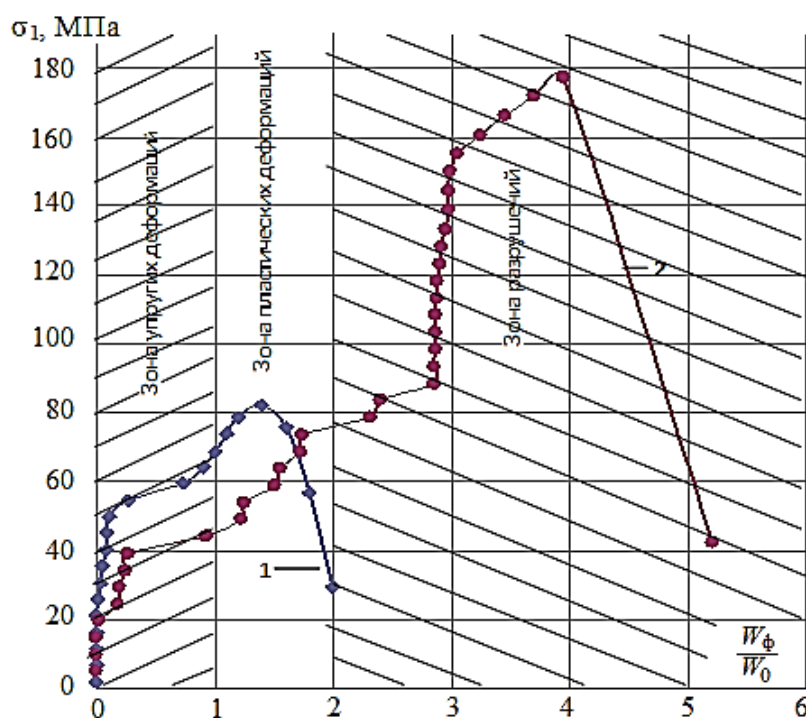


Рис. 1. Зависимость $\sigma_1 = f W_\phi / W_0$, характеризующая остаточную прочность и степень повреждения структуры горной породы:

- ◆— 1 – песчано-глинистый сланец: $\sigma_{сж} = 41$ МПа;
- 2 – песчано-глинистый сланец: $\sigma_{сж} = 65$ МПа

Анализ представленных результатов свидетельствует, что у образца № 1 с $\sigma_2 = 35,8$ МПа в предельном состоянии величиной $\sigma_1 = 82,0$ МПа вид напряженного деформационного состояния характеризуется сочетанием сдвига и сжатия, а соотношение $W_\phi / W_0 < 2$. При снижении промежуточного (1,76) напряжения $\sigma_3 = 0$ МПа; остаточная прочность $\sigma_1 = 20,5$ МПа; $\mu_\sigma, \mu_\epsilon = 0$, $W_\phi / W_0 = 2$. В целом горная порода с такими механическими характеристиками не склонна

к внезапным обрушениям. Наиболее вероятными являются обрушения при перекреплении горных выработок.

В отличие от образца № 1 у образца № 2 предельное состояние формируется при $\sigma_1 = 177$ МПа, а $\mu_\sigma = -0,75$; $\mu_\epsilon = 0,32$ и $W_\phi / W_0 > 2$ (2,48). При снижении $\sigma_3 = 0$ МПа остаточная прочность равна $\sigma_1 = 47,2$ МПа; $\mu_\sigma = 0,2$, $\mu_\epsilon = 0$ и $W_\phi / W_0 = 5,5$. Фактически при входе подготовительной выработки в зону горного массива с такими параметрами развитие динамического процесса внезапного обрушения (вывала) имеет высокую степень вероятности, особенно при увеличении физически связанной воды в структуре горной породы.

Для выполнения второго цикла исследования использованы отобранные штуфы песчано-глинистого сланца в 6-м бортовом ходке СП № 3 пл. h_8 Фоминской шахты «Прогресс» в районе происшедшего вывала. Из отобранных штуфов изготавливали образцы горной породы, измельченной до фракции 0,4...0,5 мм.

Анализ кинетики термодеструкции образцов проводили на основании термогравиметрических данных. Основным параметром термогравиметрического анализа является энергия активации термоокислительной деструкции E_a , которую определяли по методу Бройдо, модифицированному Н.Р. Прокопчуком для расчета кинетических характеристик термодеструкции, протекающей по механизму реакции порядка $n \leq 1$. Потеря массы вещества является процессом 1-го порядка ($n = 1$), если соблюдается линейность зависимости $\ln(100/100 - \Delta m)$ от T , К:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) \right] = \ln \left[\ln \left(\frac{100}{100 - \Delta m} \right) \right] = -\frac{E_a}{RT} + \ln \left(\frac{ART_m^2}{\beta E_a} \right) = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \text{const}, \quad (13)$$

где y – массовая доля неразложившегося вещества исследуемого образца;

E_a – энергия активации, кДж/моль;

Δm – потеря массы образца в процессе термодеструкции, %, при температуре T , К;

R – универсальная газовая постоянная; равна $8,314$ Дж·К⁻¹·моль⁻¹;

A – предэкспоненциальный множитель (частотный фактор), м²/с;

T_m – температура, соответствующая максимуму на кривой температуры дегидратации, К;

β – скорость нагревания, К/мин.

Из уравнения Бройдо-Прокопчука следует, что энергия активации E_a определяется по углу наклона прямой, построенной в координатах, изображенных на рис. 2.

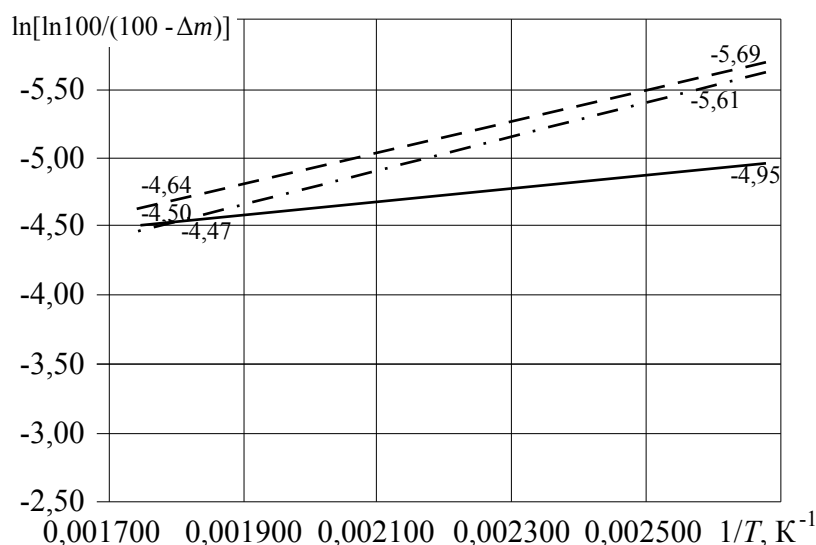


Рис. 2. Данные для расчета энергии активации химически связанной воды в образцах при температуре 100...900 °С:

— ПК47-12 вывал; --- ПК47-15 ненарушенный; -.- ПК47-17 ненарушенный

Энергия активации дегидратации химически связанной воды $E_{\text{акт}}$, входящая в соотношение (13), характеризует энергию связи молекул воды в кристаллической решетке. Чем выше значение $E_{\text{акт}}$, тем больше энергия, необходимая для фазового перехода из одного равновесного положения в другое, также равновесное.

Скорость удаления летучих компонентов или поступления их в область метаморфических реакций ускоряет или замедляет реакции, влияя на их кинетику. Поведение летучих компонентов диктуется парциальным давлением каждого из них. Таким образом, парциальное давление (летучесть) H_2O является важным фактором, определяющим направление и температуру реакций, а при ретроградном метаморфизме и саму их возможность.

В процессе теплового воздействия частицы песчано-глинистого сланца претерпевают значительные физико-химические изменения (рис. 3), в результате которых высвобождается вода, присущая конкретному образцу и определяющая характер протекающих внутри продукта преобразований веществ. За счет испарения влаги и дегидратации химически связанной воды их масса снижается.

Увеличение доли влаги с высокой энергией связи в образце песчано-глинистого сланца может быть обусловлено несколькими причинами, среди которых – нарушение связи между молекулами, составляющими скелет породы и химически связанной воды, что хорошо отображено на рис. 3 увеличением потери массы, т.е. дегидратации песчано-глинистого сланца.

При начале эндотермического эффекта, на фоне интенсивного поглощения теплоты образцами, происходит ослабление прочности структуры вследствие частичного гидролиза молекул песчано-глинистого сланца и других

водородосодержащих компонентов, сопровождающееся окончанием интенсивной потери массы, что соответствует высвобождению молекул воды с физико-химической связью и удалению газообразных фракций.

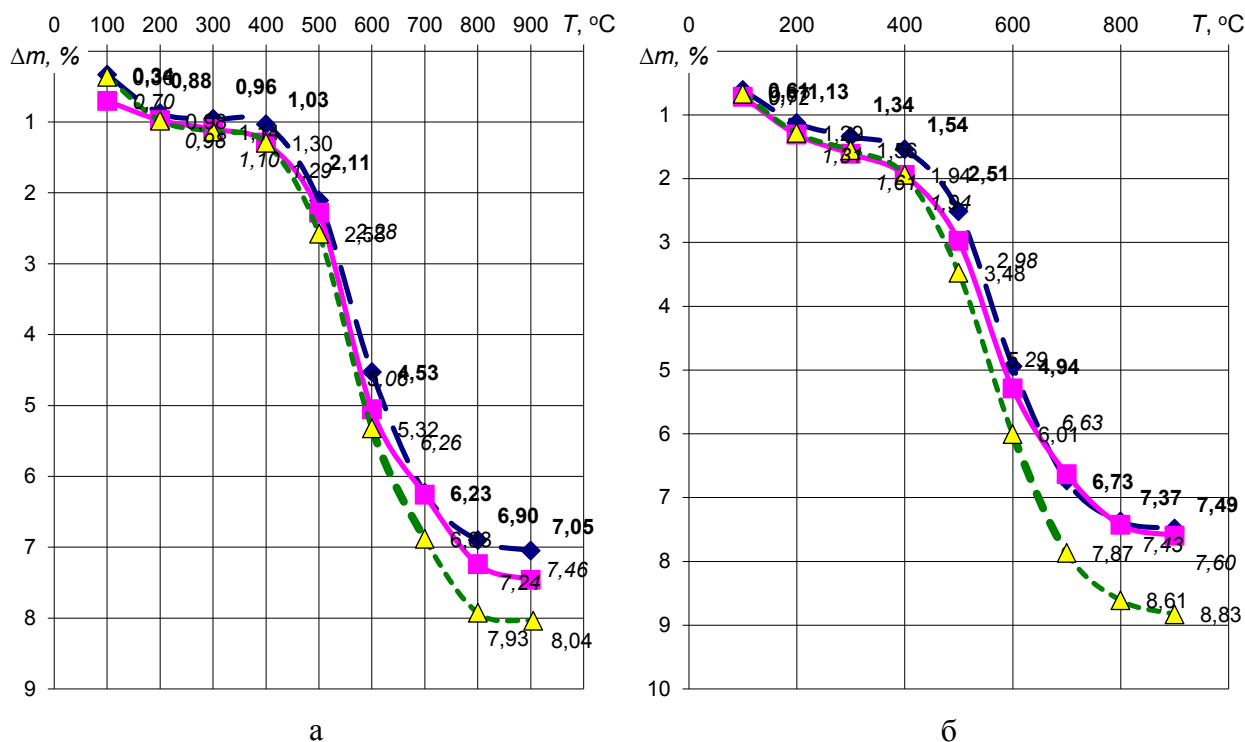


Рис. 3. Потери массы образцов из 6-го бортового ходка СП № 3 пл. h_8 шахты «Прогресс»:

а – без нагрузки, б – под нагрузкой 600 МПа;

—●— ПК47+15; —■— ПК47+17; - -▲- ПК47+12

В ходе исследования определены энергетические параметры песчано-глинистого сланца: минимальная энергия дегидратации химически связанной воды $U_{\min}$ и энергия формоизменения в запредельном состоянии W_{ϕ} образца горной породы в условиях объемного нагружения (табл. 5).

Сравнивая их отношение $U_{\min} / W_{\phi}$, обнаружили закономерность: в образцах, взятых в месте вывала, это отношение было менее 1, в местах нормального залегания – более 1.

Полученные данные подтверждают гипотезу, объясняющую локальность вывалов фазовым переходом твердофазной воды в жидкое состояние, снижающее физико-механические свойства горной породы по типу эффекта Ребиндера.

Таблица 5

Влияние химически связанной воды на физико-механические характеристики образцов, отобранных на различном расстоянии от обрушения в 6-м бортовом ходе СП № 3 пл. h_8 шахты «Прогресс»

Место расположения породных проб	Доля химически связанной воды, % (400...800 °C)	Предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности на одноосное растяжение $\sigma_{рас}$, МПа	Модуль упругости горной породы $E_{ср} \cdot 10^3$, МПа	Энергия формоизменения в запредельном состоянии W_{ϕ}^* , кДж/моль	Минимальная энергия дегидратации химически связанной воды U_{min} , кДж/моль	Критерий склонности горной породы к вне-запному обрушению U_{min} / W_{ϕ}
Вывал ПК 47+12	6,53	65	8,4...9,6	12,2	28,8...47,8	48,1	0,82
ПК 47+15	5,37	40	8,5...10,6	9,8	18,1...21,6	44,6	2,25
ПК 47+17	5,87	41	6,5...7,1	25,62	3,7...4,0	42,2	10,96

W_{ϕ}^* – энергия формоизменения горной породы в условиях объемного нагружения

Таким образом, повышенная концентрация химически связанной воды после релаксации нагруженного образца может привести к хрупкому разрушению, что проявится в ускоренном образовании трещин и объясняет локальность вывала породы в соответствии с совершенно ослабленной и «разваленной» дифракционной картиной.

В целом проведенный цикл исследований позволил обосновать методику оценки склонности горных пород к вывалам, включающую определение энергии формоизменения горных пород при разрушении в условиях неравнокомпонентного нагружения, которое моделирует запредельное состояние горного массива и энергии активации дегидратации кристаллогидратной воды в интервале температур 100...900 °C.

Выводы

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований вопроса локальной устойчивости породных обнажений в горизонтальных горных выработках на стадии их сооружений на основе результатов исследований геомеханических процессов, разработанных способов и средств управления ими.

2. Установлено, что вывалы связаны с фазовым переходом твердофазной воды в жидкое состояние, ухудшающее физико-механические свойства горной породы по типу эффекта Ребиндера и при значении энергетических

показателей, в частности при $U_{\min} / W_{\phi} \leq 1$, горные породы, вмещающие угольные пласты, склонны к внезапным обрушениям.

Дальнейшие исследования – накопление и обобщение данных аналогичных экспериментов с породами различной степени метаморфизма для получения обобщенных энергетических показателей и последующего расчета критерия склонности горной породы к внезапному обрушению.

Список литературы / References

1. Гриб, Н.Н. Влияние горно-геологических факторов на устойчивость породных обнажений в подготовительных горных выработках на стадии их проведения / Н.Н. Гриб, А.А. Кирейченков, П.Ю. Кузнецов // Современные проблемы науки и образования – 2013. – Вып. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/pdf/2013/4/389.pdf> (дата обращения 11.09.2018).

Grib, N.N., Kireychenkov, A.A., Kuznetsov, P.Yu. *Vliyaniye gorno-geologicheskikh faktorov na ustoychivost' porodnykh obnazheniy v podgotovitel'nykh gornykh vyrabotkakh na stadii ikh provedeniya* [The influence of mining and geological factors on the stability of rock outcrops in the preliminary development on the stage of their realization]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 4. Available at: <http://science-education.ru/pdf/2013/4/389.pdf> (accessed. 11.09.2018).

2. Смирнов, А.В. К вопросу о вывалообразовании, как форме катастрофического проявления горного давления в условиях больших глубин разработки / А.В. Смирнов, А.В. Мартовицкий, А.В. Солодянкин // [Электронный ресурс]. URL: <http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/3726/1/CD109%20стр.80-90.pdf> (дата обращения 11.09.2018).

Smirnov, A.V., Martovitskiy, A.V. Solodyankin, A.V. *K voprosu o vyvaloobrazovanii, kak forme katastroficheskogo proyavleniya gornogo davleniya v usloviyakh bol'shikh glubin razrabotki* [On the question of inrush formation as a catastrophic manifestation of rock pressure in deep-earth underground mines]. [Electronic resource]. Available at <http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/3726/1/CD109%20стр.80-90.pdf> (accessed 11.09.2018).

3. Левин, Б.В. Роль воды в подготовке коровых землетрясений / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова, М.В. Родкин // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 6. – С. 3 – 10.

Levin, B.W., Sasorova, Ye. V., Rodkin, M.V. *Rol' vody v podgotovke korovykh zemletryaseni*y [Water significance in generation of crust earthquakes]. *Vestnik DVO RAN* [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (Journal "Bulletin FEB RAS")], 2008, no. 6, pp. 3 – 10.

4. Энергетический критерий прочности горных пород с нарушенной структурой при объемном нагружении / И.А. Леванковский, Б.К. Норель, Ю.В. Каплунов, А.Ю. Горлов // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2013. – № 5. – С. 179 – 190.

Levankovskiy, I.A., Norel', B.K., Kaplunov, Yu.V., Gorlov, A.Yu. *Energeticheskiy kriteriy prochnosti gornykh porod s narushennoy strukturoy pri obyemnom nagruzhении* [Energy criterion of rocks durability with the broke structure by the voluminous load]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) – Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, no. 5, pp. 179–190.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым.
Дата поступления рукописи 11.09.2018

Gennady Petrovich Starikov, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;
Sergey Vasilyevich Shatokhin, postgraduate student, engineer; e-mail: shatohin-sergej@mail.ru
The Governmental Institution "Institute of Physics of Mining Processes" of the DPR
283114, Donetsk, 72, ulitsa Rosy Luxemburg. Phone (+38 062) 381-13-55

EVALUATION OF ROCK INRUSH SUSCEPTIBILITY

Purpose. Obtaining the data for calculation of the rock inrush susceptibility.

Methods. The thermobaric methods of investigations of sandy shale samples exposed to a hydrostatic pressure of 600 MPa that simulate the heavy pressure of a massif were used. The activation energy of the chemically bound water in the samples using the Broido-Prokopchuk method has been determined.

Results. The obtained results of investigation have permitted to ascertain the influence degree of the chemically bound water in dynamic processes. The calculations have been fulfilled that allow explaining the locality of the inrushes in the 6th side footway CII no. 3 of the h_8 "Fominskoy" seam of the "Progress" mine.

Scientific novelty. For the first time the hypothesis has been checked that explains the locality of the inrush process with the phase transition of the solid-phase water into the liquid state reducing the physical-mechanical rock properties by Reh binder effect type.

Practical value. It has been established that within the totality of energy data record, in particular by the ratio of the minimum dehydration energy of the chemically bound water $U_{\min}$ to the distortion energy at the heavy pressure W_{ϕ} under conditions of the volumetric stressing, the rocks containing the coal seams are susceptible to sudden collapses if $U_{\min} / W_{\phi} \leq 1$.

Key words: inrush; modulus of elasticity; activation energy; chemically bound water; rock distortion energy; criterion of rock susceptibility to sudden collapse.

УДК [622.867.3:614.894]:622.81/.86

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-47*

ПАРАМЕТРЫ АВАРИЙНОГО ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ БОКСА-БАЗЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЙ

Цель. Обоснование количества воздуха, подаваемого в систему жизнеобеспечения бокса-базы в аварийном режиме от транспортного баллона.

Методика. Расчётно-экспериментальные методы исследований.

Результаты. Проведенные исследования позволили определить необходимый расход воздуха для жизнеобеспечения отделения горноспасателей.

Новизна. Установлен необходимый расход воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей, находящихся в боксе-базе, отличающийся тем, что при его расчете учитывается парциальное давление компонентов атмосферы.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволят более точно рассчитывать минимально необходимое количество воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей, находящихся в боксе-базе.

Ключевые слова: коллективные средства защиты; бокс-база горноспасательная; система жизнеобеспечения; количество воздуха; парциальное давление.

Постановка проблемы. Для повышения эффективности горноспасательных работ и безопасности труда горноспасателей в НИИГД «Респиратор» разработаны, испытаны и широко внедрены передвижные промежуточные подземные боксы-базы, которые используют для отдыха горноспасательных отделений, хранения оборудования, дыхательной аппаратуры, развертывания пункта оказания первой медицинской помощи пострадавшим, организации телефонной связи и др. Такие боксы-базы обеспечивают горноспасателям комфортные условия отдыха на путях их следования в загазованной среде и в непосредственной близости от места ведения аварийно-спасательных работ, проводимых на значительном удалении от выработок с нормальными условиями.

Заполнение бокса-базы горноспасательной воздухом происходит от шахтного пневмопровода или передвижного компрессора через систему жизнеобеспечения, которая очищает подаваемый воздух от вредных газовых примесей и избыточной влаги.

При разработке аварийного воздухообеспечения системы жизнеобеспечения бокса-базы от транспортного воздушного баллона возникла необходимость расчета и обоснования минимального необходимого количества воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей в боксе-базе.

Анализ последних исследований. Существуют различные подходы к расчету необходимого расхода воздуха. В работе [1] рассчитывают расход воздуха по количеству людей:

$$Q = 6n_{\text{чел}} , \quad (1)$$

где $n_{\text{чел}}$ – наибольшее количество людей, одновременно работающих в очистной выработке;

6 – норма расхода воздуха на человека, м³/мин.

Расход воздуха, рассчитанный по данной формуле для относительно замкнутого объема, каковым является бокс-база, – избыточен. Конструкторской документацией устанавливается расход воздуха для жизнеобеспечения бокс-базы горноспасательной от 1 до 3 м³/ч. Данное количество необходимого воздуха определяется потребностями турбохолодильника для его работы.

В случае применения системы аварийного воздухообеспечения для эвакуации горноспасателей, находящихся в боксе-базе, понижение температуры турбохолодильником становится неактуальным. В случае аварийного режима более важно добиться максимального времени защитного действия бокс-базы при минимальном количестве применяемых баллонов.

В литературных источниках [2, 3] существует формула для расчета необходимой подачи свежего воздуха W в систему (скафандр) по допустимому значению парциального давления диоксида углерода:

$$W = \frac{T_{\text{ск}} R_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}_2}} \left(g_{\text{CO}_2 \text{ чел}} + g_{\text{CO}_2 \text{ под}} \right), \quad (2)$$

где R_{CO_2} – газовая постоянная диоксида углерода, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ск}}$ – температура воздуха в скафандре, К;

P_{CO_2} – допустимое парциальное давление диоксида углерода в скафандре, кПа;

$g_{\text{CO}_2 \text{ чел}}$ – количество диоксида углерода, выделяемого человеком, дм³/мин;

$g_{\text{CO}_2 \text{ под}}$ – количество диоксида углерода, содержащегося в подаваемом в скафандр воздухе, дм³/мин.

Данная формула не позволяет учитывать давление и как следствие – глубину выработки.

Результаты исследований. Исходя из того, что одинаковое количество любого газа при одинаковых – изобарических и изотермических – условиях занимает одинаковый объём (закон Авогадро), получаем соотношение между количеством вещества и объёмом диоксида углерода и воздуха:

$$\frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{возд}}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{возд}}}, \quad (3)$$

где n_{CO_2} – количество диоксида углерода, моль;

$n_{\text{возд}}$ – количество других компонентов воздуха, моль;

V_{CO_2} – объем, занимаемый диоксидом углерода, дм^3 ;

$V_{\text{возд}}$ – объем, занимаемый другими компонентами воздуха, дм^3 .

Отсюда имеем

$$V_{\text{возд}} = \frac{V_{\text{CO}_2} n_{\text{возд}}}{n_{\text{CO}_2}}. \quad (4)$$

Определяем количество диоксида углерода, киломоль, по формуле (5) и воздуха (6):

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{R \mu_{\text{CO}_2}^{-1} T_{\text{CO}_2}}; \quad (5)$$

$$n_{\text{возд}} = \frac{P_{\text{возд}}}{R \mu_{\text{возд}}^{-1} T_{\text{возд}}}, \quad (6)$$

где P_{CO_2} – парциальное давление диоксида углерода, кПа;

μ_{CO_2} , $\mu_{\text{возд}}$ – молекулярные массы диоксида углерода и воздуха соответственно;

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

T_{CO_2} – температура диоксида углерода, К;

$T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, К;

$P_{\text{возд}}$ – парциальное давление остальных компонентов воздуха, кПа;

$P_{\text{возд}} = P - P_{\text{CO}_2}$;

P – атмосферное давление, равное сумме парциальных давлений всех компонентов воздуха, кПа.

Подставляя уравнения (5) и (6) в (4) и принимая, что $T_{\text{CO}_2} = T_{\text{возд}} = T = \text{const}$, получаем

$$V_{\text{возд}} = \frac{V_{\text{CO}_2} (P - P_{\text{CO}_2}) \mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2}}. \quad (7)$$

Учитывая потери при проветривании бокса-базы и объём диоксида углерода, выделяемого при дыхании людей в боксе-базе:

$$V_{\text{CO}_2} = W_{\text{CO}_2} N, \quad (8)$$

где W_{CO_2} – объём диоксида углерода, выделяемого одним человеком в единицу времени при дыхании, $\text{дм}^3/\text{мин}$;

N – количество людей в боксе-базе.

Получаем необходимый расход воздуха при проветривании:

$$V_{\text{возд}} = \frac{W_{\text{CO}_2} N (P - P_{\text{CO}_2}) \mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2} \eta_{\text{пров}}}, \quad (9)$$

где P – давление в выработке шахты, кПа;

P_{CO_2} – допустимое парциальное давление диоксида углерода, кПа;

$\mu_{\text{возд}}$ – молекулярная масса воздуха;

μ_{CO_2} – молекулярная масса диоксида углерода;

$\eta_{\text{пров}}$ – коэффициент проветривания.

Формула (9) позволяет учитывать коэффициент динамического проветривания и сумму парциальных давлений компонентов воздуха (т.е. давление и глубину выработки).

Принимаем скорость выделения диоксида углерода одним человеком в состоянии покоя $W_{\text{CO}_2} = 0,3 \text{ дм}^3/\text{мин}$ [2]; $\mu_{\text{CO}_2} = 44$; $\mu_{\text{возд}} = 29$; давление в шахтной выработке $P = 120 \text{ кПа}$, допустимое парциальное давление диоксида углерода $P_{\text{CO}_2} = 1,33 \text{ кПа}$; коэффициент проветривания $\eta_{\text{пров}} = 0,5$; количество людей, находящихся в боксе-базе $N = 12 \text{ чел}$.

Подставив исходные данные в формулу (9), получаем минимальное количество воздуха для вентиляции бокса-базы:

$$V_{\text{возд}} = \frac{0,3 \cdot 12 \cdot (120,00 - 1,33) \cdot 29}{44 \cdot 1,33 \cdot 0,5} = 423,4 \text{ дм}^3/\text{мин}.$$

Полученные результаты были использованы при разработке системы аварийного воздухообеспечения бокса-базы от транспортного баллона (рис. 1). Редуктор воздушного баллона настраивали на редуцированное давление, равное 0,2, 0,3 и 0,4 МПа, после чего определяли время защитного действия (рис. 2).

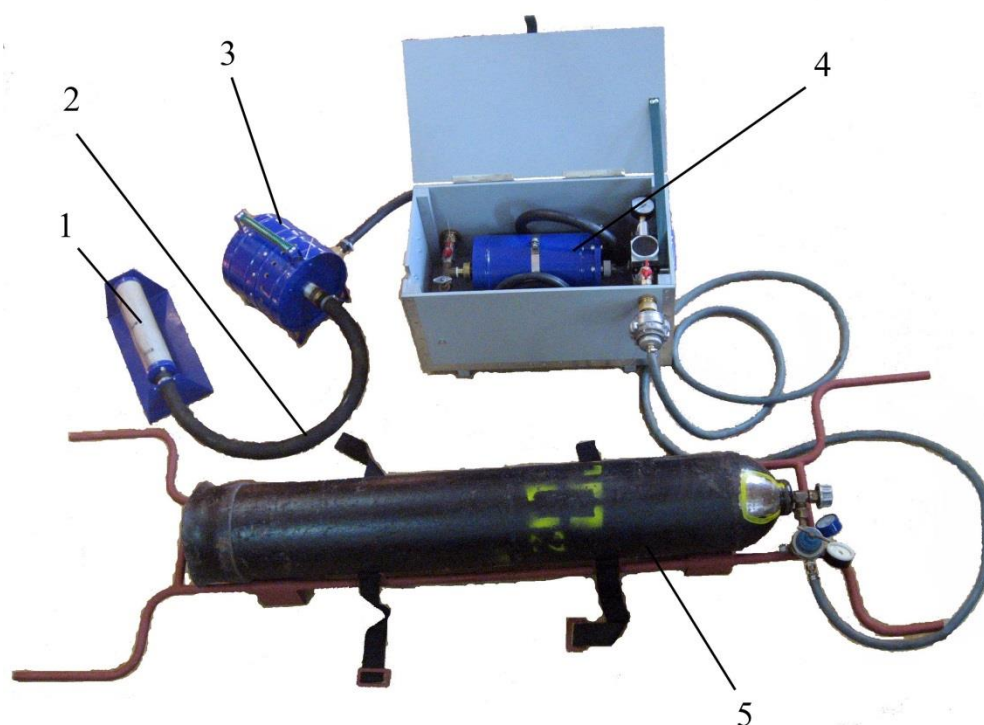


Рис. 1. Система аварийного воздухообеспечения бокса-базы от транспортного баллона:

1 – рассекатель; 2 – соединительный рукав; 3 – блок охлаждения;
4 – блок подготовки воздуха; 5 – баллон

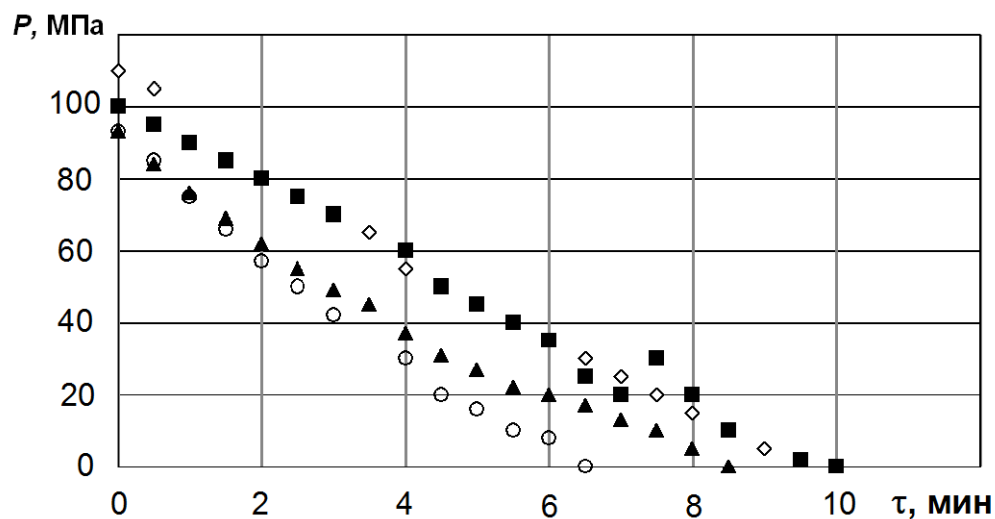


Рис. 2. График зависимости изменения давления сжатого воздуха P из транспортного баллона во времени τ при различных настройках редуктора:

◇, ■ – редуцированное давление, равное 0,2 МПа; ▲ – 0,3 МПа; ○ – 0,4 МПа

Учитывая линейную зависимость изменения давления сжатого воздуха в транспортном баллоне от времени, получили следующие средние показатели расхода воздуха: 400 дм³/мин (при редуцированном давлении 0,2 МПа), 437 дм³/мин (редуцированное давление 0,3 МПа) и 584 дм³/мин (редуцированное давление 0,4 МПа).

Таким образом, учитывая полученное расчетным путём минимально необходимое количество воздуха для жизнеобеспечения бокса-базы горноспасательной $V_{\text{возд}} = 423,4$ дм³/мин, при настройке экспериментального образца было принято редуцированное давление, равное 0,3 МПа.

Выводы. Проведенные теоретические исследования позволили установить, обосновать и вывести формулу расчета минимально необходимого количества воздуха для жизнеобеспечения бокса-базы горноспасательной в аварийных условиях от транспортного воздушного баллона. Формула (9) учитывает количество горноспасателей, находящихся в боксе-базе.

Список литературы / References

1. Голинько, В.И. Вентиляция шахт и рудников / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, О.А. Муха. – Днепропетровск: Национальный горный ун-т, 2012. – 266 с.

Golin'ko, V.I., Lebedev, Ya.Ya., Mukha, O.A. *Ventilyatsiya shakht i rudnikov* [Ventilation of mines and pits]. Dnepropetrovsk, Natsional'nyy gornyy universitet Publ., 2012, 266 p.

2. Овчаров, В.К. Коллективные средства защиты, созданные НИИГД «Респиратор» / В.К. Овчаров, Э.Г. Ильинский, Е.И. Конопелько [Электронный ресурс]. URL: http://vuzlib.com.ua/articles/book/27464-kollektivnye_sredstva/1.html (дата обращения: 26.02.2018).

Ovcharov, V.K., Il'inskiy, E.G., Konopel'ko, Ye.I. *Kollektivnyye sredstva zashchity, sozdannyye NIIGD "Respirator"* [The collective protective means created by the NIIGD "Respirator"]. [Electronic resource]. Available at: http://vuzlib.cpm.ua/articles/book/27464-kollektivnye_sredstva/1.html (accessed: 26.02.2018).

3. Голик, А.С. Современные средства жизнеобеспечения подземного персонала шахт в аварийных условиях / А.С. Голик, В.А. Зубарева, А.А. Апальков // Вестник: науч.-техн. журн. – 2015. – № 3. – С. 61 – 65.

Golik, A.S., Zubareva, V.A., Apal'kov, A.S. *Sovremennyye sredstva zhizneobespecheniya podzemnogo personala shakht v avariynyykh usloviyakh* [The modern survival facilities of the underground personal of mines under emergency conditions]. *Vestnik: nauch.-tekhn. zhurn. – Bulletin: scientific-technical journal*, 2015, no. 3, pp. 61 – 65.

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

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

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-45

PARAMETERS OF EMERGENCY AIR SUPPLY FOR A LIFE SUPPORT SYSTEM OF A MINE-RESCUE REFUGE CHAMBER

Purpose. The scientific paper substantiates the amount of air being supplied to the life support system of the mine-rescue refuge chamber operating in the emergency mode from a transport tank.

Methods. Experiment-calculated methods of investigations.

Results. The carried-out investigations have permitted to determine the necessary air consumption for the life support of a section of mine rescuers.

Scientific novelty. The necessary air consumption for the life support of the mine rescuers being in the refuge chamber has been determined. It distinguishes itself that the partial pressure of the atmosphere components is taken into account by its calculation.

Practical value. The obtained results of the investigations will permit the more precise calculation of the minimally necessary amount of air for the life support of the mine rescuers being inside the refuge chamber.

Key words: *collective protective equipment; mine-rescue refuge chamber; life support system; amount of air; partial pressure.*

УДК 622.454.3:622.411.33

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

Александр Викторович Мавроди, инж.; e-mail: mavrodi-av@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*

УСЛОВИЯ ВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ

Цель. Оценить условия выхода горнорабочих на свежую струю, ведения аварийно-спасательных работ на удаленных выемочных участках при различных схемах проветривания, их безопасность и эффективность.

Методы. Анализ путей выхода горнорабочих при авариях на свежую струю на выемочных участках при различных схемах проветривания с учетом способности разбавления вредных выделений (газа, пыли, теплоты), рациональной скорости движения воздуха для предупреждения и ликвидации местных скоплений метана, возможности получения больших нагрузок на очистные забои и эффективности схем.

Результаты. Предложены способы и схемы проветривания выемочных участков, обеспечивающего возможность безопасного выхода горнорабочих на свежую струю в случае аварии (пожара) за время действия самоспасателя, безопасное ведение аварийно-спасательных работ, ликвидацию местных скоплений метана на сопряжении лавы с вентиляционной выработкой и у бутовых полос за счет более высоких скоростей движения воздуха, увеличение нагрузки на очистной забой и эффективность схем проветривания.

Научная новизна. Предложены способы конструирования схем проветривания удаленных выемочных участков, обеспечивающие резкое сокращение пути выхода горнорабочих на свежую струю за время действия самоспасателя и эффективные действия горноспасателей с максимальной близостью к свежей струе, повышение безопасности работ в нормальных и аварийных условиях.

Практическая значимость. Применение рассматриваемых схем проветривания выемочных участков повысит безопасность и надежность выхода горнорабочих на свежую струю, обеспечит ликвидацию местных скоплений метана, благоприятные условия для ведения аварийно-спасательных работ, увеличение подачи воздуха на выемочный участок при больших нагрузках на очистной забой.

Ключевые слова: *выемочный участок; авария; условия выхода горнорабочих; действие горноспасателей; схема проветривания; оценка эффективности.*

Введение. Основную роль в обеспечении безопасных условий выхода горнорабочих на свежую струю, эффективности разбавления метана, ликвидации местных его скоплений, повышении нагрузок на очистные забои играют схемы проветривания выемочных участков [1, 2]. Конструкция выемочного участка и схемы проветривания должны обеспечивать:

- благоприятные условия для спасения людей и ликвидации аварий;
- устойчивое проветривание очистных забоев в нормальных и аварийных условиях;
- обособленное разбавление вредностей;

- исключение образования опасных скоплений метана на сопряжениях лав с вентиляционными выработками;
- большую нагрузку на очистной забой.

Методы. Анализ путей выхода горнорабочих при авариях на свежую струю на выемочных участках при различных схемах проветривания с учетом способности разбавления вредностей, рациональной скорости движения воздуха для предупреждения и ликвидации местных скоплений метана, возможности получения больших нагрузок на очистные забои и эффективности схем проветривания.

Цель работы. Оценка условий ведения аварийно-спасательных работ, минимизация путей выхода горнорабочих на свежую струю, увеличение нагрузок на очистные забои.

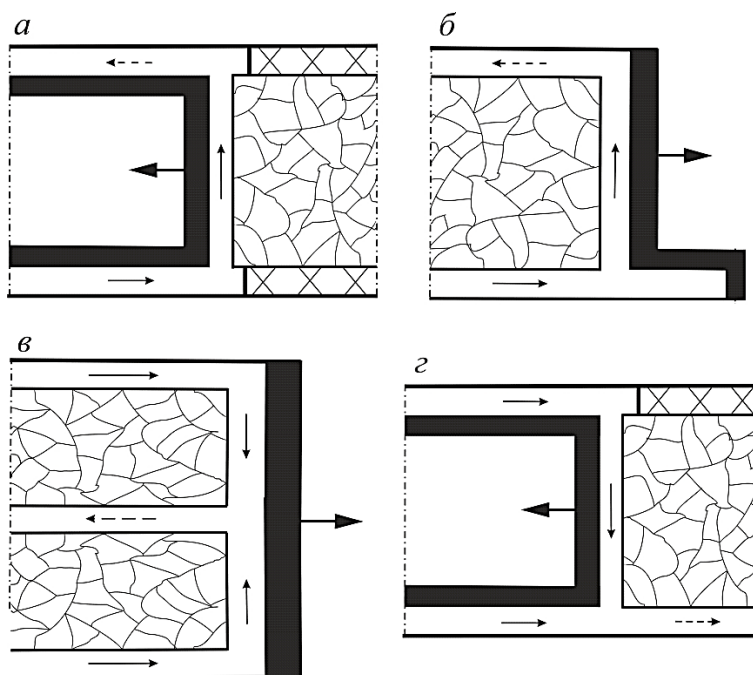
Результаты. Анализ применяемых на шахтах схем проветривания выемочных участков, безопасности ведения горных работ, качества схем показывает, что разные схемы не полностью отвечают всем требованиям безопасности, не способны гарантировать необходимый расход воздуха с учетом скорости его движения через очистной забой (4 м/с) при одинаковых горно-технических условиях (мощность пласта, тип крепи и выемочного комплекса и др.), обеспечить ликвидацию местных скоплений метана и высокую нагрузку на очистной забой.

Поэтому при конструировании схемы проветривания автоматически закладывают условия спасения людей в случае аварии [1, 2, 3], разбавления метана в горных выработках, максимально возможную нагрузку на очистной забой и другие параметры.

Выемочные участки с точки зрения обеспечения безопасного выхода горнорабочих, ведения горных и аварийно-спасательных работ, возможности ликвидации местных скоплений метана, необходимости получения высоких нагрузок на очистные забои можно разделить на четыре группы (см. рисунок).

Основным средством спасения горнорабочих при авариях с выделением вредных газов (пожар, взрыв, загазование) является изолирующий самоспасатель, обеспечивающий выход на свежую струю за время его действия. Защита органов дыхания горноспасателей осуществляется с помощью респираторов, имеющих ограниченный срок защитного действия.

Возвратноточные схемы проветривания выемочных участков с последовательным разбавлением вредностей затрудняют выход горнорабочих на свежую струю из-за протяженного пути движения в не пригодной для дыхания среде, особенно при длинных выемочных полях (до 1000...2000 м).



Схемы проветривания выемочных участков:

а – возвратноточная схема проветривания и выдача исходящей из лавы вентиляционной струи на массив угля; *б* – возвратноточная схема проветривания и выдача исходящей из лавы вентиляционной струи на выработанное пространство; *в* – возвратноточная схема проветривания, разделение лавы на две части и выдача исходящей из лавы вентиляционной струи на выработанное пространство по средней выработке; *г* – прямоточная схема проветривания, полное обособленное разбавление вредных выделений и выдача исходящей из лавы струи на выработанное пространство

Для сокращения длины маршрутов горнорабочих и горноспасателей в не пригодной для дыхания среде применяют:

- разделение длинного выемочного столба на части специальной выработкой между конвейерной и вентиляционной выработками;
- специальные камеры-убежища;
- пункты переключения в резервные самоспасатели;
- соответствующие аварийные вентиляционные режимы.

Разделение столба на части снижает устойчивость и надежность проветривания лавы. Закорачивание вентиляционной струи через эту выработку, может, и приводило к загазованию лавы и взрыву. Применение дополнительной выработки снижает экономичность добычи, затрудняет переход этой выработки лавой, обуславливает ее перемонтаж при схеме *а* и практическую сложность и опасность прохождения выработки по загазованному выработанному пространству в нарушенных породах при схеме *б*.

Камеры-убежища, как правило, располагают в выработках с исходящей вентиляционной струей, требуют надежной изоляции от действующих выработок и независимого проветривания. Пункты переключения в резервные

самоспасатели также не всегда решают безопасный выход горнорабочих и горноспасателей. При этом в аварийных режимах, кроме того, не решаются вопросы увеличения подачи воздуха на выемочный участок в зону выноса метана и борьбы с местными его скоплениями, обеспечения больших нагрузок на очистные забои и др.

Поэтому для безопасного ведения аварийно-спасательных работ в высоконагруженных выемочных участках с длинными выемочными полями требуется надежное схемное решение вопроса выхода горнорабочих на свежую струю, обеспечивающее ликвидацию или снижение вероятности образования местных скоплений метана и большие нагрузки на очистные забои.

Анализ конструкций схем проветривания выемочных участков показывает, что только схемы *в* и *г* обеспечивают безопасный выход горнорабочих на свежую струю за время действия самоспасателя при подаче свежей струи к лаве по двум выработкам (15...25 мин и не зависит от места аварии и удаления лавы).

Наличие двух свежих струй обеспечивает безопасное ведение разведки горноспасателями, спасение горнорабочих, безопасное ведение аварийных работ и высокую эффективность угледобычи.

Оценка эффективности схем проветривания (без дегазации и других средств удаления метана) выполнена укрупненно по допустимому метановыделению, пропускной способности выемочного участка по расходу воздуха и максимально возможной по газовому фактору нагрузке на очистной забой.

Значение максимально допустимого метановыделения предложено определять по формулам

для очистного забоя

$$I_{\text{оч.мах}} = \frac{k_{\text{оз}} S_{\text{оч}} V_{\text{оч.мах}} n_0}{100 k_{\text{н}}}, \quad (1)$$

для выемочного участка

$$I_{\text{уч.мах}} = \frac{k_{\text{ут.в}} S_{\text{оч}} V_{\text{оч.мах}} n_0 + Q_{\text{доп}}}{100 k_{\text{н}}} \leq S_{\text{в}} V_{\text{в.мах}} 100 k_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{оз}}$, $k_{\text{ут.в}}$ – коэффициенты, учитывающие движение воздуха по части выработанного пространства, непосредственно примыкающего к призабойному, и суммарные утечки воздуха через выработанное пространство, м³/с;

$S_{\text{оч}}$, $S_{\text{в}}$ – поперечное сечение очистной и вентиляционной выработок, м²;

$V_{\text{оч.мах}}, V_{\text{в.мах}}$ – максимально допустимая скорость воздуха в очистной и вентиляционной выработках, м/с;

n_0 – количество обособленно проветриваемых частей очистного забоя;

$Q_{\text{доп}}$ – расход воздуха в дополнительной выработке, м³/с;

k_n – коэффициент неравномерности метановыделения.

Пропускные способности очистной выработки $Q_{\text{оч.мах}}$ и выемочного участка $Q_{\text{уч.мах}}$ по расходу воздуха определяются по формулам

$$Q_{\text{оч.мах}} = k_{\text{оз}} S_{\text{оч}} V_{\text{оч.мах}} n_0; \quad (3)$$

$$Q_{\text{уч.мах}} = k_{\text{ут.в}} S_{\text{оч}} V_{\text{оч.мах}} n_0 + Q_{\text{доп}} \leq S_{\text{в}} V_{\text{в.мах}}. \quad (4)$$

Максимально допустимую по газовому фактору нагрузку на очистной забой $A_{\text{оч.мах}}$ определяли в соответствии с нормативными документами.

Анализ показателей эффективности схем проветривания (см. таблицу) показывает, что первые три схемы предназначены для отработки одиночных пластов с небольшим метановыделением из выработанного пространства (до 25...40 %). Они обеспечивают безопасную отработку лав с нагрузкой для реальных газообильных пластов (10...25 м³/т) от 184 до 992 т/сут для схемы *а*, до 1110 т/сут для схемы *б* и до 2220 т/сут в лавах из двух частей.

Наименее эффективной является возвратноточная схема *а* из-за меньших утечек воздуха примерно на 22 % по сравнению с возвратноточной схемой *б*. К достоинству схемы *б* относится только быстрый ввод лавы в работу.

Схема с разделением лавы на две части обеспечивает главное – сокращение пути выхода горнорабочих на свежую струю и практически двойное увеличение определяющих параметров (поступление воздуха на участок, нагрузки на очистной забой, скорости движения воздуха в зоне выноса метана из выработанного пространства и ликвидацию местных его скоплений).

Значение показателей сравнительной эффективности основных схем проветривания выемочных участков без применения дегазации и других средств борьбы с метаном

Тип схемы проветривания	$Q_{\text{оч.мах}},$ м ³ /мин	$I_{\text{оч}},$ м ³ /мин	$Q_{\text{уч}},$ м ³ /мин	$I_{\text{уч}},$ м ³ /мин	$A_{\text{оч}}, \text{т/сут, при } q_{\text{оч}}, \text{м}^3/\text{т}$			
					10	15	20	25
Возвратноточная схема проветривания, выдача исходящей на массив	400	2,53	500	3,2	461	307	230	184
	600	4,08	750	5,1	734	490	367	294
	800	5,50	1000	6,89	992	661	496	397
Возвратноточная схема проветривания, выдача исходящей на выработанное пространство	400	2,53	560	3,72	536	367	268	214
	600	4,08	840	5,74	826	551	412	330
	800	5,50	1120	7,71	1110	740	555	444

Окончание

Тип схемы проветривания	$Q_{оч. \max}$, м ³ /мин	$I_{оч}$, м ³ /мин	$Q_{уч}$, м ³ /мин	$I_{уч}$, м ³ /мин	$A_{оч}$, т/сут, при $q_{оч}$, м ³ /т			
					10	15	20	25
Возвратноточная схема проветривания, разделение лавы на две части, выдача исходящей по средней выработке	2×400	5,08	1120	7,45	1072	715	536	429
	2×600	8,16	1680	11,49	1654	1103	827	682
	2×800	11,0	2240	15,43	2222	1481	1110	889
Прямоточная схема проветривания, полное обособленное разбавление вредных выделений, выдача исходящей струи на выработанное пространство	400	2,53	2160	5,1	2174	1448	1087	870
	600	4,08	2944	19,88	2862	1904	1428	1145
	800	5,50	4032	28,19	4060	2706	2025	1624

Наиболее совершенной, эффективной и безопасной является прямоточная схема проветривания выемочного участка с полным обособленным разбавлением вредностей и выдачей исходящей из лавы вентиляционной струи на выработанное пространство. Она способна самостоятельно без дегазации и других средств борьбы с метаном обеспечить самые высокие нагрузки на очистной забой (до 4000 т/сут) и отвечает требованиям безопасности ведения горных и аварийно-спасательных работ [2, 3, 4].

Основные преимущества схемы заключаются в:

- минимальном расстоянии выхода горнорабочих на свежую вентиляционную струю в аварийной обстановке за время действия самоспасателя;
- возможности применения надежного нормального режима проветривания при авариях;
- удалении зоны выноса метана из выработанного пространства на значительное расстояние от лавы за пределы рабочей зоны;
- поступлении на участок большего расхода воздуха примерно в 2...3 раза благодаря дополнительной выработке;
- увеличении скорости воздуха в зоне выноса метана из выработанного пространства, турбулизации воздушного потока и ликвидации местных скоплений метана;
- практически полной ликвидации местных скоплений метана на сопряжении лавы с вентиляционной выработкой при столбовой системе разработки благодаря направлению движения воздуха по дополнительной выработке в сторону выработанного пространства;
- подаче к лаве свежей струи воздуха по двум выработкам;
- практическом исключении поступления метана и теплоты из выработанного пространства в лаву и основные выработки участка;

- поступлении свежего воздуха в лаву по свободной от конвейера более сухой выработке, что снижает его температуру на $2...7^{\circ}\text{C}$, а также запыленность и влажность воздуха;
- стабильном аэродинамическом сопротивлении выемочного участка в процессе его отработки (в схемах *a* и *б* аэродинамическое сопротивление участков в процессе их отработки меняется в $1,5...1,8$ раза);
- возможности применения эффективной дегазации (до $0,8$), обеспечивающей дополнительный рост нагрузки на очистной забой;
- ведении дегазационных работ (бурение скважин) за пределами рабочей зоны участка без усложнения технологического процесса;
- обособленном проветривании конвейерной выработки с выносом метана, пыли и теплоты, минуя лаву, в исходящую струю участка;
- отсутствии подготовительных работ на участке, затрудняющих технологический процесс;
- возможности эффективного применения при высоком метановыделении из выработанного пространства (более 60%);
- повторном использовании конвейерной выработки и сокращении за этот счет объема прохождения выработок.

Оценку эффективности использования схемы характеризуют коэффициенты:

загрузки схемы по объему метана

$$k_{\text{зм}} = I_{\text{уч}} / I_{\text{уч. max}}, \quad (5)$$

пропускной способности по расходу воздуха

$$k_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{уч}}}{S_{\text{в}} V_{\text{max}}}, \quad (6)$$

полезного использования воздуха

$$k_{\text{пи}} = \frac{Q_{\text{уч}} 100 I_{\text{вп}} k_{\text{н}}}{Q_{\text{уч}}}, \quad (7)$$

эффективности использования по нагрузке

$$k_{\text{нар}} = A_{\text{оч}} / A_{\text{max}}. \quad (8)$$

Использование схемы считается эффективным при значениях коэффициентов в пределах $0,8...1,0$ и не эффективно при менее $0,8$.

Выводы. Одним из наиболее существенных преимуществ схем с подачей к лаве двух свежих струй является возможность использования надежного нормального режима проветривания при пожарах и загазованиях с минимальным расстоянием выхода горнорабочих на свежую струю за время действия самоспасателя. Прямоточная схема проветривания выемочного участка имеет существенные преимущества по сравнению с возвратноточными по обеспечению безопасности ведения горноспасательных работ, возможной нагрузке на очистной забой по газовому фактору, подаче воздуха на участок, ликвидации местных скоплений метана, улучшении стабильности и кондиций поступающего в лаву свежего воздуха.

Список литературы / References

1. 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.

2. Пашковский, П.С. Проветривание выемочных участков при отключении систем дегазации / П.С. Пашковский, Н.В. Карнаух, А.В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 1(54). – С. 85 – 93.

Pashkovskiy, P.S., Karnaukh, N.V., Mavrodi, A.V. *Provetrivaniye vyyemochnykh uchastkov pri otklyuchenii sistem degazatsii* [Ventilation of excavation districts by cutout of degassing systems]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 1(54), pp. 85 – 93.

3. Схемы и способы управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, О.И. Касимов, Н.В. Карнаух и др. – Макеевка: МакНИИ, 2006. – 78 с.

Zvyagil'skiy, Ye.L., Bokiyy, B.V., Kasimov, O.I., Karnaukh, N.V. etc. *Skhemy i sposoby upravleniya gazovydeleniyem na vyyemochnykh uchastkakh ugol'nykh shakht* [Schemes and methods of gas control in working areas of coal mines]. Makeyevka, MakNII Publ., 2006, 78 p.

4. Пашковский, П.С. Управление аэродинамикой выработанных пространств при выемке газоносных углей / П.С. Пашковский // Уголь Украины. – 2003. – № 3. – С. 28 – 30.

Pashkovskiy, P.S. *Upravleniye aerodinamikoy vyrabotannykh prostranstv pri vyyemke gazonosnykh ugley* [Control of aerodynamics of wastes during excavation of gas-bearing coals]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2003, no. 3, pp. 28 – 30.

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

Aleksandr Viktorovich Mavrodi, engineer; e-mail: mavrodi-av@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

CONDITIONS FOR CARRYING-OUT THE EMERGENCY RESCUE OPERATIONS IN MINE WORKING AREAS

Purpose. To evaluate the conditions for the miners’ escape to fresh air, carrying-out the emergency rescue operations in the remote working areas by various ventilation schemes, their safety and effectiveness.

Methods. The analysis of the miners’ escape routes to fresh air by accidents in the mine working areas by various ventilation schemes with regard to the possibility of dilution of hazardous emissions (gas, dust, heat), rational air velocity in order to prevent and to eliminate the local methane accumulations and to enable the heavy longwall face loads and ventilation schemes efficiency.

Results. The methods and schemes of ventilation of the mine working areas have been proposed that provide the possible safe escape of the miners to fresh air in case of an accident (a fire) during the operation time of a self-rescuer, safe carrying-out the emergency rescue operations, elimination of the local methane accumulations at the conjunction of the longwall face with the air-way and at the gob packs due to the higher air velocities, increase of the longwall face load and ventilation schemes efficiency.

Scientific novelty. The methods of construction of the ventilation schemes for the remote mine working areas have been proposed which secure the sharp shortening of the miners’ escape route to fresh air during the operation time of the self-rescuer and effective actions of the mine-rescuers with the maximum proximity to fresh air, improvement of the work safety under both normal and emergency conditions.

Practical value. The usage of the ventilation schemes of the mine working areas under consideration will improve the safety and reliability of the escape of the miners to fresh air. It will also provide the elimination of the local methane accumulations, favorable conditions for carrying-out the emergency rescue operations, increase of the air supply to the mine working area by the heavy longwall face loads.

Keywords: *mine working area; accident; conditions for miners’ escape; action of mine-rescuers; ventilation scheme; evaluation of efficiency.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 551.588.7

Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 071-391-35-97

ОЖИДАЕМЫЕ ИЛИ НЕОЖИДАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Цель работы – оценка глобальных и локальных факторов, которые влияют на изменение эмиссии парниковых газов и сопутствующее изменение температуры околоземного пространства.

Методика исследований – определение степени разрушения гидрокарбонатов с генерацией диоксида углерода в зависимости от температуры и щелочности воды и анализ исследований зарубежных авторов влияния парниковых газов на климат.

Результаты. Приведен анализ изменения климата на поверхности Земли и показано влияние паров воды и диоксида углерода на парниковый эффект. На основании полученных формул приведен прогноз изменения концентрации диоксида углерода в атмосфере. Постоянное увеличение температуры околоземного пространства приведет к постепенному снижению гидрокарбонатной щелочности океанской воды и исчерпанию запасов связанного углерода в океане. Это вызывает необратимое изменение функционирования биологических систем.

Научная новизна. Анализ причин и последствий изменения концентрации парниковых газов и влияния отдельных составляющих газовой среды на эффект повышения температуры.

Практическая значимость. Оценка влияния различных газов, а также методов генерации энергии на парниковый эффект. Выбор путей уменьшения климатических катаклизмов.

Ключевые слова: климат; диоксид углерода; парниковый эффект; атмосфера; Земля.

Постановка проблемы. Глобальное изменение климата на Земле приводит к таким природным катаклизмам, как тайфуны, торнадо, наводнения и пр. Причина указанных критических изменений в окружающей среде – парниковый эффект. Вызывает некоторое удивление, что этот эффект может быть вызван диоксидом углерода, концентрация которого в атмосфере составляет сотые доли процента.

Анализ последних исследований. Чтобы предвидеть будущее, необходимо посмотреть в прошлое. Изменение климата на Земле уже происходило неоднократно. На протяжении прошлого миллиона лет на Земле было 10 больших и 40 малых периодов оледенений. Причину этих событий впервые исследовал серб Милутин Миланкович в 1920 г. [1]. Основные факторы следующие: земная ось наклоняется от 22 до 24,5° и обратно каждые 41000 лет; период времени, когда Земля ближе всего к Солнцу, изменяется циклами от 19000 до 24000 лет; форма орбиты Земли варьируется от эллиптической до почти круглой с периодичностью 100000 лет. Эти изменения происходят в результате действия других планет (в первую очередь Юпитера и Сатурна), а также Солнца и Луны.

Большинство климатологов полагает, что циклы Миланковича являются основной причиной начала и окончания периодов резких изменений климата, так как последние следуют за наблюдаемыми периодами изменения орбит Земли и планет.

Наряду с циклами потеплений известны данные о резком похолодании. Это происходило в докембрии (свыше миллиарда лет назад), рифеи (600...700 млн лет назад), ордовике (450...510 млн лет назад), силуре (410...460 млн лет назад), девоне (360...410 млн лет назад), перми (300...345 млн лет назад), триасе (150...210 млн лет назад), меле (60...140 млн лет назад), до четвертичного времени включительно (последний 1 млн лет). Эти ледниковые катастрофы на Земле являлись последствиями активизации вулканической деятельности. Однако в последние годы темпы изменения средней температуры на поверхности Земли превысили то, что раньше происходило в течение нескольких тысячелетий. Так, за последние 100 лет средняя температура повысилась на 0,8 °С, а за последние десять лет на 0,3...0,4 °С [2]. И уже вызывает тревогу тот факт, что каждый год становится теплее предыдущего.

Увеличение средней годовой температуры атмосферы будет сильнее ощущаться над материками, чем над поверхностью океанов вследствие большой теплоемкости воды. Зона вечной мерзлоты уже сместилась к северу на сотни километров. В последние годы Ледовитый океан наступает на сушу со скоростью 3...6 м за лето [3].

Многие страны уже приняли обязательства об ограничении эмиссии парниковых газов, прежде всего, диоксида углерода, несмотря на то, что это вызовет спад их экономики (табл. 1).

Таблица 1

Влияние отдельных газов на парниковый эффект [4]

Газ	Тропосферная концентрация до 1750 г., мг/кг (ppm)	Существующая тропосферная концентрация, мг/кг (ppm)	Глобальный потенциал потепления на перспективу, годы	Время жизни в атмосфере, годы	Увеличение радиационной нагрузки, Вт/м ²
Оксид углерода (CO ₂)	~ 280	399,5	1	~100...300	1,94
Метан (CH ₄)	722	1,834	28	12,4	0,50
Оксид азота (NO ₂)	270	0,328	265	121	0,20
Тропосферный озон (O ₃)	237	0,337	Не оценивалось	Часы–дни	0,40
Гексафторид серы (FS ₆)	0	8,6	23,500	3200	0,0049

Простые вычисления, основанные на использовании закона Стефана-Больцмана, показывают, что при отсутствии парниковых газов в атмосфере средняя температура поверхности Земли была бы минус 18 °С. Фактически в настоящее время средняя температура плюс 15 °С. Разница в 33 °С показывает наличие и полезность парникового эффекта.

Однако то, что в небольших дозах является панацеей, при их превышении действует как зло. Целесообразно оценить влияние отдельных факторов на всемирное потепление для выбора правильных ориентиров поведения и исключения непредсказуемых последствий для экономик целых стран.

Цель настоящего исследования – оценка глобальных и локальных факторов, которые вызывают изменения эмиссии парниковых газов и изменение температуры околоземного пространства.

Основной материал исследования. Периодические изменения климата зависят от количества теплоты, получаемой от Солнца. Интересно отметить, что несмотря на то, что при повышении и понижении активности Солнца, оно выделяет практически одинаковое количество теплоты, повышение солнечной активности приводит к потеплению, а понижение – к похолоданию. Объяснение этому дал в 1991 г. датский ученый Фрис-Кристенсен. При спокойном Солнце космические лучи проникают глубоко в атмосферу и ионизируют капельки воды, что способствует образованию облаков и интенсифицирует отражение солнечных лучей. При активном Солнце заряженные потоки его частиц имеют высокую активность, образуется «солнечный ветер», который отклоняет космические лучи. В результате уменьшается облачность и происходит потепление [5].

Обычно климатологи приводят данные о температуре и концентрации диоксида углерода, полученные из кернов льда на станции «Восток» в Антарктиде. Изменение объемной доли диоксида углерода составляет 3,42 % на 1 °С. По взаимодополняющим данным 100 % изменения концентрации CO₂ обеспечено при повышении температуры воды на 21, 8 °С. Последние данные указывают на очень высокую чувствительность системы H₂O – CO₂ к изменению температуры. Обработка данных, полученных на арктической станции «Восток», показала высокую степень корреляции ($R^2 = 0,98$) между приростом температуры Δt и равновесной концентрацией диоксида углерода CO₂ в воздухе. Указанное равновесие описывает следующее уравнение (мл/м³ или ppm):

$$\text{CO}_2 = \exp[5,104(\Delta t + 10)^{0,041}].$$

Прогноз изменений в окружающей среде показывает, что даже после стабилизации концентрации диоксида углерода в атмосфере запущенный механизм потепления будет «раскручивать» нежелательные последствия в окружающей среде (рис. 1).

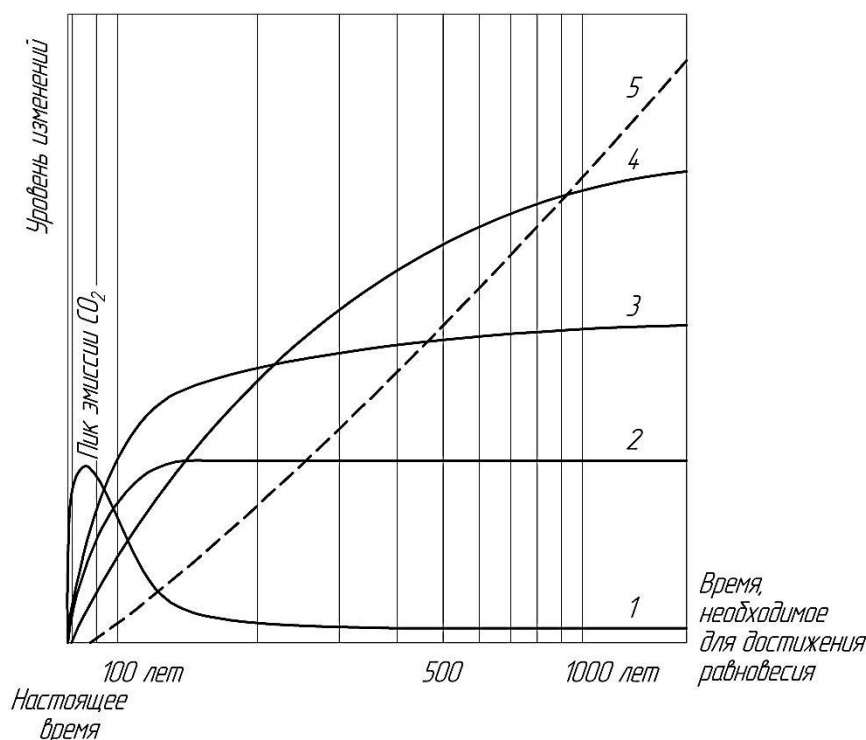


Рис. 1. Прогноз изменений в окружающей среде:

1 – эмиссия CO_2 ; 2 – стабилизация CO_2 (в течение 100...300 лет); 3 – стабилизация температуры (в течение нескольких столетий); 4 – повышение уровня моря вследствие теплового расширения (от сотен до 1000 лет); 5 – повышение уровня моря вследствие таяния льда (несколько тысячелетий)

Большинство эффектов, изменений в природных системах не вызывают пропорциональные изменения климата. Так, например, эффект альbedo ледяного покрова. При увеличении температуры лед и снег начинают таять вблизи полюсов. Происходит замена среды с высоким альbedo (80...90 %) на среду с меньшей отражающей способностью (воду ~ 70 %) или землю (~ 35 %). Возникает известный эффект появления пятен асфальта на тротуаре или нанесения на тротуар, покрытый снегом, частичек золы. Уменьшение отражения солнечной радиации приводит к увеличению количества теплоты, поглощаемой поверхностью Земли. Меньшее количество теплоты вызывает большее количество, поглощаемое поверхностью. Более отдаленной и более опасной перспективой является нарушение режима теплового переноса от экватора к полюсам, снижение КПД так называемых тепловых машин погоды.

Следующий эффект – действие паров воды. Более нагретый воздух содержит больше паров воды, что увеличивает давление насыщенных ее паров. Это увеличивает количество облаков и их альbedo, однако создает также дополнительный парниковый эффект за счет задержки инфракрасного излучения от поверхности Земли. При снижении температуры атмосферы с 15 до 1 °C равновесное давление паров воды уменьшается на 6 %, а при увеличении температуры на 1 °C указанное давление увеличится на 7 %. Эта

неравновесность является основанием того, что климатологи полагают: пары воды являются положительной обратной связью для поддержки температуры (кроме известного эффекта переноса теплоты). Если каким-либо образом удалить пары воды из атмосферы, их масса восстановится на протяжении нескольких недель [6].

Исследования, выполненные спутниками, и фотографии, сделанные космонавтами, показывают, что около 67 % поверхности планеты постоянно покрыто облаками. Таким образом, высокое альbedo поверхности облаков существенно снижает солнечную радиацию. Ионизация капелек влаги, по Фрис-Кристенсену, позволяет регулировать облачность и соответственно количество теплоты, приходящей на Землю [7]. Таким образом, эффективным методом регулирования климата является влияние на облачность в околоземном пространстве.

Диоксид углерода растворяется в морской и океанской воде в соответствии с законом Генри в основном вблизи полюсов и удаляется из воды вблизи экватора. Ежегодно примерно 88 млрд тонн углерода освобождается с поверхности океана и 90 млрд тонн поглощается. Таким образом, общий баланс по диоксиду углерода оценивается как поглощение 2 млрд тонн CO_2 ежегодно.

Однако следует учесть временной интервал между поглощением и выделением CO_2 . В настоящее время в широтах, близких к экватору, выделяется тот CO_2 , который был поглощен несколько сот лет назад в высоких широтах (на полюсах). Изменение потоков диоксида углерода на планете иллюстрирует рис. 2 [8, 9].

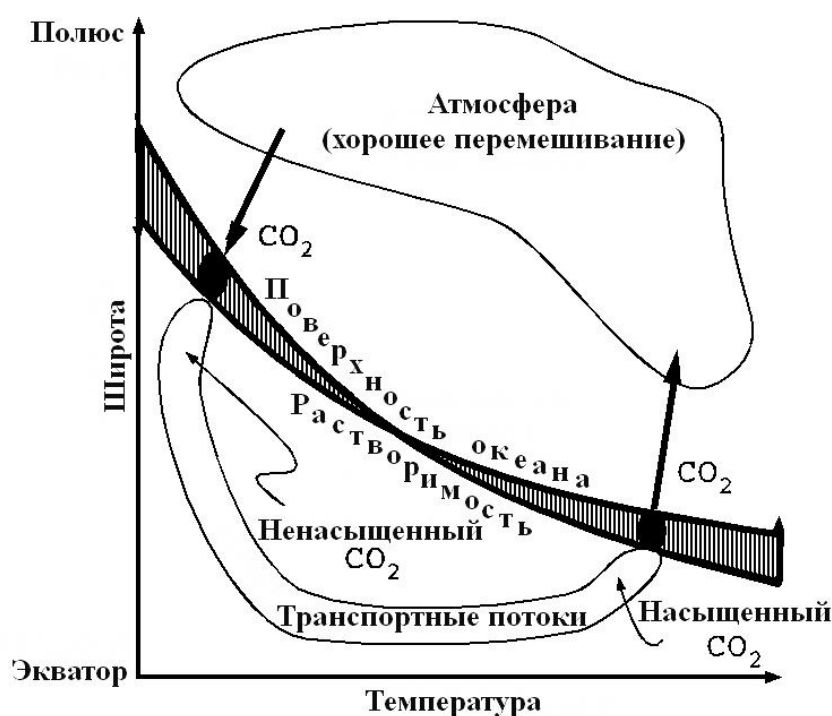


Рис. 2. Потоки диоксида углерода

Действие отдельных газов в проявлении парникового эффекта не отличается аддитивностью. Вклад отдельных веществ может быть оценен по компьютерной модели изменения абсорбции инфракрасных лучей при предположении, что один из газов удален, а другие при этом остались в неизменном состоянии (табл. 2).

Таблица 2

Вклад отдельных составляющих в парниковый эффект [7]

Компоненты возможного удаления	Доля снижения абсорбции инфракрасного излучения, %	Удаленная составляющая	Доля снижения абсорбции инфракрасного излучения, %
Без удаления компонентов	0	Озон	3
Пары воды	36	Все, кроме озона	93
Все, кроме паров воды	34	Другие парниковые газы	2
CO ₂	9	Облака	16
Все, за исключением CO ₂	74	Все, за исключением паров воды, + облака	15
Пары воды и CO ₂	53	Все	100

Изменение влияния отдельных газов можно оценить следующим образом. Если удалить весь CO₂ из атмосферы, адсорбция инфракрасного излучения уменьшится на 9 %, а если удалить все парниковые газы за исключением CO₂, то инфракрасное излучение уменьшится на 74 %. Таким образом, эффект присутствия CO₂ может быть от 9 до 26 %. При оценке влияния паров воды получаем два значения: 36 и 66 %. Таким образом, влияние паров воды на парниковый эффект более ощутимо: от $36/9 = 4$ до $66/26 = 2,5$ раза. А если оценивать и облачность, то это влияние еще более усиливается.

Существует мнение, что использование генерации электрической энергии на атомных электростанциях уменьшает эмиссию парниковых газов. Однако, учитывая более низкий КПД атомных энергоблоков и то, что, в конечном счете, эмиссия паров воды связана с отбором теплоты в конденсаторах турбин и его рассеиванием в виде паров из градирен, атомные энергоблоки являются большими генераторами парниковых газов по сравнению с угольными.

Ежегодно на планете сжигается примерно 9 млрд тонн ископаемого топлива. В результате окисления углерода в атмосферу поступает примерно 24,75 млрд тонн диоксида углерода (CO₂). Кроме этого, в результате горения лесных массивов в атмосферу поступает еще 1,7 млрд тонн CO₂. Концентрация диоксида углерода в начале XX века составила 0,029 %, а уже к концу

этого века она повысилась до 0,035 % и в настоящее время составляет примерно 0,04 %. На рис. 2 показано изменение потоков CO_2 за последние годы по данным результатов измерений, выполненных американской обсерваторией Мауна Лоа [8, 9].

Прирост концентрации CO_2 – ΔCO_2 в зависимости от времени $\Delta\tau$, начиная с 1960 г., описывает уравнение

$$\Delta\text{CO}_2 = 0,325 \Delta\tau^{1,38},$$

а уровень концентрации CO_2

$$\text{CO}_2 = 317 + 0,325 (\tau - 1960)^{1,38}.$$

Если скорость изменения концентрации CO_2 сохраняется, можно ожидать повышения концентрации CO_2 в 2050 г. до уровня 479 ppm, а до конца нынешнего века до 615 ppm. Из приведенных данных видно, что повышение концентрации CO_2 следует за повышением температуры, а не наоборот.

Изменение равновесной доли диоксида углерода, %, в зависимости от температуры воды описывает с высокой степенью корреляции ($R^2 > 0,99$) зависимость (рис. 3)

$$\text{CO}_2 = 3,5 \cdot 10^{-5} \exp(2,49 \cdot 10^3 T^{-1}).$$

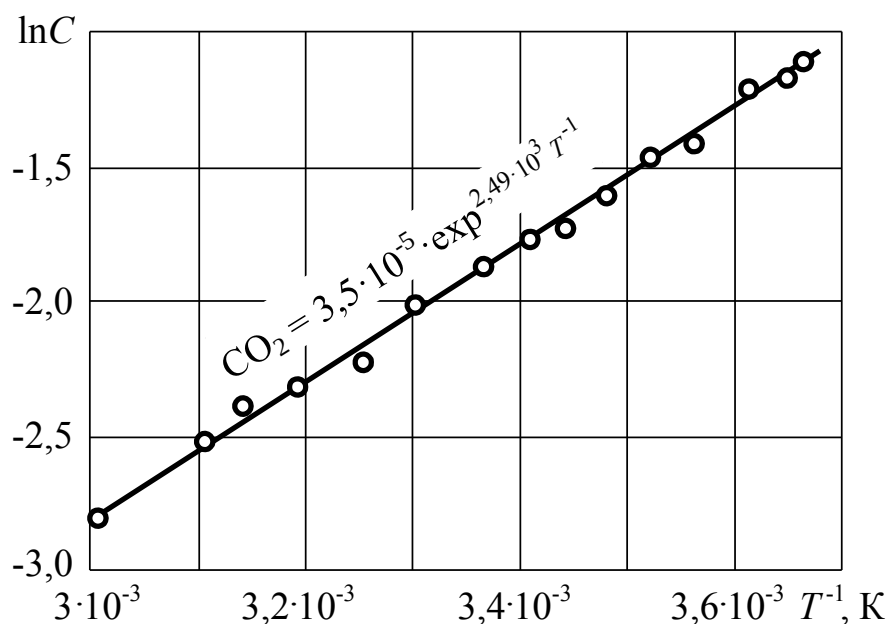


Рис. 3. Изменение равновесной доли CO_2 в растворе в зависимости от абсолютной температуры

Повышение температуры приводит также к потенциальному «закислению» океанской воды и снижению ее поглотительной способности по отношению к CO_2 . Несмотря на то, что океанская вода представляет собой буферную систему, с течением времени произойдет исчерпание ее емкости поглощения по диоксиду углерода за счет снижения щелочности и повышения активности водородных ионов. Это приведет к закислению воды и исчезновению некоторых видов гидробионтов. Произойдет перераспределение CO_2 между океаном и атмосферой. В настоящее время количество CO_2 в океане примерно в 500 раз больше, чем в атмосфере. Эта разница будет постепенно уменьшаться.

Постепенное закисление океанской воды подтверждено биологами из Чикагского университета. На основе анализа раковин мидий, живших 1000...2400 лет назад и собранных в 1960...1970 гг., обнаружено, что 1000 лет назад раковины были на 27 % толще. После 70-х годов прошлого века истончение раковин идет все быстрее. Данные подтверждены британскими учеными, которые провели исследование при выращивании мидий в четырех цистернах с повышающимся уровнем кислотности среды. При повышении кислотности снижается уровень гидрокарбонатов. При снижении последних внешний слой раковин мидий, состоящий из кальцита, более жесткий и ломкий, а внутренний слой, состоящий из арагонита, становится более мягким.

Повышение кислотности приводит к уменьшению поглощения диоксида углерода и снижению вместимости океанской воды по диоксиду углерода. Соотношение количества диоксида углерода между океанской водой и атмосферой близко к 500 и быстро снижается в сторону увеличения концентрации диоксида углерода в атмосфере.

Для определения влияния щелочности и pH воды на степень поглощения CO_2 обработаны данные французских исследователей [9, 10].

Равновесная концентрация CO_2 и поступление его в атмосферу зависят от pH воды, являющегося функцией активности водородных ионов и щелочности воды. Представляла интерес количественная оценка влияния указанных факторов. На рис. 4 приведены сведения о влиянии pH воды на равновесную концентрацию CO_2 , полученные в результате обработки экспериментальных данных.

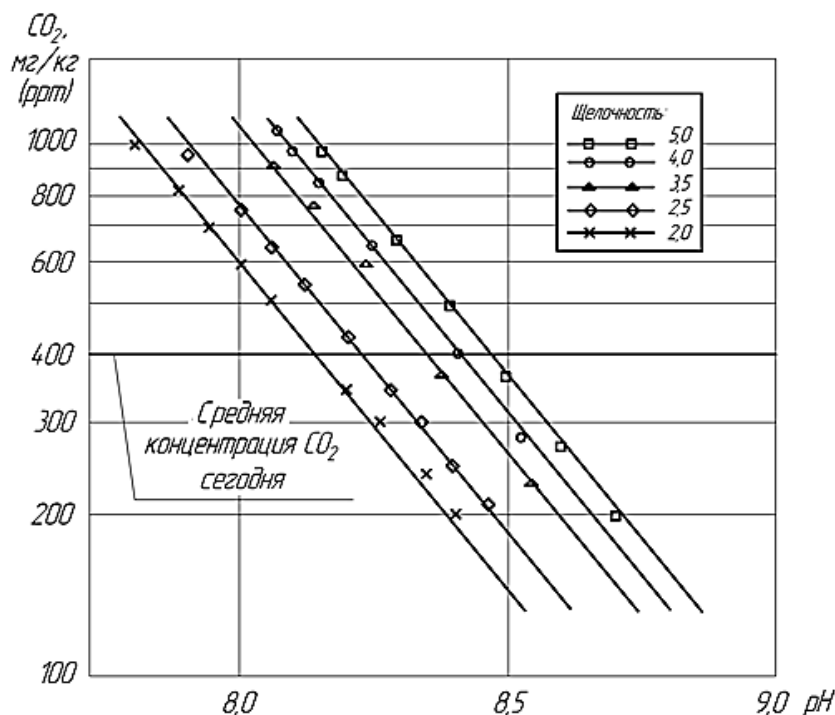


Рис. 4. Зависимость равновесной концентрации диоксида углерода при изменении щелочности воды и pH

Зависимость концентрации диоксида углерода от pH и щелочности воды

$$\text{щ} = 5,0: \text{CO}_2 = 1,44 \cdot 10^{13} \exp(-2,87 \text{ pH}) \text{ моль/дм}^3; (R^2 = 0,96);$$

$$\text{щ} = 4,0: \text{CO}_2 = 1,19 \cdot 10^{13} \exp(-2,87 \text{ pH}) \text{ моль/дм}^3; (R^2 = 0,9673);$$

$$\text{щ} = 3,5: \text{CO}_2 = 1,016 \cdot 10^{13} \exp(-2,87 \text{ pH}) \text{ моль/дм}^3; (R^2 = 0,9645);$$

$$\text{щ} = 2,5: \text{CO}_2 = 7,25 \cdot 10^{12} \exp(-2,87 \text{ pH}) \text{ моль/дм}^3; (R^2 = 0,97);$$

$$\text{щ} = 2,0: \text{CO}_2 = 5,86 \cdot 10^{12} \exp(-2,87 \text{ pH}) \text{ моль/дм}^3; (R^2 = 0,97).$$

Зависимость равновесной концентрации CO_2 от pH и щелочности воды описывается уравнением, полученным при обработке данных [9, 10].

$$\text{CO}_2 = 2,91 \cdot 10^{12} \text{ щ} \exp(-2,7 \text{ pH});$$

$$\text{CO}_2 = 2,91 \cdot 10^{12} \text{ щ} a_{\text{H}}^{1,25}.$$

Из приведенных формул следует, что эмиссия CO_2 зависит не только от антропогенной деятельности, но и от природных факторов: температуры

околоземного пространства и температуры, pH и щелочности океанской воды. Снижение щелочности воды приведёт к нарушению работы теплового насоса переноса диоксида углерода, повышению его концентрации в атмосфере и усилению парникового эффекта.

Выводы

1. Анализ кернов льда в Антарктиде показывает, что климат на Земле изменяется с периодичностью примерно 100 тыс. лет. При этом влияние антропогенных факторов на изменение климата с каждым годом увеличивается.

2. Основным источником поступления диоксида углерода в атмосферу является океан. Повышения концентрации диоксида углерода следуют за циклами изменения температуры океанской воды.

3. Анализ изменения концентрации диоксида углерода за последние 50 лет показывает, что к 2050 г. концентрация диоксида углерода повысится до 479 ppm, а до конца нынешнего века – до 615 ppm.

4. Повышение температуры приведет к постепенному снижению гидрокарбонатной щелочности воды и исчерпанию запасов диоксида углерода в океане. Это вызовет постепенное снижение концентрации диоксида углерода в атмосфере, уменьшение околоземной температуры и значительное изменение функционирования биологических систем.

Список литературы / References

1. Farley, J.W. The scientific case for modern anthropogenic global warming. Monthly Review, 2008, vol. 60, no. 3.

2. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.). IPCC (Intergovernmental panel on climate change), 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group 1 to the Fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. DOI: 10.1017/CBO9781107415324. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WGIARS5_TS_FINAL.pdf (accessed 26.09.2018).

3. King, M.D., Platnick, S., Menzel, W.P., Ackerman, S.A., Hubanks, P.A. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites, IEEE transaction on geosciences and remote sensing, 2013, vol. 51, pp. 3826 – 3852.

4. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, M., Bender, J., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M.,

Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pepin L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, vol. 399, pp. 429 – 436. DOI: 10.1038/20859.

5. Bollen, J., Hers, S., van der Zwaan, B. An integrated assessment of climate change air pollution, and energy security policy. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, pp. 4021 – 4030.

6. Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettemaier, D.P. Potential impact of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, vol. 438 (7066), pp. 303 – 309. DOI: 10.1038/nature04141.

7. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.). IPCC (Intergovernmental panel on climate change), 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group 1 to the Fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. (ISBN 978 0521 88009-1 Hardback; 978 0521 70596-7 Paperback). Available at: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-assessment-3> (accessed 26.09.2018).

8. Мировой центр данных по парниковым газам, Японское метеорологическое агентство, Токио. Веб-сайт: <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg>.

Mirovoy tsentr dannykh po parnikovym gazam, Yaponskoye meteorologicheskoye agentstvo, Tokio [The World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG), the Japan Meteorological Agency, Tokyo]. Available at: <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg>.

9. Forest, C.E., Stone, P.H., Sokolov, A.P., Allen, M.R., Webster, M.D., Quantifying uncertainties in climate system properties with the use of recent climate observation. *Science*, 2002, 295(5552), pp. 113 – 117. DOI: 10.1126/science.1064419.

10. Jansen, J.C., Arkel, W.G.v., Boots, M.G., Designing indicators of long-term energy supply security. Amsterdam: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2004. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2004, p. 35.

Sergei Pavlovich Vysotsky, Dr. Sci. (Tech.), head of chair; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

The State Educational Institution of Higher Occupational Education "The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture"

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone: +38 071-391-35-97

EXPECTED OR UNEXPECTED CHANGES OF CLIMATE

Purpose. Estimate of global and local factors that influence on the change of greenhouse gases emission and the attendant change of a temperature of the circumterrestrial space.

Methods. Determination of the destruction degree of hydrocarbonates with generation of carbon dioxide depending on the temperature and alkalinity of water, and analysis of investigations of foreign authors concerning the influence of the greenhouse gases on the climate.

Results. The analysis of the change of climate on the surface of the Earth has been adduced, and the influence of water vapor and carbon dioxide on the greenhouse effect has been shown. On the ground of obtained formulae the prognosis of the change of a carbon dioxide concentration in the atmosphere has been adduced. The permanent increase of the circumterrestrial space temperature will result in the gradual decrease of the hydrocarbonate alkalinity of the ocean water and exhaustion of reserves of the bound carbon in the ocean. This provokes the nonreversible change of the functioning of biological systems.

Scientific novelty. Analysis of causes and consequences of the greenhouse gases concentration change and influence of the certain components of the gaseous medium on the effect of temperature increase.

Practical value. Estimate of the influence of various gases as well as methods of energy generation on the greenhouse effect. Choice of the climatic cataclysms ways decrease.

Key words: *climate; carbon dioxide; greenhouse effect; atmosphere; Earth.*

УДК 614.894.7:001.891.572

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

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-03;

Андрей Петрович Кирьян, ст. преподаватель; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru;

Олег Эдуардович Толкачев, канд. техн. наук, завкафедрой; e-mail: oleg-tolk@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел. (+38 062) 303-27-01

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПАТРОНА РЕСПИРАТОРА

Цель. Увеличение ресурса защитного действия дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом.

Методика. Математическое моделирование процесса теплопереноса при движении воздушной смеси через регенеративный патрон с радиальным направлением и расположением кислородсодержащего продукта в сегментах.

Результаты. Подтверждена возможность предотвращения «спекания» кислородсодержащего вещества и увеличения времени защитного действия регенеративного патрона аппарата с химически связанным кислородом. Разработаны технические решения и создана новая конструкция регенеративного патрона, в которой процессы теплопереноса адекватно описывает предлагаемая математическая модель. Это, по предварительной оценке, позволит повысить ресурс защитного действия респиратора до 25 %.

Научная новизна. Впервые предложена математическая модель теплообменных процессов в регенеративном патроне с радиальным направлением движения воздушной смеси. Эта модель учитывает параметры элементарного объема кислородсодержащего продукта в секторе, что наиболее достоверно описывает процесс теплопереноса при прохождении воздушного потока через слой кислородсодержащего вещества.

Практическая значимость. Изменение направления движения газовой смеси от большего диаметра регенеративного патрона к меньшему позволит увеличить время защитного действия респираторов с химически связанным кислородом, предотвращая процесс «спекания» кислородсодержащего продукта.

Ключевые слова: *изолирующие аппараты; защита органов дыхания; респиратор; химически связанный кислород; регенерация; теплоперенос; время защитного действия; ресурс.*

Постановка проблемы. Перспективное направление в современном развитии газодымозащитной службы – применение аппаратов с химически связанным кислородом. При выполнении тяжелых работ, а также работ при высоких температурах респираторы с химически связанным кислородом имеют существенные преимущества перед респираторами со сжатым кислородом и их применение обеспечивает долговременную защиту органов дыхания спасателей. Однако в конце времени защитного действия этих аппаратов использован ещё не весь их регенеративный ресурс. Разработчики ведут поиск

новых технических решений проблемы повышения эффективности использования кислородсодержащего продукта.

Анализ последних исследований. Существующие математические модели рассматривают процессы тепломассопереноса в прямоточных патронах, в которых газовоздушная смесь движется в одном направлении вдоль оси патрона. Эти математические модели имеют особенности, которые не позволяют применять их при описании теплообменных процессов в регенеративном патроне с радиальным движением воздушного потока [1 – 7].

Материалы и результаты исследований. Для возможного увеличения использования регенеративного ресурса патрона разработана математическая модель теплообменных процессов в регенеративном патроне с радиальным направлением движения воздушного потока, который содержит те же элементы, что и прямоточный. Однако в данной модели рассмотрено прохождение потока выдыхаемого воздуха в регенеративном патроне от его большего диаметра к меньшему и расположение кислородсодержащего продукта в сегментах.

При выводе дифференциального уравнения теплопереноса использована методика [6]. В рассматриваемой среде выделяют элементарный объем с геометрическими характеристиками Δx , Δy , Δz , $\Delta \alpha$ (см. рисунок).

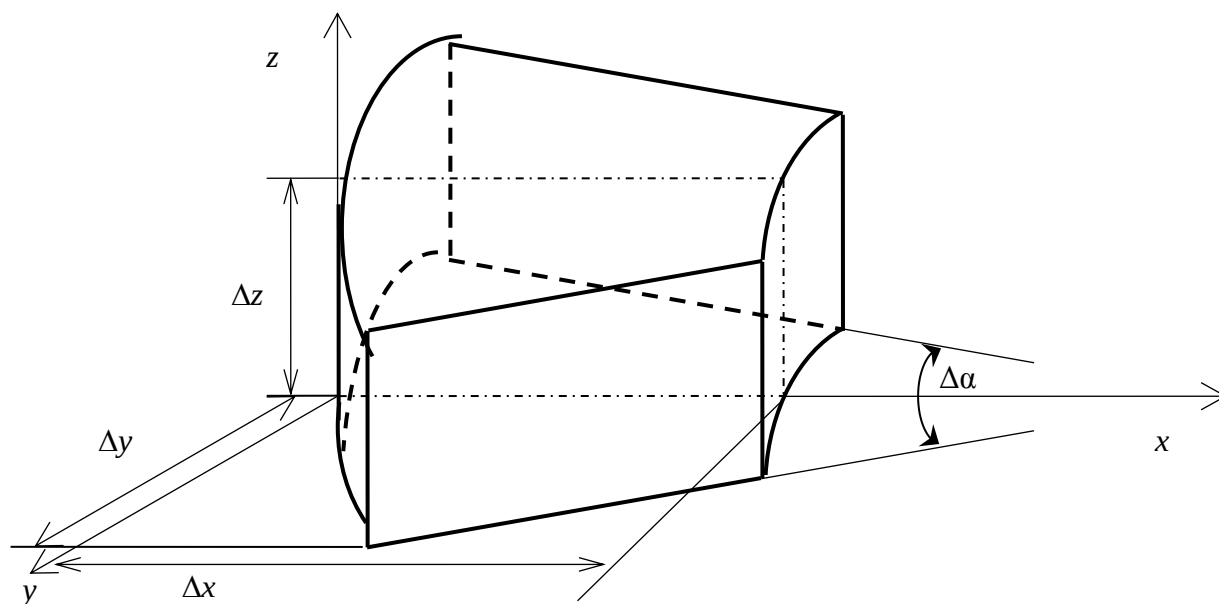


Схема элементарного объема кислородсодержащего продукта регенеративного патрона в сегменте

Через левую грань выделенного объема площадью $S_l = (R_h - x)\Delta\alpha\Delta z$ за время Δt проходит теплоты

$$Q_x = Q_x^{III} + Q_x^{\Gamma} + Q_x^K, \quad (1)$$

где $Q_x^{\text{III}}, Q_x^{\Gamma}$ – количество теплоты, проходящей через левую грань за счет теплопроводности частиц кислородсодержащего продукта и пор, заполненных газом соответственно, Дж;

Q_x^K – количество теплоты, проходящей через левую грань за счет конвективного движения потока газа, Дж.

Количество теплоты, проходящей через частицы кислородсодержащего продукта за счет теплопроводности за время Δt , с, определяют по формуле

$$Q_x^{\text{III}} = q_x^{\text{III}}(R_n - x)\Delta\alpha\Delta z f^{\text{III}}\Delta\tau, \quad (2)$$

где q_x^{III} – тепловой поток, втекающий через левую грань через частицы кислородсодержащего продукта, расположенные на поверхности левой грани, Вт;

f^{III} – доля площади левой грани, занимаемая частицами кислородсодержащего продукта.

Количество теплоты, проходящей через левую грань за счет теплопроводности газа, заполняющего поры между частицами кислородсодержащего продукта, равно

$$Q_x^{\Gamma} = q_x^{\Gamma}(R_n - x)\Delta\alpha\Delta z f^{\Gamma}\Delta\tau, \quad (3)$$

где q_x^{Γ} – тепловой поток, втекающий через левую грань сквозь поры (заполненные газом), которые образуют частицы кислородсодержащего продукта на поверхности левой грани, Вт;

f^{Γ} – доля площади левой грани, занимаемая порами.

Количество теплоты, проходящей через левую грань за счет движения потока газа, равно

$$Q_x^K = w_x c^{\Gamma} \rho^{\Gamma} T_x^{\Gamma} (R_n - x) \Delta\alpha\Delta z f^{\Gamma} \Delta\tau, \quad (4)$$

где w_x – локальная скорость потока газа в порах кислородсодержащего продукта, м/с;

c^{Γ} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);

ρ^{Γ} – плотность газа, кг/м³;

T^{Γ} – температура газа на левой грани, К.

Аналогично определяем количество теплоты $Q_{x+\Delta x}$, выходящей через правую грань с площадью $S_n = \left[R_n - (x + \Delta x) \right] \Delta\alpha\Delta z$:

$$Q_{x+\Delta x} = Q_{x+\Delta x}^{\text{III}} + Q_{x+\Delta x}^{\Gamma} + Q_{x+\Delta x}^K \quad (5)$$

или

$$Q_{x+\Delta x} = (q_{x+\Delta x}^u f^u + q_{x+\Delta x}^r f^r + w_x c^r \rho^r T_{x+\Delta x}^r f^r) [R_H - (x + \Delta x)] \Delta \alpha \Delta z \Delta \tau.$$

Количество теплоты, выделяемой при химической реакции регенерации, равно

$$Q_V = W(x, \alpha, z, \tau) \Delta x (R_H - x) \Delta \alpha \Delta z (1 - \varepsilon) \Delta \tau, \quad (6)$$

где $W(x, \alpha, z, \tau)$ – объемная мощность внутренних источников теплоты, действующих в единице объема частиц кислородсодержащего продукта, Вт/м³;

ε – порозность слоя кислородсодержащего продукта;

$$\varepsilon = \left[(R_H - x) \Delta x \Delta \alpha \Delta z - V^u \right] / \left[(R_H - x) \Delta x \Delta \alpha \Delta z \right], \quad (7)$$

V^u – элементарный объем, занимаемый частицами кислородсодержащего продукта, м³.

Таким образом, в элементарном объеме аккумулируется количество теплоты, равное

$$\begin{aligned} Q_x - Q_{x+\Delta x} + Q_V = & \left\{ \left[(q_x^u - q_{x+\Delta x}^u)(R_H - x) + q_{x+\Delta x}^u \Delta x \right] f^u + \right. \\ & + \left[(q_x^r - q_{x+\Delta x}^r)(R_H - x) + q_{x+\Delta x}^r \Delta x \right] f^r + w_x c^r \rho^r (T_x^r - T_{x+\Delta x}^r)(R_H - x) + \\ & \left. + T_{x+\Delta x}^r \Delta x f^r + W(x, \alpha, z, \tau)(R_H - x) \Delta x (1 - \varepsilon) \right\} \Delta \alpha \Delta z \Delta \tau. \end{aligned} \quad (8)$$

Разложим функции $q_{x+\Delta x}^u$, $q_{x+\Delta x}^r$, $T_{x+\Delta x}^r$ в ряды Тейлора:

$$q_{x+\Delta x}^u = q_x^u + \frac{\partial q_x^u}{\partial x} dx \dots; \quad q_{x+\Delta x}^r = q_x^r + \frac{\partial q_x^r}{\partial x} dx \dots; \quad T_{x+\Delta x}^r = T_x^r + \frac{\partial T_x^r}{\partial x} dx \dots$$

Перейдем от конечных приращений к дифференциалам $\Delta \rightarrow d$. С учетом разложения в ряд Тейлора запишем выражение (8) в следующем виде:

$$Q_x - Q_{x+\Delta x} + Q_V = -\frac{\partial q_x^u}{\partial x} f^u(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau - \frac{\partial q_x^r}{\partial x} f^r(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau - \\ - w_x c^r \rho^r \frac{\partial T_x^r}{\partial x} f^r(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau + W(x, \alpha, z, \tau)(R_h - x) dx d\alpha dz (1 - \varepsilon) d\tau.$$

Согласно закону теплопроводности Фурье $q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$. С учетом этого последнее выражение можно записать в виде

$$Q_x - Q_{x+\Delta x} + Q_V = \lambda^u \frac{\partial^2 T_x^u}{\partial x^2} f^u(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau + \lambda^r \frac{\partial^2 T_x^r}{\partial x^2} f^r(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau - \\ - w_x c^r \rho^r \frac{\partial T_x^r}{\partial x} f^r(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau + W(x, \alpha, z, \tau)(R_h - x) dx d\alpha dz (1 - \varepsilon) d\tau. \quad (9)$$

Количество теплоты, аккумулирующей в элементарном объеме, можно определить как сумму теплоты, накопленной частицами кислородсодержащего продукта и газом в порах между ними, по формуле

$$Q^u + Q^r = c^u \rho^u (R_h - x) dx d\alpha dz (1 - \varepsilon) \frac{\partial T^u}{\partial \tau} + c^r \rho^r (R_h - x) dx d\alpha dz \varepsilon \frac{\partial T^r}{\partial \tau}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение теплового баланса для элементарного объема можно записать в следующем виде:

$$\lambda^u \frac{\partial^2 T_x^u}{\partial x^2} f^u(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau + \lambda^r \frac{\partial^2 T_x^r}{\partial x^2} f^r(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau - \\ - w_x c^r \rho^r \frac{\partial T_x^r}{\partial x} (1 - f^u)(R_h - x) dx d\alpha dz d\tau + W(x, \alpha, z, \tau)(R_h - x) dx d\alpha dz (1 - \varepsilon) d\tau = \\ = c^u \rho^u (R_h - x) dx d\alpha dz (1 - \varepsilon) \frac{\partial T^u}{\partial \tau} d\tau + c^r \rho^r (R_h - x) dx d\alpha dz \varepsilon \frac{\partial T^r}{\partial \tau} d\tau.$$

Сократив последнее выражение на $dx d\alpha dz d\tau (R_h - x)$ и учитывая, что $f^r = (1 - f^u)$, получим

$$\lambda^u \frac{\partial^2 T_x^u}{\partial x^2} f^u + \lambda^r \frac{\partial^2 T_x^r}{\partial x^2} (1 - f^u) - w_x c^r \rho^r \frac{\partial T_x^r}{\partial x} (1 - f^u) + W(x, \alpha, z, \tau)(1 - \varepsilon) = \\ = c^u \rho^u (1 - \varepsilon) \frac{\partial T^u}{\partial \tau} + c^r \rho^r \varepsilon \frac{\partial T^r}{\partial \tau}. \quad (11)$$

Так как частицы кислородсодержащего продукта и поры, заполненные газом, имеют небольшие размеры, то можно допустить, что передача теплоты от кислородсодержащего продукта к газу (и обратно) осуществляется практически мгновенно, то есть $T^r \approx T^u = T$. Кроме того, можно допустить, что $f^r \approx \varepsilon$. С учетом этого получим следующее дифференциальное уравнение теплопереноса:

$$[\lambda^u(1-\varepsilon) + \lambda^r\varepsilon] \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c^r \rho^r \varepsilon w_x \frac{\partial T}{\partial x} + W(x, \alpha, z, \tau)(1-\varepsilon) = [c^u \rho^u(1-\varepsilon) + c^r \rho^r \varepsilon] \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (12)$$

Обозначим: $c_3 \rho_3 = [c^u \rho^u(1-\varepsilon) + c^r \rho^r \varepsilon]$ – эффективная объемная теплоемкость слоя кислородсодержащего продукта, поры которого заполнены газом; $\lambda_3 = [\lambda^u(1-\varepsilon) + \lambda^r \varepsilon]$ – эффективная теплопроводность пористого слоя кислородсодержащего продукта; $q_v = W(x, \alpha, z, \tau)(1-\varepsilon)$ – объемная мощность внутренних источников теплоты, отнесенная к единице объема насыпного слоя кислородсодержащего продукта. Так как локальную скорость потока газа w_x в порах кислородсодержащего продукта на практике измерить невозможно, то предложена [6] средняя скорость $\overline{w_x}$, рассчитываемая по известному расходу газа G через цилиндрический патрон и площади сечения $S = \pi R_0^2$ патрона по формуле $\overline{w_x} = G/S$. С учетом известных значений средней скорости $\overline{w_x}$ и порозности насыпного слоя кислородсодержащего продукта значение локальной скорости газа w_x между частицами кислородсодержащего продукта определяют по формуле $w_x = \overline{w_x} / \varepsilon = G/(\varepsilon S)$.

Окончательно дифференциальное уравнение теплопереноса можно записать в виде

$$\lambda_3 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c^r \rho^r \overline{w_x} \frac{\partial T}{\partial x} + q_v(x, \alpha, z, \tau) = c_3 \rho_3 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (13)$$

при $0 < x \leq (R_n - R_e)$; $0 < \alpha \leq 2\pi$; $0 < z \leq H$; $0 < \tau \leq \tau_{\text{раб}}$.

Таким образом, полученная математическая модель, в отличие от модели, описанной в работе [1], учитывает параметры элементарного объема кислородсодержащего вещества с радиальным направлением движения воздушного потока в секторе, что наиболее достоверно описывает процесс теплопереноса при прохождении воздушного потока через слой кислородсодержащего вещества. Направление движения воздушного потока от большего диаметра регенеративного патрона к меньшему позволяет

предотвращать процесс «спекания» продукта в регенеративном патроне, за счет чего увеличивается время защитного действия дыхательного аппарата.

Выводы. Рассмотренная математическая модель подтверждает возможность предотвращения «спекания» кислородсодержащего вещества и увеличения времени защитного действия регенеративного патрона аппарата с химически связанным кислородом.

Список литературы / References

1. Майстренко, А.В. Моделирование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде / А.В. Майстренко, Н.В. Майстренко, О.И. Ерохин // Научные ведомости БелГУ. Серия «История. Политология. Экономика. Информатика». – 2014. – № 1(172), вып. 29/1. – С. 81 – 87.

Maystrenko, A.V., Maystrenko, N.V., Yerokhin, O.I. *Modelirovaniye izoliruyushchikh dykhatel'nykh apparatov na khimicheski svyazannom kislorode* [Modeling the self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type]. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya "Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika"* [Scientific bulletin of the BelGU. Series "History. Political science. Economics. Informatics"]. 2014, no. 1(172), issue 29/1, pp. 81 – 87.

2. Иващук, О.А. Модели интеллектуального анализа данных в информационных системах экологической безопасности / О.А. Иващук, О.Д. Иващук // Научные ведомости БелГУ. Серия «История. Политология. Экономика. Информатика». – 2013. – № 15(158), вып. 27/1. – С. 163 – 168.

Ivashchuk, O.A., Ivashchuk, O.D. *Modeli intellektual'nogo analiza dannykh v informatsionnykh sistemakh ekologicheskoy bezopasnosti* [Models of the intellectual analysis of data in ecological safety information systems]. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya "Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika"* [Scientific bulletin of the BelGU. Series "History. Political science. Economics. Informatics"]. 2013, no. 15(158), issue 27/1, pp. 163 – 168.

3. Гудков, С.В. Совершенствование методики испытания изолирующих дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом / С.В. Гудков, Д.С. Дворецкий, А.Ю. Хромов // Вестник ТГТУ. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 589 – 597.

Gudkov, S.V., Dvoretzkiy, D.S., Khromov, A.Yu. *Sovershenstvovaniye metodiki ispytaniya izoliruyushchikh dykhatel'nykh apparatov s khimicheski svyazannym kislorodom* [Improvement of the methods of testing the self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type]. *Vestnik TGTU – Bulletin of the TGTU*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 589 – 597.

4. Изолирующий дыхательный аппарат с изменяемой геометрией регенеративного патрона / И.А. Боярко, Н.Ц. Гатапова, Н.Ф. Гладышев, Р.В. Дорохов, Э.И. Симаненков, В.П. Таров // Вестник ТГТУ. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 641 – 647.

Boyarko, I.A., Gatapova, N.Ts., Gladyshev, N.F., Dorokhov, R.V., Simanenkov, E.I., Tarov, V.P. *Izoliruyushchiy dykhatel'nyy apparat s izmenyayemoy geometriyey regenerativnogo patrona* [A self-contained breathing apparatus with the changing geometry of a regenerative cartridge]. *Vestnik TGTU – Bulletin of the TGTU*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 641 – 647.

5. Третьяков, А.А. Повышение эффективности испытаний регенеративных патронов / А.А. Третьяков, М.А. Сяляхова, А.А. Картешкин // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1019 – 1023.

Tret'yakov, A.A., Salyakhova, M.A., Karteshkin, A.A. *Povysheniye effektivnosti ispytaniy regenerativnykh patronov* [Efficiency increase of testing the regenerative cartridges]. *Vestnik TGTU – Bulletin of the TGTU*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1019 – 1023.

6. Балабанов, П.В. Математическое моделирование теплопереноса в процессе хемосорбции / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев, А.В. Трофимов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 334 – 341.

Balabanov, P.V., Ponomaryov, S.V., Trofimov, A.V. *Matematicheskoye modelirovaniye teploperenosa v protsesse khemosorbtsii* [Mathematical modeling the heat transfer in the chemical absorption process]. *Vestnik TGTU – Bulletin of the TGTU*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 334 – 341.

7. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений. Кн. 1 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2006. – 204 с.

Ponomaryov, S.V., Mishchenko, S.V., Divin A.G. *Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty teplofizicheskikh izmereniy. Kn. 1* [Theoretical and practical aspects of thermal measurements. Book 1]. Tambov, Izd-vo TGTU Publ., 2006, 204 p.

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

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-03;

Andrey Petrovich Kir’yan, lecturer; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru;

Oleg Eduardovich Tolkachyev, Cand. Sci. (Tech.), head of subdepartment; e-mail: oleg-tolk@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Professional Education “The Civil Defence Academy” of the MChS DPR

283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rosy Luxemburg. Phone: (+38 062) 303-27-01

ESTIMATE OF POSSIBILITY OF DURATION INCREASE OF A BREATHING APPARATUS REGENERATIVE CARTRIDGE

Purpose. Increase in the duration resource of the breathing apparatus, chemical oxygen type.

Methods. Mathematical modeling of the heat transfer process by motion of the air mixture through the regenerative cartridge with the radial direction and arrangement of an oxygen-containing product in the segments.

Results. The possibility of prevention of the “sintering” of the oxygen-containing substance and duration increase of the regenerative cartridge of the breathing apparatus, chemical oxygen type, has been confirmed. Technical solutions have been worked out, and a new construction of the regenerative cartridge has been created in which the heat transfer processes are adequately described by the proposed mathematical model. According to the preliminary estimate this will allow increasing the duration resource of the breathing apparatus up to 25 percent.

Scientific novelty. The mathematical model of the heat exchange processes in the regenerative cartridge with the radial direction of the air mixture motion is proposed for the first time. This model takes into account parameters of the elementary volume of the oxygen-containing product in the sector what describes the heat transfer process by the motion of the air flow through the oxygen-containing substance layer most reliably.

Practical value. The change of the gas-air mixture motion direction from the larger diameter of the regenerative cartridge to the smaller one will permit to increase the duration of the breathing apparatus, chemical oxygen type, preventing the “sintering” process of the oxygen-containing product.

Key words: self-contained breathing apparatus; protection of breathing organs; breathing apparatus; chemical oxygen; regeneration; heat transfer; duration; resource.

УДК 622.822.22:622.411.33

Виктор Павлович Коптиков, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vkoptikov@vgasu.vrn.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84. Тел. +7 (473) 271-59-18;
Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Александр Александрович Всякий, ст. науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной
безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 338-78-81

ОХЛАЖДЕНИЕ УГЛЯ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ МЕТАНА

Цель. Анализ математических описаний истечения метана из разрушенного угля, разработка метода определения теплоты дросселирования из него метана.

Методика. Выбор и обоснование принятых описаний метановыделения из частиц угля и их охлаждения.

Результаты. Выполнен анализ исследований динамики истечения метана из частиц углей после отделения их от массива. Показано, что полученные эмпирические зависимости носят гиперболический характер с коэффициентами, различными для каждого угля и не имеющими обобщенных данных. Существующие теоретические зависимости пригодны для небольших промежутков времени. Предложена усовершенствованная теоретическая зависимость динамики выделения метана и остаточной концентрации его в углях по мере их дегазации с учетом физических свойств углей, в том числе характера пор, уменьшающихся в диаметре по мере проникновения процесса дегазации в глубь угля последовательно от макропор с диаметром $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м, затем пузырейского типа с диаметром $10^{-5} \dots 10^{-6}$ м, броуновского типа с диаметром $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м, кнудсеновского типа с диаметром $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м, и до фольмеровского типа с диаметром $10 \cdot 10^{-10} \dots 100 \cdot 10^{-10}$ м. Приведена методика вычисления теплоты дросселирования метана из углей.

Научная новизна. Предложена теоретическая модель истечения метана из частиц угля экспоненциального вида с показателями степени, зависящими от характера пор, участвующих в процессе дегазации.

Практическое значение. Полученные результаты применены для разработки метода определения теплоты дросселирования метана из угля, что будет использовано при расчете инкубационного периода его самовозгорания.

Ключевые слова: пористость; метановыделение; теплота дросселирования; газоемкость; инкубационный период.

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований. Исследованиями НИИГД «Респиратор» [1 – 2] установлено, что реакции окисления угля начинаются после окончания интенсивного выделения из его частиц метана. Время же интенсивного выделения метана зависит от газоносности пласта, значения коэффициента внутренней диффузии метана в углях, пористости, диаметра частиц, дробимости. В то же время, в период интенсивного выделения метана за счет эффекта дросселирования (понижение давления газа при протекании через суженный проходной канал) снижается температура угля и соответственно продолжительность времени инкубационного периода самовозгорания угля увеличивается.

Многочисленными исследованиями различных авторов установлено, что ископаемый уголь является мелкопористым трещиноватым сорбентом, способным поглощать значительные объемы газов, в том числе метан. Согласно современным представлениям, метан в угольных пластах находится в свободном состоянии, заполняя различного рода пустоты и трещины, а также в виде адсорбционного и абсорбционного газа. Поскольку угли обладают очень большой внутренней поверхностью (до 150...200 м²/г), наибольшее значение имеет адсорбционный газ. Сорбция метана каменными углями повышается по мере увеличения степени метаморфизма.

Степень метаморфизма и петрографический состав углей существенно влияют на газоносность, газопроницаемость и скорость газоотдачи. В метаморфическом ряду каменных углей и антрацитов максимальная природная метаноносность возрастает от 3 м³/т у длиннопламенных углей до 41 м³/т у полуантрацитов и низкометаморфизованных антрацитов. С дальнейшим ростом метаморфизма максимальная метаноносность снижается и в высокометаморфизованных антрацитах (А/13 – А/14) равна 0,01 м³/т. Остаточная метаностойкость (при давлении 0,1 МПа) изменяется от 1,7 м³/т у длиннопламенных углей до 12,1 м³/т у полуантрацитов и антрацитов.

Сорбционные и фильтрационные свойства углей определяются их структурой и распределением пор по размерам. Ряд исследователей считает, что в углях имеются открытые и замкнутые поры. Отмечается, что объем замкнутых пор зависит от петрографического состава и изменялся в диапазоне от 0 до 20 %. Меньше всего замкнутых пор содержится в витрине и больше всего в полуматовом зернистом угле, заключающем значительное количество мелких линз кларена.

Существует несколько классификаций пор в углях. С позиции настоящей работы наибольший интерес представляет классификация И.Л. Эттингера, в основу которой положены виды движения газа через поры в зависимости от их размеров (табл. 1).

Таблица 1

Классификация пор угля согласно исследованиям различных авторов

Параметр пор	Виды пор					
	молекулярные	микропоры	кнудсеновские	броуновские	пуазейлевские	макропоры
Диаметр d , м	$5 \cdot 10^{-10}$	$10^{-9} \dots 10^{-8}$	$10^{-8} \dots 10^{-7}$	$10^{-7} \dots 10^{-6}$	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$>10^{-5}$
Виды движения газов	Адсорбционно-объемные проникновения газа	Перенос газов за счет двухмерной поверхностной диффузии	Свободный побег молекул	Броуновское движение молекул в порах	Течение газа в порах описывается уравнением Пуазейя	Разнообразное по происхождению и форме

Окончание табл. 1

Параметр пор	Виды пор					
	молекулярные	микропоры	кнудсеновские	броуновские	пуазейлевские	макропоры
Доля пор в угле, %	20	20	15	10...15	10...15	>10
Возможная длительность дегазации	> 40 лет	1 год	1 месяц	1...6 сут	0,5 сут	1...3 ч

Цель исследования. Анализ существующих и разработка новых математических зависимостей процесса истечения метана из разрушенного угля от физических свойств углей и крупности его частиц, последующего вычисления температуры и продолжительности его охлаждения за счет эффекта дросселирования метана.

Материалы и результаты исследований. Вопросы газовыделения из отторгнутого от массива угля на протяжении более полувека рассматриваются исследователями во многих угледобывающих странах при изучении проблемы внезапных выбросов угля и газа, а также прогноза газообильности угледобывающих шахт.

Различными авторами получены зависимости для скорости истечения метана и остаточной концентрации его в угле на основе решения дифференциальных уравнений фильтрации метана из углей либо данных натурных измерений, сведенных в эмпирические формулы.

Для наглядности и удобства сравнения полученных результатов, а также представлений авторов исследований о связи зависимостей истечения метана от свойств углей расчетные формулы с необходимыми пояснениями сведены в табл. 2. Экспликации к формулам сохранены авторские.

Таблица 2

Расчетные зависимости для описания процесса истечения метана из разрушенного угля

Авторы	Формулы
Р.М. Кричевский	$A = A_{\text{пр}} e^{-b_1 t}, \quad (1)$ где A – концентрация метана в угле в момент времени t; $A_{\text{пр}}$ – средняя метаносность в отбитом угле; b_1 – коэффициент интенсивности выделения метана

Продолжение табл. 2

Авторы	Формулы
Г.Д. Лидин	$v = v_0 e^{-kt}, \quad (2)$ где v, v_0 – текущая в момент времени t, мин, и на момент отбойки угля интенсивности выделения метана, $\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$
М.Ф. Яновская	$n(t) = (1-A)C_d R^3 \frac{8}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} e^{-\left(\frac{\pi}{R}\right)^2 v^2 t}, \quad (3)$ где $n(t)$ – массовая доля метана в угле на момент t; $A \frac{C_a - C_d}{C_d}$ – концентрация метана в угле и свободном объеме пор, $\text{г}/\text{см}^3$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; R – радиус частиц, см
В.Ф. Микитченко	$E = \frac{a(t) - a_1}{a_0 - a_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (4)$ где E – объемная доля метана в угле на момент времени t, с; a_0, a_1, $a(t)$ – начальная, остаточная и текущая концентрация метана, $\text{см}^3/\text{г}$; $\mu = \frac{2n-1}{2} \pi$; $Fo = \frac{Dt}{R^2}$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; R – радиус частицы, м
Е.С. Жупахина, Н.И. Устинов, А.Э. Петросян	$v = v_0 (t+1)^{-n}, \quad (5)$ где v, v_0 – начальная и текущая интенсивность выделения метана, $\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$; t – время, мин; $n = 0,3 \dots 0,8$ – показатель, характерный для каждого угля
А.Д. Кизляков, Д.М. Шереденин	$v_t = v_0 t^{(\alpha-1)}, \quad (6)$ где v, v_t – начальная и текущая интенсивность выделения метана и угля, $\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$; $\alpha = 0,4 e^{-0,24 \sqrt{x_b} - 4}$ – коэффициент снижения интенсивности; x_b – метановыделение в зоне выемки, $\text{м}^3/\text{т}$
А.А. Мясников	$i_1 = 0,175 x_b \Delta P \sqrt{t}, \quad (7)$ где x_b, i_1 – метаносодержание и метановыделение из угля в момент времени t (мин), $\text{м}^3/\text{т}$; ΔP – масса одновременно отбитого угля, т
В.Л. Божко, А.Ф. Клишкань	$G_t = \frac{1,8 G_{\max}}{1,8 + t}, \quad (8)$ где G_t, $G_{\max}$ – текущая и максимальная интенсивность выделения метана после отбойки угля, $\text{м}^3/\text{мин}$; $G_{\max} = 0,065 V (x - x_1) \left(\frac{100 - A^c - w^a}{100} \right)$, V – объем отбитого угля, м^3; x, x_1 – природная и потенциальная газоносность, $\text{м}^3/\text{т}$; A^c, w^a – массовая доля золы и влаги в угле, %

Окончание табл. 2

Авторы	Формулы
Ю.С. Липаев	$G_T = \frac{4\pi P_0 R g}{R_T T} \frac{k}{\mu} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 a t}, \quad (9)$ где G_t – расход метана из угля радиуса R в момент времени t; P_0 – начальное давление; k – коэффициент газопроницаемости; μ – вязкость газа; R_T – газовая постоянная; T – абсолютная температура
Д.В. Кузьмин, В.И. Михайлов	$V = (x_B - x_0) a T^e, \quad (10)$ где V – объем выделения метана из отбитого угля в момент времени T (мин), $\text{м}^3/\text{т}$; x_B, x_0 – газонасыщенность угля и остаточная газонасыщенность при давлении 1 МПа, $\text{м}^3/\text{т}$; a, e – коэффициенты, зависящие от крупности частиц
А.Д. Алексеев	$\frac{Q(t)}{Q_0} = a \left(1 - \exp\left(-t / \tau_1^{\text{дес}}\right) \right) + b \left(1 - \exp\left(-t / \tau_2^{\text{дес}}\right) \right), \quad (11)$ где $Q(t), Q_0 = a + b$ – текущая и первоначальная концентрация метана в угле; t – текущее время; $\tau_1^{\text{дес}}, \tau_2^{\text{дес}}$ – фильтрационные и диффузионные составляющие характерного времени десорбции метана для каждого типа угля и размера частиц; a и b – доли газонасыщенности угля
П.С. Пашковский, С.П. Греков	$Q^* = \exp\left[-0,05 \text{Др} \left(\frac{6Dt}{R^2}\right)^{1-n}\right], Q^* = 1 - \frac{Q(t)}{Q_0}, \quad (12)$ где Q^* – относительная остаточная газонасыщенность угля; Др – дробимость угля; $Q(t), Q_0$ – текущая и первоначальная газонасыщенность, $\text{м}^3/\text{т}$; t – время, с; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; R – радиус частицы; n – коэффициент, характерный для каждого угля, определяют по зависимости $n = 0,71 + 0,017 \text{Др}^{2/3}.$ $Q^* = \exp(-\mu t), \quad \text{где } \mu = 0,05 \text{Др} \frac{\left(\frac{6D}{R^2}\right)^{1-n}}{t^n} \quad (13)$

Из анализа зависимостей, приведенных в табл. 2, можно заключить следующее.

Формулы (5) – (8) и (10) являются эмпирическими и описывают динамику истечения метана из угля гиперболическими зависимостями с различными показателями степени, зависящими от свойств каждого угля. Обобщающие данные для углей с различными свойствами, необходимые для расчетов их дегазации, ни у одного автора не приведены.

Формулы (1) – (2) также эмпирические, но описывают истечение метана из угля по экспоненциальной зависимости, что, как показывают данные наблюдателей, справедливо для небольших отрезков времени от момента разрушения угля (порядка нескольких часов).

Формула (4) дает хорошие результаты, подтвержденные различными размерами частиц угля пласта Ливенского и временем от начала процесса дегазации 0...2 ч. Для более длительных периодов времени формула дает заниженные результаты, свидетельствующие о том, что дальнейшее истечение метана происходит по зависимостям ближе к гиперболическим.

Формула (9) получена Ю.А. Липаевым на основании решения задачи о скорости выделения метана из кусков угля сферической формы на базе уравнений распределения давления газа в сфере. Расчеты по этой формуле для крупных фракций показали большую скорость газоотдачи, во много раз превышающую фактические значения.

Учитывая недостатки фильтрационного метода, М.Ф. Яновская использовала для расчета метановыделения из отбитого угля уравнение десорбции газа из частиц пористого сорбента сферической формы при низких давлениях и кнудсеновском течении газа в порах, предложенное Э. Викке. Решение дано в виде зависимости (3).

Детальная проверка справедливости уравнения Э. Викке для углей была выполнена Л.А. Скляровым и О.А. Лопатиным. Расчетные данные имели значительное расхождение с экспериментальными. Расхождение было тем больше, чем больше крупность угля по сравнению с фракцией, для которой определяется коэффициент диффузии, и большой промежуток времени от момента разрушения пласта.

Учитывая сказанное, возникла необходимость разработки математической модели истечения метана из частиц угля различных размеров для более длительного промежутка времени от момента отбойки угля от пласта.

Такая модель в рамках микроблокового строения пласта предложена А.Д. Алексеевым [3]. Согласно ей дисперсия размера микроблоков угля предопределяет выбор интерполяционной функции в виде суммы нескольких составляющих. Каждая из них описывает выход газа из определенной группы микроблоков угля. При использовании интерполяции в виде суммы двух функций микроблоки делятся на две группы, отличающиеся между собой средним значением их размера и, соответственно, временем выхода метана из угля $\tau_1^{\text{дес}}$ и $\tau_2^{\text{дес}}$. Длительность фазы – несколько минут. Заключительная фаза, наоборот, имеет большую продолжительность и слабую интенсивность выделения газа. Предполагается, что в этой фазе переходные процессы

завершены и кинетика десорбции полностью определяется текущей концентрацией газа в угле, размером куска угля и его структурой.

Затруднения в пользовании этой моделью заключаются в том, что параметры a , b , $\tau_1^{\text{дес}}$, $\tau_2^{\text{дес}}$, входящие в уравнение (11), характерны для каждого типа углей и диаметра его частиц. Поэтому желательно использование более универсальной модели, отражающей оба периода истечения метана из углей с учетом их размеров.

Математическая модель такого процесса нами представлена начально-краевой задачей, помещенной в работе [4]. Решение предложенных уравнений для сферических кусков угля получено в виде формулы (12). Выделив в (12) целое значение t , получим зависимость для μ и остаточную концентрацию в угле метана в виде (13).

Анализируя полученные решения, делаем вывод, что предложенная зависимость для описания истечения метана из углей объединяет результаты, основанные на экспериментальных данных, описываемых эмпирическими зависимостями, близкими к гиперболическим – формулы (5), (6), (8), и теоретических разработках – формулы (3) – (5), приводящих к экспоненциальным зависимостям.

Для примера преимущества предложенной физической модели проиллюстрируем изменения скоростей истечения метана во времени из слабо нарушенного угля, по ней и по полученным зависимостям Е.С. Жупахиной в экспериментах с фракциями углей от менее 0,25 до 20 мм (рис. 3).

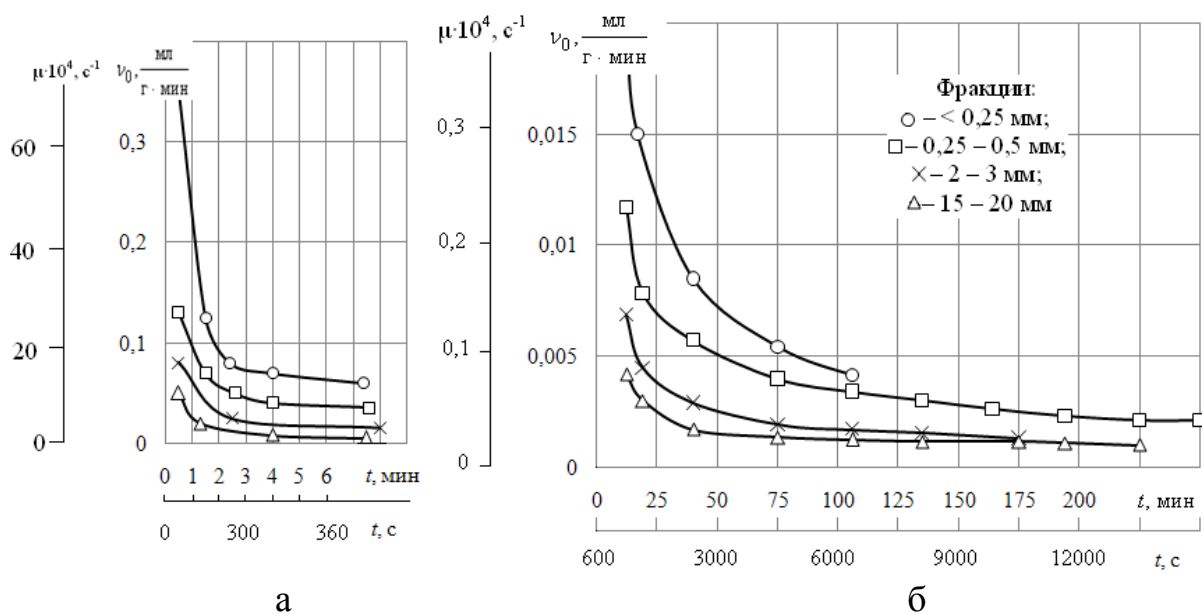


Рис. 3. Изменение скорости газовыделения во времени для слабо нарушенных углей

Данные Е.С. Жупахиной и Н.И. Устинова $v = \frac{v_0}{t^n},$ $n = 0,8$ для $R = 0,25 \dots 0,5$ мм, $v_0 \Big _{t \rightarrow 0} = v_0 \Big _{t=0,5 \text{ мин}} = 0,4 \text{ мл}/(\text{г} \cdot \text{мин}) =$ $= 0,4 \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) = \frac{0,4 \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})}{500 \text{ моль}/\text{м}^3} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1},$ где $500 \text{ моль}/\text{м}^3 = 12 \text{ м}^3/\text{т}$ – газоносность угля. Расчеты совпадают с измерениями только для данного R и соответствующего ему n	Данные П.С. Пашковского и С.П. Грекова $\mu = \frac{0,05 \text{ Др} (6D / R^2)^{1-n}}{t^n}.$ По формуле (12) $n = 0,71 + 0,017 \cdot 14^{0,63} = 0,8;$ где $\text{Др} = 14$, действующего для всего спектра R, м. Расчеты совпадают с из- мерениями для всех значе- ний R, м, и времени t, с, при значении $D = 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$
---	--

По физической сущности параметр μ – величина постоянная, зависящая от свойств сорбента. Однако в связи с тем, что истечение метана из угля во времени происходит из различных его частей с разными порами, то для каждого их размера оно имеет свое постоянное значение.

Среднее значение параметра $\mu_{\text{ср}}, \text{ с}^{-1}$, для каждого исследуемого угля определяют экспериментально с использованием установки НИИГД либо для периода времени $0 \dots 6$ сут с момента разрушения пласта углей с различной степенью метаморфизма может быть найдено по зависимости

$$\mu_{\text{ср}} = 3 \cdot 10^{-6} + 8,7 \cdot 10^{-10} \text{ Др}^{2,86}. \quad (14)$$

При изучении охлаждающего эффекта угля за счет напорного выделения из него метана необходимо знать время окончания его напорного выделения, которое находится при выполнении экспериментов, либо теоретически согласно (12) может быть подсчитано по зависимости

$$t_{\text{н}} = \frac{\ln Q^*}{-\mu}. \quad (15)$$

Остаточная газоносность угля после напорного выделения метана Q^* может быть определена по зависимости [2]

$$Q^* = \frac{V_{\text{ф}}}{\xi Q_0}, \quad (16)$$

где ξQ_0 – часть метана, оставшегося в угле, $\text{м}^3/\text{т}$, после напорного его выделения;

ξ – доля газоотдающей поверхности угля, определяемая зависимостью

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (V^r)^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} V^r + 3,76 \cdot 10^{-3}; \quad (17)$$

Q_0 – газоносность угля, м³/т;

V_ϕ – фильтрационный объем пор угля, м³/т, определяемый в работе [5] выражением

$$V_\phi = 0,058 - 0,004 V^r + 0,0001 (V^r)^2. \quad (18)$$

Интенсивность выделения метана J_M , моль/(м³·с), находят по зависимости

$$J_M = G \mu_{cp}, \quad (19)$$

где G – общее количество выделившегося за время эксперимента метана либо газоносность пласта, моль/м³.

Теплоту дросселирования метана, Дж/моль, находят по зависимости

$$q_{др} = \frac{\rho c_v T_0 \ln(T_0 - \Delta T_{cp}) / T_0}{J_M t_H}, \quad (20)$$

где c_v – удельная теплота угля, Дж/(кг·К);

$T_0, \Delta T_{cp}$ – начальная температура угля и среднее значение снижения температуры после дросселирования метана, К; находят экспериментально;

ρ – плотность угля, кг/м³.

Таким образом, выполненные исследования позволили предложить зависимости, описывающие динамику истечения из углей метана и на их основе метод нахождения степени его окисления.

Выводы

1. Выполнен анализ исследований различных авторов по динамике выделения метана из частиц угля, отторгнутого от массива. Показано, что в этом вопросе существуют два направления исследований: экспериментальное с углями различных физических свойств и теоретическое на основании решения соответствующих дифференциальных уравнений.

2. Анализом установлено, что эмпирические зависимости, описывающие истечение метана из углей, имеют гиперболический или близкий к нему характер с показателем степени n , зависящий от физических свойств каждого угля. Обобщающих данных различных углей не имеется.

3. Вычислениями динамики истечения метана из углей по теоретическим зависимостям установлено, что они пригодны для весьма ограниченного промежутка времени от момента отторжения угля от массива,

порядка от нескольких минут до нескольких часов. В дальнейшем расчеты дают заниженные результаты по сравнению с экспериментальными данными.

4. Предложена усовершенствованная теоретическая зависимость определения остаточной концентрации метана в углях после начала их дегазации, учитывающая теоретические исследования истечения метана с учетом физических свойств угля, в том числе характера пор, уменьшающихся в диаметре по мере проникновения процесса дегазации в глубь угля, последовательно от макропор с диаметром $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м, затем пуазейлевских с диаметром $10^{-5} \dots 10^{-6}$ м, броуновских с диаметром $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м, кнудсеновских с диаметром $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м до фальмеровских с диаметром $10 \cdot 10^{-10} \dots 1000 \cdot 10^{-10}$ м.

5. Предложена на основании теоретических исследований истечения метана из углей методика вычисления теплового эффекта дросселирования метана из угля с использованием результатов экспериментальных данных по его охлаждению после отторжения от массива.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Влияние интенсивности выделения метана из отбитого угля на склонность к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков // 10-я сессия МБГТ: докл. – Гливице, Польша, 2005. – С. 73 – 86.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. *Vliyaniye intensivnosti vydeleniya metana iz otbitogo uglya na sklonnost' k samovozgoraniyu* [Influence of intensity of methane emission from the broken-down coal on liability to spontaneous combustion]. *10-ya sessiya MBGT: dokl.* [10th session of the MBGT: proc.]. Gliwice, Poland, 2005, pp. 73 – 86.

2. Пашковский, П.С. Влияние десорбции в угольном скоплении на инкубационный период его самовозгорания / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 5 – 15.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Vliyaniye desorbtsii v ugol'nom skoplenii na inkubatsionnyy period yego samovozgoraniya* [Influence of desorption in a coal accumulation on the incubation period of its spontaneous combustion]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2006, issue 43, pp. 5 – 15.

3. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – Киев: Наук. думка, 2010. – 432 с.

Alekseyev, A.D. *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 2010, 432 p.

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

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya* [Actual problems of fighting the coal spontaneous combustion]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

5. Пашковский, П.С. Расчет коэффициентов диффузии в углях с использованием хроматографического метода / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Т.Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Донецк, 2014. – Вып. 53. – С. 78 – 88.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Salakhutdinov, T.G. *Raschyet koeffitsiyentov diffuzii v uglyakh s ispol'zovaniyem chromatograficheskogo metoda* [Calculation of the diffusion coefficient in coals with the use of the chromatographic method]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2014, issue 53, pp. 78 – 88.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым.
Дата поступления рукописи 26.06.2018

Viktor Pavlovich Koptikov, Dr. Sci. (Tech.), professor; e-mail: vkoptikov@vgasu.vrn.ru

The Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"The Voronezh State Technical University"

394006, Voronezh, 84, ulitsa 20-letiya Oktyabrya. Phone: +7 (473) 271-59-18

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

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

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

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

METHANE RELEASE FROM COAL PARTICLES AND THEIR COOLING

Purpose. Analysis of the existing and working-out the mathematical descriptions of methane release from the disintegrated coal, creation of the method of determination of the methane throttling heat from it.

Methods. Selection and substantiation of the adopted descriptions of methane release from the coal particles and their cooling.

Results. The analysis of investigations on the methane release dynamics from the coal particles after their splitting from a coal massif has been conducted. It is shown that the obtained empirical dependences are of hyperbolic nature with various indices for each coal and that they don't possess common data. The existing theoretical dependences are of use for short periods of time. The improved theoretical dependence of the methane release dynamics and its residual concentration in coals has been proposed to the extent of their degassing taking into account the physical properties of coals including the nature of pores which reduce their diameter as the degassing process penetrates sequentially deeper into coal: from the macropores with the diameter of $10^{-4} \dots 10^{-5}$ m, then the Poiseuille macropores with the diameter of $10^{-5} \dots 10^{-6}$ m, the Brownian macropores with the diameter of $10^{-6} \dots 10^{-7}$ m, the Knudsen macropores with the diameter of $10^{-7} \dots 10^{-8}$ m and up to the Volmer macropores with the diameter of $10 \cdot 10^{-10} \dots 100 \cdot 10^{-10}$ m. The methods of calculation of the methane throttling heat from coals have been adduced.

Scientific novelty. The theoretical model of the methane release from the coal particles of the exponential type with the degree indices which depend on the nature of the pores participating in the degassing process has been proposed.

Practical value. The obtained results are used in order to create the method for determination of the methane throttling heat from coal what will be utilized for calculation of the incubation period of its spontaneous combustion.

Key words: porosity; methane release; throttling heat; gas capacity; incubation period.

УДК 504.5:[622.693.26:622.822.22]

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

Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; 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) 332-78-82

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Цель. Исследование процесса выделения газообразных вредных веществ в атмосферу при термодеструкции породной массы горящих породных отвалов угольных предприятий и установление зависимостей удельных массовых концентраций этих веществ.

Методика. Лабораторные исследования отобранных образцов отвальной массы из горящих породных отвалов угольных предприятий. Установление аналитических зависимостей количества выделяющихся вредных веществ от термодеструкции породной массы отвалов.

Результаты. Получена аналитическая зависимость количества выделяющихся вредных веществ из породных отвалов. Экспериментальные исследования согласуются с данными теории.

Научная новизна. В отличие от известных методик и линейных зависимостей предложенная аналитическая зависимость полностью отражает физический процесс термодеструкции материала и выделения вредных веществ.

Практическая значимость. Определение удельной массовой концентрации газообразных вредных веществ в зависимости от температуры породной массы отвалов в очагах горения с целью проведения количественного анализа выбросов газообразных вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: породный отвал; термодеструкция; температура; вредные вещества; концентрация; аналитическая зависимость; время полураспада.

Постановка проблемы. Самовозгорание породной массы отвалов – сложный физико-химический процесс, зависящий от ряда факторов. Самовозгорание угля и пирита, где протекают химические реакции, зависит от размера, формы и теплообмена на границе газ-твердое тело, а также от дисперсности, пористости, плотности и влажности твердой фазы.

Самовозгорание материалов в породных отвалах носит очаговый характер, а его развитие происходит за счет последующего расширения участков горения. При горении и термодеструкции отдельных участков породной массы отвалов в атмосферу выделяются вредные вещества, интенсивность образования которых зависит от температуры этой массы в очагах горения. Определение концентрации выделяющихся газов выполняют в соответствии с разработанными нормативными документами, однако полученные данные различаются не только между собой, а предполагают линейную зависимость вредных веществ от температуры, что вызывает сомнения.

Анализ последних исследований. В процессе взаимодействия породной массы с окружающей средой и ее самонагревания ускоряется выветривание породообразующих минералов (этой массы), их разрушение, замещение некоторых элементов и образование новых минералов. Этот процесс сопровождается химическими и биохимическими реакциями окисления пирита, которые протекают с выделением сероводорода. Происходит прогревание поверхностного слоя горных пород и обогащение его серой, зарождение очагов горения. Сформировавшиеся внутри горной массы участки с повышенной температурой вызывают самовоспламенение паров сероводорода и метана. Происходит смещение фронта горения в глубь скопления пород по мере отсыпания отвала и проникновения внутрь атмосферного воздуха. Процесс горения вредных газов описан в ряде публикаций, однако до сих пор недостаточно изучен ввиду отсутствия исчерпывающих данных о количестве выделяющихся вредных веществ в атмосферу при термодеструкции породной массы [1 – 4].

Цель исследования. Проведение теоретических и экспериментальных исследований выделения газообразных вредных веществ при термодеструкции породной массы отвалов и определение их концентрации в зависимости от температуры.

Основная часть. Для расчёта количества выбрасываемых в атмосферу вредных веществ используем дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dX}{d\tau} = k(X_1 - X), \quad (1)$$

где X – концентрация какого-либо вредного вещества, попадающего в окружающую атмосферу, кг/м^3 ;

X_1 – ожидаемая максимальная концентрация какого-либо вредного вещества, попадающего в окружающую атмосферу, кг/м^3 ;

k – константа скорости химических реакций, с^{-1} ;

τ – время, с.

Начальным условием для уравнения (1) примем отсутствие в атмосфере данного вредного вещества $X(0) = 0$. Решение уравнения (1) имеет вид

$$X = X_1 \left[1 - \exp(-k\tau) \right]. \quad (2)$$

Константу скорости реакции в зависимости от температуры выражают соотношением Аррениуса

$$k = A \exp\left(-E_A / RT\right), \quad (3)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, с^{-1} ;

E_A – энергия активации, Дж/моль;

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

T – температура, К.

Подставляя формулу (3) в решение (2), получим

$$X = X_1 \left\{ 1 - \exp \left[-A \exp(-E_A / RT) \tau \right] \right\}. \quad (4)$$

Это даёт возможность выразить зависимость количества выделяемого вредного вещества от температуры.

На рис. 1 приведена зависимость количества какого-либо выделяемого вредного вещества от температуры при фиксированном времени полураспада $\tau = \tau_0$, равном 30 мин. При расчётах принято $A = 3,0 \text{ с}^{-1}$; $E_A = 50 \text{ кДж/моль}$.

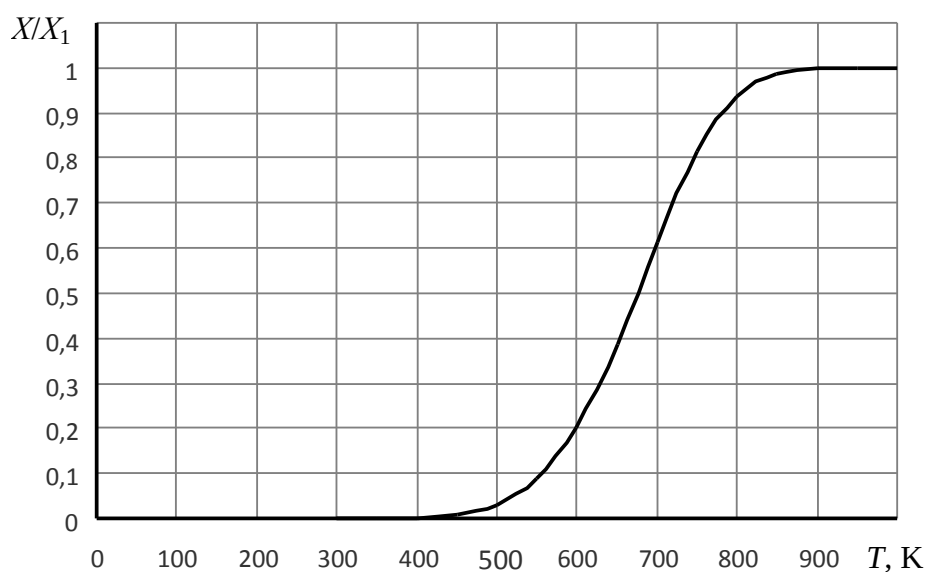


Рис.1. Зависимость количества выделяемого вредного вещества от температуры при термодеструкции и фиксированном времени полураспада

Из анализа полученной зависимости (см. рис. 1) следует, что при температуре до 200 °С отсутствует выделение вредных веществ, а при температуре 600 °С через 30 мин количество вредных веществ становится максимальным. Входящие в формулу (3) константы должны быть более точно установлены путём экспериментальных исследований.

Это даёт возможность в дальнейшем по температуре очага горения породного отвала более точно прогнозировать количество выбрасываемых вредных веществ в окружающую атмосферу.

Для проведения лабораторных исследований вредных веществ, выделяющихся в атмосферу горящими породными отвалами угольных предприятий, были проведены работы по отбору проб породной массы отвалов. Пробу вещества отбирали от партии, характеризующейся однородностью органолептических признаков (цвета, запаха, внешнего вида) и количественной определённой массы партии.

Массу пробы определяли индивидуально, в зависимости от заданной температуры муфельной электропечи и с учетом измеряемого диапазона газоопределителей химических. Пробу вещества в печи при заданной температуре выдерживали 30 мин. После этого определяли концентрацию вредных газов. Газовую смесь отбирали при температурах 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 °С. При этом устанавливали функциональную зависимость концентрации выделяющегося вредного газа от температуры породной массы отвалов для конкретного породного отвала. Исследовали различные горящие породные отвалы с последующим получением средних значений концентраций газов для породных отвалов Донбасса. Затем приступали к обработке результатов измерений. В результате проведенных лабораторных исследований породной массы отвалов получены значения массовой концентрации исследуемых вредных газов и построены графики зависимости удельной массовой концентрации исследуемого вредного вещества от температуры породной массы, представленные на рис. 2 – 4.

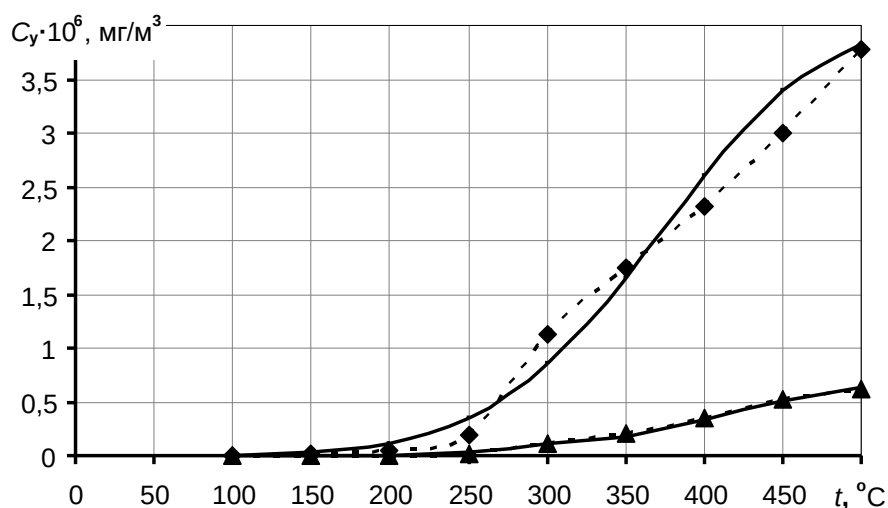


Рис. 2. Зависимость удельных массовых концентраций CO и CO_2 от температуры породной массы отвалов (соответственно нижняя и верхняя кривые):

----- экспериментальные данные; ——— расчетные данные

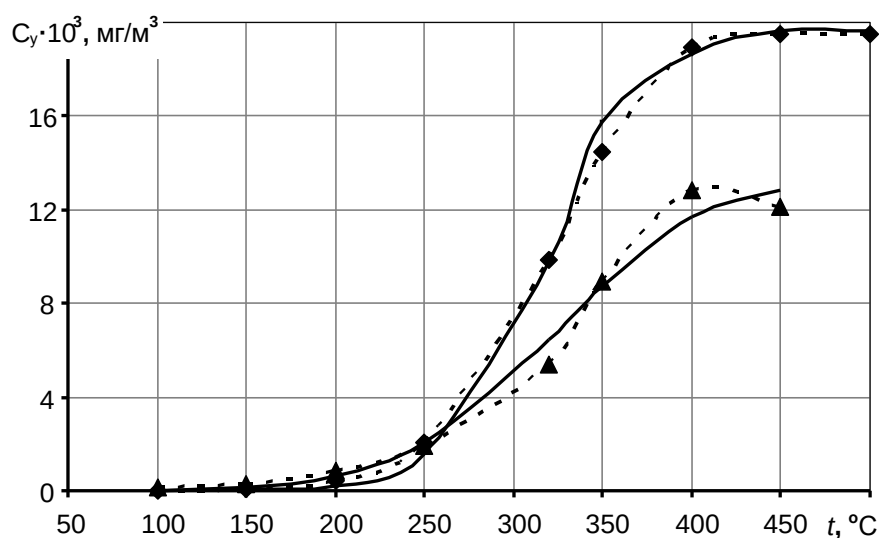


Рис. 3. Зависимость удельных массовых концентраций SO_2 и NO_x от температуры породной массы отвалов (соответственно нижняя и верхняя кривые):
 - - - - - экспериментальные данные; — — — расчетные данные

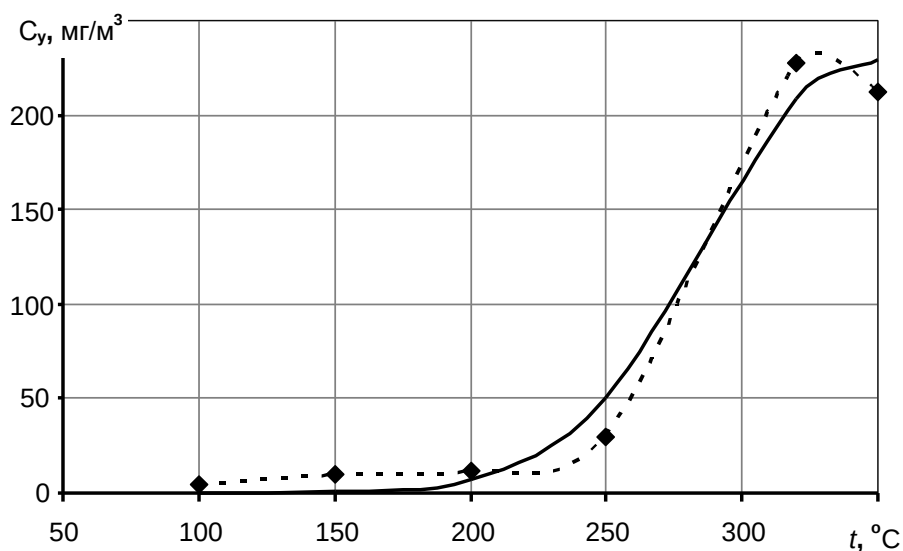


Рис. 4. Зависимость удельной массовой концентрации H_2S от температуры породной массы отвалов:
 - - - - - экспериментальные данные; — — — расчетные данные

Как видно, во всех случаях начальная температура термодеструкции материала и выделения вредных веществ примерно одинаковая, равная $t_0 = 200\text{ }^\circ\text{C}$.

В таблице приведены константы при расчёте по формуле (4) при фиксированном времени полураспада.

Исходные данные для расчёта количества вредных веществ

Вещество	$X_1, \text{г/м}^3$	$A, \text{с}^{-1}$	$E_A, \text{кДж/моль}$
CO	700	6,7	54,8
CO ₂	4000	2,8	47,3
SO ₂	13	11,1	50,6
NO _x	19,5	333	67,2
H ₂ S	2,3	2778	83,0

Как показывают данные таблицы, максимальное газовыделение имеет место для CO₂, а минимальное – для H₂S. В то же время предэкспоненциальный множитель A – наибольший для H₂S, а минимальный – для CO₂. По данным таблицы, коэффициент энергии активации колеблется незначительно от 47,3 до 83 кДж/моль и может быть в среднем принят равным $E_A = 60$ кДж/моль.

Выводы. Таким образом, предложенная аналитическая зависимость (4) полностью отражает физический процесс термодеструкции материала и выделения вредных веществ и в отличие от ранее предложенных линейных зависимостей может быть принята для дальнейших расчётов.

Список литературы / References

1. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами / А.М. Касимов, В.Т. Семенов, Н.Г. Щербань, В.В. Мясоедов. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 510 с.

Kasimov, A.M., Semyenov, V.T., Shcherban', N.G., Myasoyedov, V.V. *Sovremennyye problemy i resheniya v sisteme upravleniya opasnymi otkhodami* [Up-to-date problems and solutions in the hazardous waste control system]. Kharkov, KhNAGKh Publ., 2008, 510 p.

2. Воробьев, Е.А. Влияние породных отвалов на окружающую среду / Е.А. Воробьев, С.А. Сокира, Е.А. Сухарь [Электронный ресурс]. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream> (дата обращения: 11.07.2017).

Vorob'yev, Ye.A., Sokira, S.A., Sukhar', Ye.A. *Vliyaniye porodnykh otvalov na okruzhayushchuyu sredu* [Influence of waste heaps on the environment]. [Electronic resource]. Available at: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream> (accessed: 11.07.2017).

3. Экология России и сопредельных территорий: материалы XXII Междунар. экол. студенческой конф. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – 216 с.

Ekologiya Rossii i sopredel'nykh territoriy: materialy XXII Mezhdunar. ekol. studencheskoy konf. [Ecology of Russia and adjacent territories: materials of the 22nd

International ecological students' conf.] / Novosib. gos. un-t, Novosibirsk, IPTs NGU Publ., 2017, 216 p.

4. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. – М.: Изд-во МГГУ, 2002. – 487 с.

Bezopasnost' vedeniya gornykh rabot i gornospasatel'noye delo [Safety of carrying-out the mining and mine-rescue work]. Moscow, MGGU Publ., 2002, 487 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 10.07.2018

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

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

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

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 0622) 332-78-82

QUANTITY EVALUATION OF HARMFUL SUBSTANCES DURING BURNING OF THE SPOIL HEAPS

Purpose. Investigation of the process of emitting the gaseous harmful substances into the atmosphere during thermal destruction of the burning spoil heaps of coal enterprises and establishment of dependences of the specific mass concentrations of these substances.

Methods. Laboratory studies of selected samples of the spoiled mass from the burning spoil heaps of the coal enterprises. Ascertainment of analytical dependences of the quantity of harmful substances being emitted as a result of thermal destruction of the spoil heaps bed.

Results. The analytical dependence of the quantity of harmful substances being emitted from the spoil heaps has been obtained. The experimental researches correspond with the theoretical data.

Scientific novelty. As opposite to the known methods and linear dependences the proposed analytical dependence completely reflects the physical process of the thermal destruction of the material and release of the harmful substances.

Practical value. Determination of the specific mass concentration of the gaseous harmful substances depending on the temperature of the spoil heaps bed in the ignition sources for the purpose of conducting the quantity analysis of the emissions of the gaseous harmful substances into the atmosphere.

Keywords: spoil heap; thermal destruction; temperature; harmful substances; concentration; analytical dependence; half-life.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2018, № 4(55)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Учредитель и издатель

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

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 02.11.2018.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 3,5 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 7 ноября 2018 г.