



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

Выпуск 52

Выходит раз в году

Основан в 1970 г.

Донецк
2015

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – 216 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. Ранее сборник выходил под названием «Горноспасательное дело».

Утверждено к печати решением ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 7 от 27.08.2015).

Редакционная коллегия:

| | |
|------------------|--|
| канд. техн. наук | В.Г. Агеев – главный редактор |
| д-р техн. наук | П.С. Пашковский – заместитель главного редактора |
| д-р техн. наук | А.Н. Баратов |
| д-р техн. наук | Ю.Ф. Булгаков |
| | Г.Д. Галдобин |
| д-р техн. наук | С.С. Гребенкин |
| д-р техн. наук | С.П. Греков |
| д-р техн. наук | В.Г. Игишев |
| д-р техн. наук | В.В. Ковалишин |
| д-р техн. наук | В.К. Костенко |
| д-р техн. наук | В.В. Мамаев |
| канд. техн. наук | И.Ф. Марийчук |
| д-р техн. наук | Д.Ю. Палеев |
| д-р техн. наук | В.М. Плотников |
| д-р техн. наук | С.Б. Романченко |
| д-р техн. наук | Я. Цыганкевич |
| канд. техн. наук | А.С. Чумак |
| канд. техн. наук | Ю.Н. Ющенко |

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации ДНР 07.12.2015. Регистрационный номер 348



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 and technical journal

Issue 52

Published yearly

Found in 1970

Donetsk
2015

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific and technical journal. – Donetsk, 2015. – Issue 52. – 216 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergency situations, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires on the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The collected scientific papers were appeared earlier under the title "Mine-rescue Work".

Approved for printing according to the decision of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 7 from 27.08.2015).

Editorial board:

Cand. Sci. (Tech.) V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.) P.S. Pashkovskiy – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.) A.N. Baratov
Dr. Sci. (Tech.) Yu.F. Bulgakov
G.D. Galdobin
Dr. Sci. (Tech.) S.S. Grebyenkin
Dr. Sci. (Tech.) S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.) B.G. Igishev
Dr. Sci. (Tech.) V.V. Kovalishin
Dr. Sci. (Tech.) V.K. Kostenko
Dr. Sci. (Tech.) V.V. Mamayev
Cand. Sci. (Tech.) I.Ph. Mariychuk
Dr. Sci. (Tech.) D.Yu. Paleyev
Dr. Sci. (Tech.) V.M. Plotnikov
Dr. Sci. (Tech.) S.B. Romanchenko
Dr. Sci. (Tech.) Ya. Cygankiewicz
Cand. Sci. (Tech.) A.S. Chumak
Cand. Sci. (Tech.) Yu.N. Yushchenko

The Journal was registered by Ministry of Information of the DPR 07.12.2015. Registration number 348

СОДЕРЖАНИЕ

I. Гражданская защита

- Агеев В.Г.** Подавление воздушных ударных волн в горных выработках пенными пробками 7
- Мамаев В.В., Завьялов Г.В.** Математическое моделирование нестационарных теплообменных процессов в противотепловых костюмах 13
- Зборщик Л.А., Мамаев В.В., Плетенецкий Р.С., Говзеев В.В.** Защита органов дыхания при пожарах 23
- Завьялова Е.Л., Чепак О.П.** Параметры технологии восстановления биологического разнообразия в карьерах 30
- Кравченко Е.В.** Экономические аспекты финансирования мероприятий по борьбе с техногенными авариями 41

II. Пожарная безопасность

- Пашковский П.С., Зинченко И.Н., Богомаз А.М.** Математическая модель теплообменных процессов при пожаре в здании 51
- Мамаев В.В., Соколянский В.В.** Теплообменные процессы в остеклении кабин автомобилей 59
- Греков С.П., Головченко Е.А.** Связь энергии активации углей и эндогенной пожароопасности 68
- Греков С.П., Орликова В.П.** Реакционная активность углей 78
- Коляда А.Ю., Гребенкин С.С.** Математическое описание процессов движения диспергированной воды в горных выработках угольных шахт 91
- Коляда А.Ю., Ющенко Ю.Н., Дикенштейн И.Ф.** Методика расчета параметров локализации пожаров в горных выработках 99
- Старикова И.Г.** Критерий оценки пожароопасности угольных пластов 112
- Дикенштейн И.Ф., Диденко А.А., Розанова Е.Н.** Взрыво- и пожароопасность подземных электровозных гаражей 118

TABLE OF CONTENTS

I. Civil protection

- Ageyev V.G.** Suppression of air shock waves in mine workings with foam plugs 7
- Mamayev V.V., Zavyalov G.V.** Mathematical modeling of non-stationary heat exchange processes in heat protective suits 13
- Zborshchik L.A., Mamayev V.V., Pletenetskiy R.S., Govzheyev V.V.** Protection of breathing organs by fires 23
- Zavyalova Ye.L., Chepak O.P.** Parameters of the technology of restoration of biological diversity in open pits 30
- Kravchenko Ye.V.** Economic aspects of the financing of measures on control the anthropogenic accidents 41

II. Fire safety

- Pashkovskiy P.S., Zinchenko I.N., Bogomaz A.M.** Mathematical model of heat-mass exchange processes by a fire in a building 51
- Mamayev V.V., Sokolyanskiy V.V.** Heat exchange processes in cab windows of fire-fighting vehicles 59
- Grekov S.P., Golovchenko Ye.A.** Relationship of the activation energy of coals to endogenous fire hazard 68
- Grekov S.P., Orlikova V.P.** Reactionary activity of coals 78
- Kolyada A.Yu., Grebyenkin S.S.** Mathematical description of the processes of motion of water dispersed in mine workings of coal mines 91
- Kolyada A.Yu., Yushchenko Yu.N., Dikenshteyn I.F.** Methodology of calculation of parameters of fire localization in mine workings 99
- Starikova I.G.** Criterion of estimation of fire hazard of coal seams 112
- Dikenshteyn I.F., Didenko A.A., Rozanova Ye.N.** Explosion- and fire safety of underground electric locomotive garages 118

| | | | |
|--|------------|--|--|
| Козлитин А.А., Лебедева В.В., Непочатых И.Н., Храпоненко О.В. Требования к пожарной безопасности конвейерных лент для угольных шахт | 126 | Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N., Khraponenko O.V. Fire safety requirements for conveyor belts for coal mines | |
| Осадчий А.В., Прима А.Н., Буряк Д.С., Диденко А.А. Процесс распространения теплового потока в кабельном туннеле при возникновении пожара | 133 | Osadchiy A.V., Prima A.N., Buryak D.S., Didenko A.A. Process of propagation of the heat flow in the duct by origin of the fire | |
| Всякий А.А., Пашковский О.П., Балта Д.Ф. Конструктивные особенности высоконапорного пеногенератора | 143 | Vsyakiy A.A., Pashkovskiy O.P., Balta D.F. Design philosophy of a high-pressure foam generator | |
| Балта Д.Ф. Повышение эффективности переносного огнетушителя | 148 | Balta D.F. Increase of effectiveness of a portable fire extinguisher | |
| III. Горноспасательное дело | | III. Mine-rescue work | |
| Пашковский П.С., Греков С.П., Орликова В.П., Всякий А.А. Развитие процесса низкотемпературного окисления углей | 153 | Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Orlikova V.P., Vsyakiy A.A. Development of the process of low-temperature oxidation of coals | |
| Стариков Г.П., Шажко Я.В., Хашчеватская Н.В., Шажко О.В. Метод построения десорбционных паспортов для диагностики давления метана в угольных пластах и их газоносности | 168 | Starikov G.P., Shazhko Ya.V., Khashchevatskaya N.V., Shazhko O.Ya. Method of construction of the desorption certificates for examination of the methane pressure in coal seams and their gas content | |
| Пефтибай Г.И., Чернышев В.А., Чайковская Э.Г. Выбор типа расходомера воды для использования в смесительно- нагнетательных установках | 174 | Peftibay G.I., Chernyshev V.A., Chaykovskaya E.G. Choice of the water meter type for the use in force mixing plants | |
| Лебедев В.И., Лебедева Ю.В. Экспериментальный метод оценки газовой обстановки на выемочном участке | 182 | Lebedev V.I., Lebedeva Yu.V. Experimental method of estimation of gas conditions in a mining district | |
| Пефтибай Г.И., Чапкович А.В. Модернизация проводной горноспасательной связи | 186 | Peftibay G.I., Chapkovich A.V. Modernization of the wire mine-rescue communication | |
| Медгаус В.М., Клычков А.А., Папазова О.В., Попов Н.Н. Математическая модель процесса нагревания водяного льда в холодильнике респиратора | 192 | Medgaus V.M., Klychkov A.A., Papazova O.V., Popov N.N. The mathematical model of the process of the water ice heating in a cooler of a breathing apparatus | |
| Момот Д.И. Устройство для получения газомеханической пены | 201 | Momot D.I. Device for generation of gas mechanical foam | |
| Перехрест Ю.Н., Мавроди А.В. Длительность переходного аэродинамического процесса в изолированном аварийном участке шахты | 208 | Perekhrest Yu.N., Mavrodi A.V. Duration of the transient aerodynamic process in an isolated emergency district of a mine | |
| Требования к оформлению статьи | 214 | Requirements of execution of an article | |

І. Гражданская защита

УДК [622.812:534.222.2]:614.842.615

В.Г. Агеев, канд. техн. наук, директор НИИГД «Респиратор», Донецк

ПОДАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПЕННЫМИ ПРОБКАМИ

V.G. Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

SUPPRESSION OF AIR SHOCK WAVES IN MINE WORKINGS WITH FOAM PLUGS

Цель. Создание математической модели подавления воздушных ударных волн пенными пробками и проверка адекватности разработанной модели натурному объекту.

Методы. Используются уравнения движения двухфазных потоков, численный метод решения дифференциальных уравнений движения воздушных ударных волн и их взаимодействия с преградами.

Результаты. Анализ полученных результатов показывает, что введение в рассмотрение двухфазной среды позволяет учесть такие факторы, как увеличение аэродинамического сопротивления, разрушение пены и образование капель жидкости при подавлении воздушной ударной волны.

Выводы. Разработанный метод даёт возможность изучить закономерности движения воздушной ударной волны при её столкновении с пенной пробкой и определить степень снижения давления в зависимости от длины пробки.

Ключевые слова: метан, взрыв, воздушная ударная волна, пенная пробка, двухфазная среда, испарение влаги, эксперименты, подавление волн.

Введение. Согласно статистическим сведениям, около 90 % взрывов и вспышек метана в угольных шахтах происходит из-за повышенной концентрации метана в выработках в результате их загазованности.

Все ранее предложенные методы расчёта значений давления при взрывах основаны на статическом методе определения избыточного давления по экспоненте в зависимости от расстояния от места взрыва и не учитывают динамики во времени ударных волн, их отражения при столкновении с перемычками и забоями тупиковых выработок, а потери давления на сопряжениях выработок принимают без учёта скорости движения смеси газов и её температуры.

Применяемые способы и устройства для защиты горных выработок от действия воздушных ударных волн отличаются трудоемкостью, сложностью конструкций и недостаточная надёжность. Разработка нового динамического метода определения параметров воздушных ударных волн, прогноз степени их подавления пенными пробками необходимы для выбора безопасных расстояний от места взрыва к месту ведения горноспасательных работ в сложной сети горных выработок.

Методы. Для описания процессов взаимодействия воздушных ударных волн с пенными пробками будем считать, что происходит движение двух потоков как двухфазных сред. При этом смесь газов над пеной представляет собой турбулентный поток, а пена ведёт себя, как ламинарный ползучий поток. Поэтому скорости движения пены и газа несоизмеримы и пенный поток можно считать неподвижным по сравнению со сверхзвуковым потоком смеси газов. Ударная волна, действуя на пенную пробку, приведёт к её сжатию, разрушению и частичному испарению влаги.

Уравнение движения газов вне пенной пробки и над пробкой ничем не отличается от уравнений, моделирующих формирование и распространение воздушных ударных волн. Так, принимая периметр выработки равным $\Pi = 4 S$, представим уравнение движения в виде [1, 2]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\lambda}{2\sqrt{\delta S}} \rho u^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³;

t – время, с;

x – текущее расстояние от места взрыва, м;

u – скорость движения газов, м/с;

P – давление, Па;

λ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$\delta = S_1/S$ – отношение площади зазора над пробкой ко всей площади сечения выработки;

S_1 – площадь зазора над пробкой, м²;

S – площадь сечения выработки, м².

Анализ уравнения (1) показывает, что аэродинамическое сопротивление при движении смеси газов над пенной пробкой будет тем больше, чем меньше площадь просвета над пробкой.

Другие уравнения неразрывности потока и сохранения энергии имеют вид [1, 2]

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial(ES)}{\partial t} + \frac{\partial[(P + E)uS]}{\partial x} = (\alpha_m + \alpha_{\text{п}})\Pi(T_0 - T), \end{cases} \quad (2)$$

где E – полная энергия потока газов, Па;

α_m – коэффициент теплообмена со стенками выработки, Па·м/(с·К);

$\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент теплообмена с пеной, Па·м/(с·К);

- P – периметр выработки, м;
 T_0 – температура стенок выработки и пены, К;
 T – температура потока газов, К.

Другим фактором, приводящим к подавлению воздушных ударных волн, будет испарение влаги при разрушении пены. Коэффициент теплообмена при испарении влаги имеет вид [3]

$$\alpha_{ис} = 8 \cdot 10^{-4} \rho_{ж} v r T_0 / K, \quad (3)$$

где $\alpha_{ис}$ – коэффициент теплообмена при испарении влаги, Вт/(К·м²);

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

v – скорость испарения влаги, м/с;

r – теплота парообразования, Дж/кг;

K – кратность пены.

Из анализа полученной зависимости (3) следует, что чем меньше кратность пены, тем интенсивней происходит теплообмен между пеной и газовым потоком.

Результаты. Уравнения (1) и (2) с использованием зависимости (3) решали численными методами. Для установления адекватности разработанной математической модели подавления воздушных ударных волн пенными пробками результаты моделирования сравнивали с экспериментальными данными, полученными в натуральных условиях [4].

Экспериментальные исследования подавления воздушных ударных волн пенными пробками проведены в НИИГД «Респиратор» в натуральных условиях в штольне «Гранит». Штольня (рис. 1) представляет собой горизонтальную тупиковую выработку [4] длиной 300 м, параллельно которой пройден людской ходок. На расстоянии от тупика 200 м имеется сбойка длиной 75 м. Площадь поперечного сечения тупиковой выработки и сбояки 8,3 м², а людского ходка 4,5 м².

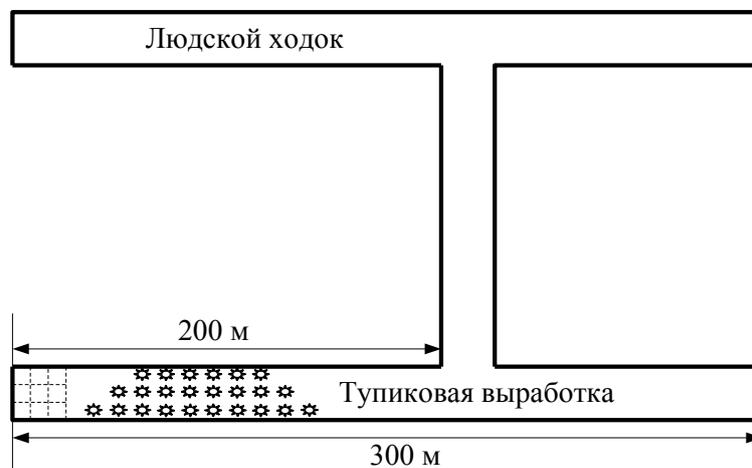


Рис. 1. Схема выработок штольни «Гранит» с указанием преграды и зоны загазования (штриховые линии)

Метан в тупиковую часть штольни, отделённую от остальной части выработки диафрагмой из полиэтиленовой плёнки, подавали из цистерн по трубопроводу через редуктор. Длина зоны, заполняемой метановоздушной смесью, была различной. С помощью вентилятора местного проветривания метан равномерно перемешивался с воздухом до достижения объемной доли, равной 10 %. Длина зоны со взрывчатой объемной долей метана принята была вначале равной 18 м.

Воздушно-механическую пену по вентиляционному трубопроводу подавали на различные расстояния от устья штольни. Кратность пены была равна $K = 150 \div 200$. Расстояние пенной пробки от камеры с высокой концентрацией метана – до 50 м. Источником воспламенения служила нихромовая проволока, нагреваемая с помощью высокого напряжения. Для измерения давления во фронте воздушной ударной волны при взрывах применяли тензометрические датчики, располагаемые по всей длине штольни через 50 м. Датчики давления работали в комплекте с тензостанцией и шлейфовым осциллографом. Относительная погрешность измерения давления составляла 5 – 7 %.

На рис. 2 показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения (кривая 1) и подавления воздушных ударных волн пенными пробками (кривые 2 – 4).

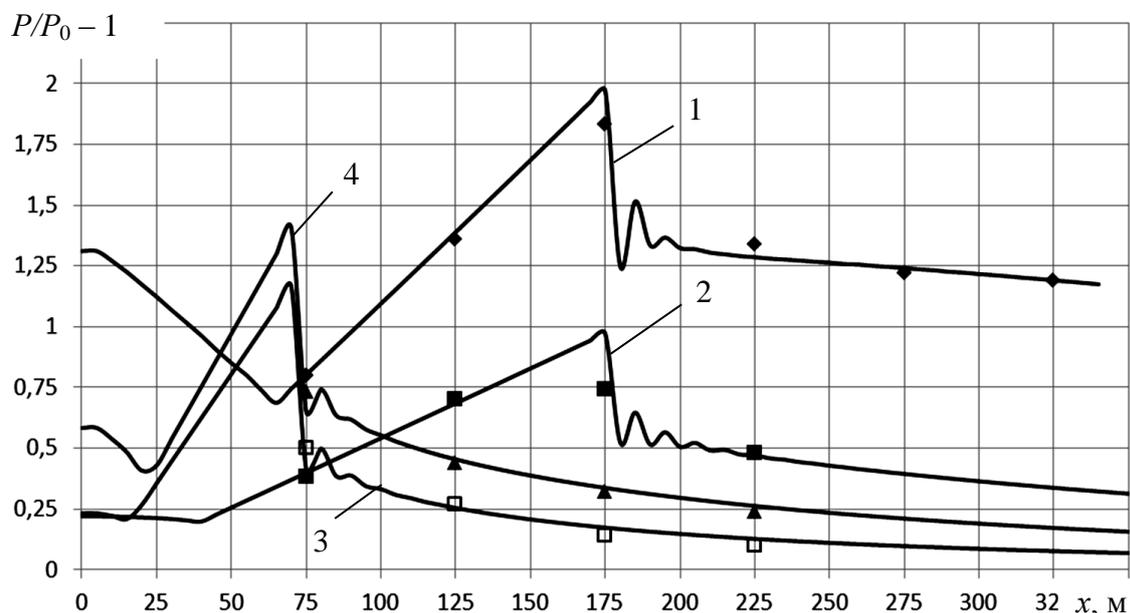


Рис. 2. Подавление воздушных ударных волн пенными пробками:
1 – нулевой эксперимент; 2 – длина пенной пробки 220 м с зазором; 3 – длина пенной пробки 180 м без зазора; 4 – длина пенной пробки 250 м без зазора

Результаты исследований показывают, что максимум давления во всех экспериментах не совпадает с концом зоны загазования, где, казалось бы,

должно заканчиваться цепное горение. Так, без подачи пены максимум давления (см. рис. 2) находится на 175 м, а длина загазованной зоны равна всего 18 м. Это можно объяснить распространением пламени на большое расстояние, так как пламя представляет собой горение за пределами загазованной зоны. Кривая 1 на рис. 2 указывает на распределение максимального давления вдоль штольни без подачи пены. Скачок давления до 0,13 МПа в забое штольни как раз указывает на возврат воздушной ударной волны, имеющей максимум 0,2 МПа.

Заполнение пеной штольни на 220 м с зазором между пенной пробкой и газовым потоком привело (см. рис. 2, кривая 2) к уменьшению максимального избыточного давления в два раза. При этом максимум давления находился на том же месте (175 м), откуда следует, что частичное заполнение пеной поперечного сечения штольни приводит к распространению пламени на большие расстояния. В этом случае для адекватности математической модели натурному объекту принято: $\lambda = 0,1$; $\bar{\alpha} = (\alpha_t + \alpha_n) P/S = 0,1$ на длине 175 м. Иначе происходит, если пена заполняет всё сечение штольни. Как показывают данные экспериментальных исследований (см. рис. 2, кривые 3 и 4), перекрытие всего сечения штольни приводит к резкому сокращению длины пламени на 100 м. Очевидно, воздушная ударная волна, воздействуя на пенную пробку, сжимает её на 50 м и не даёт возможности пламени проникнуть дальше, существенно снижая максимальное давление. Так, на 225 метре избыточное относительное давление падает до 0,25 и 0,1 по отношению к начальному давлению. При этом длина пробки равна соответственно 180 и 250 м. В этом случае для адекватности математической модели натурному объекту принято: $\lambda = 0,1$; $\bar{\alpha} = 0,1 \div 0,3$ на длине 75 м.

Таким образом, сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными и их сходимость позволяют прогнозировать эффективность подавления воздушных ударных волн пенными пробками.

Результаты разработанного метода исследований подавления воздушных ударных волн пенными пробками существенно отличаются от известных методов тем, что в данном случае учтено аэродинамическое сопротивление выработки с пеной по всему ее сечению или части выработки. Кроме того, учтен теплосъём при испарении жидкости в пене, приводящий к снижению мощности взрыва.

Выводы. Разработана математическая модель процессов взаимодействия воздушных ударных волн с пенными пробками в зависимости от их длины. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза интенсивности подавления воздушных ударных волн пенными пробками.

Список литературы / References

1. Палеев Д.Ю. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах / Д.Ю. Палеев, О.П. Брабандер. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. – 199 с.

Paleyev, D.Yu. and Brabander, O.P. (1999). *Matematicheskoye modelirovaniye aktivnogo vozdeystviya na vzryvoopasnyye oblasti i ochagi gorennya v ugolnykh shakhtakh* [The mathematical modeling of the active influence on explosion-hazardous areas and heat sources in coal mines]. Tomsk University Press, Tomsk, 199 p.

2. Агеев В.Г. Моделирование наложения и взаимодействия ударных волн на пути их движения при повторных взрывах / В.Г. Агеев, И.Н. Зинченко // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2012. – С. 111 – 117.

Ageyev, V.G and Zinchenko, I.N. (2012). *Modelirovaniye nalozheniya i vzaimodeystviya udarnykh voln na puti ikh dvizheniya pri povtornykh vzryvakh* [The modeling of superposition and interaction of shock waves on the way of their motion by repeated explosions]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. tr. Institut fiziki gornykh protsessov NAN Ukrainy* [Proc. of the Institute of Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences “Physicotechnical problems of mining practice”, pp. 111 – 117.

3. Добрянский Ю.П. Расчёт тепловлажностных режимов подземных объектов на ЭВМ / Ю.П. Добрянский. – Киев: Наук. думка, 1991. – 112 с.

Dobryanskiy, Yu.P. (1991). *Raschyet teplovlazhnostnykh rezhimov podzemnykh ob'yektov na EVM* [Computer-aided calculation of heat and humidity conditions of underground objects]. Kiev, Naukova dumka, 112 p.

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

Bulgakov, Yu.F. (2001), *Tusheniye pozharov v ugolnykh shakhtakh* [Fighting the fires in coal mines]. Donetsk, NIIGD, 280 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 09.07.2015

Purpose. Working-out of a mathematical model of suppression of the air shock waves with foam plugs and verification of coincidence of the model worked out with a full-scale object.

Methods. The motion equations of two-phase flows, the numerical method of solution of differential equations of motion of the air shock waves and their interaction with barriers are used.

Results. The analysis of the results acquired shows that the bringing of the two-phase environment under consideration permits to take into account such factors as increase of aerodynamic resistance, foam destruction and generation of fluid drops by suppression of the air shock wave.

Conclusions. The method worked out enables to study the mechanism of motion of the air shock wave by its collision with the foam plug and to determine the degree of pressure decrease depending on the plug length.

Keywords: methane, explosion, air shock wave, foam plug, two-phase environment, water evaporation, tests, shock suppression.

УДК [001.891.573:536.242]: [614.895.5:621.56-032.2]

В.В. Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по науч. работе, Г.В. Завьялов, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТИВОТЕПЛОВЫХ КОСТЮМАХ

V.V. Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director for science, G.V. Zavyalov, scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

MATHEMATICAL MODELING OF NON-STATIONARY HEAT EXCHANGE PROCESSES IN HEAT PROTECTIVE SUITS

Цель. Разработать математическую модель нестационарных тепломассобменных процессов в противотепловых костюмах с проточным водяным охлаждением.

Методы. Теоретическое исследование нестационарных тепломассобменных процессов на основании законов термодинамики и теплопроводности.

Результаты. Разработана математическая модель нестационарных тепломассобменных процессов в системе противотепловой защиты с проточным водяным охлаждением, учитывающая лучистый и конвективный потоки окружающей среды, а также конвективные потоки теплоты со стороны человека в зависимости от тяжести выполняемой им работы. Предложен численный метод реализации математической модели, позволяющий научно обоснованно устанавливать необходимое расстояние между трубками с охлаждающей водой и выбирать их оптимальный диаметр при создании противотепловой защиты спасателя.

Научная новизна. Впервые рассмотрены нестационарные тепломассобменные процессы в противотепловых костюмах с проточным водяным охлаждением.

Ключевые слова: температура, теплообмен, противотепловая защита, спасатель, система проточного водяного охлаждения, математическая модель, длина трубок, диаметр трубок.

Постановка проблемы. Широкое применение в горном деле нашли противотепловые куртки и костюмы. Основным недостатком, в частности, водолеяных охлаждающих элементов, которые используют в этих изделиях, является необходимость иметь значительное количество специальных морозильных установок и контейнеров для замораживания, хранения и доставки к месту проведения работ охлаждающих элементов, что требует больших материальных затрат. Все вышеизложенное вынуждает продолжать поиск других методов и средств охлаждения.

Формулирование цели работы и постановка задач. Предлагаемая система кондуктивного съема теплоты проточной водой основана на применении противотеплового костюма с водяным охлаждением (рис. 1). Костюм состоит из наружного и внутреннего комбинезонов, первый из них в основном – теплоотражающий, второй – противотепловой с контуром охлаждения, между ним и телом спасателя находится изолирующий слой.

С учетом схемы построения теплозащитного костюма (рис. 2) рассмотрены процессы тепломассопереноса в трёхслойной оболочке теплозащитного костюма.



Рис. 1. Схема теплозащитного костюма с системой проточного водяного охлаждения

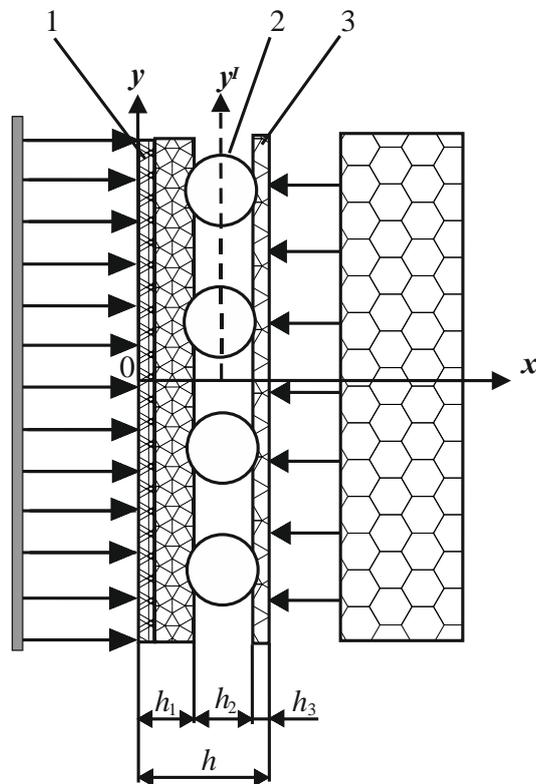


Рис. 2. Система противотепловой защиты с охлаждением проточной водой:
 1 – наружный теплоотражающий слой с теплоизоляционной подкладкой; 2 – контур водяного охлаждения с воздушной прослойкой; 3 – внутренний слой

Оболочка подвержена тепловому воздействию со стороны фронта пламени пожара и изнутри со стороны тела спасателя за счёт выделяемой им теплоты. В воздушной прослойке между теплоизолирующей подкладкой и внутренним слоем расположена система водяных трубок для охлаждения.

Система координат выбрана таким образом, что ось x направлена от объекта с высокой температурой к телу спасателя посередине между трубками с охлаждающей водой, а ось y – снизу вверх с началом координат на поверхности внешнего теплозащитного слоя.

Для построения математической модели процессов переноса теплоты в подкостюмном пространстве вводится пространственная координата x , отсчитываемая от наружной поверхности костюма по нормали в глубь оболочки (см. рис. 2). Принимаем допущение, что по поверхности любого слоя оболочки (в направлениях, перпендикулярных x) температура распределена равномерно, т.е. градиент её по площади слоёв оболочки в окрестности исследуемого фрагмента костюма пренебрежимо мал по сравнению с градиентом в глубь оболочки. Текущее время отсчитываем с момента воздействия повышенной температуры на теплозащитный костюм.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 схем показывает, что при разработке математической модели нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – наружный теплоотражающий слой с теплоизоляционной подкладкой – контур водяного охлаждения с воздушной прослойкой – внутренний слой – тело спасателя» необходимо изучить процессы в двухмерном пространстве, в трёхфазной среде: твёрдая фаза – ткань, жидкая фаза – вода и газообразная фаза – воздух.

Уравнение теплопроводности в двухмерном пространстве может быть представлено в виде [1, 3]

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где θ – температура, К;

τ – время с момента высокотемпературного воздействия на изолирующий костюм, с;

x, y – оси координат, м;

a_x, a_y – коэффициенты температуропроводности вдоль осей координат, м²/с.

В каждом слое будет разная теплопроводность, так как в слое 2 – воздух, а в слоях 1 и 3 – теплоизолирующая ткань. Поэтому температуре в уравнении (1) присвоим индексы, соответствующие номеру слоя. Это касается также и коэффициентов температуропроводности. В результате получим вместо (1) уравнение в общем виде

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = a_{xi} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} + a_{yi} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial y^2}, \quad (2)$$

где индекс i принимает значения от 1 до 3 в зависимости от рассматриваемого слоя.

Примем, что коэффициенты теплопроводности по всем направлениям в каждом слое одинаковы ($a_{xi} = a_{yi} = a_i$). Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = a_i \left(\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial y^2} \right). \quad (3)$$

Начальным условием для уравнения (3) будет условие равенства температуры во всём подкостюмном пространстве:

$$\theta_i(x, y, 0) = T_0, \quad (4)$$

где T_0 – температура, близкая к нормальным условиям, К.

Граничными условиями для уравнения (3) будут условия на левой стороне, где тепловой поток передается излучением; на правой, где находится тело спасателя и где должен задаваться конвективный поток, а на верхней и нижней границах должны выполняться условия симметрии слоёв, параллельных оси x .

Передача теплоты к нагреваемому телу в основном происходит излучением. Однако конвективным переносом здесь не будем пренебрегать. В этом случае тепловой поток, получаемый наружным слоем теплозащитного костюма от нагретого до высокой температуры воздуха и от нагретых ограждающих конструкций, прямо пропорционален разности четвёртых степеней абсолютных температур поверхностей, участвующих в теплообмене. Тепловой поток, действующий на теплозащитный костюм (наружный слой), определяют по формуле [1, 2]

$$\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(0, y, \tau)}{\partial x} = \alpha_0 (\theta_1 - T_H) + \varepsilon \sigma \left[\theta_1^4(0, y, \tau) - T_H^4 \right], \quad (5)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности в первом слое защитного костюма, Вт/(м·К);

α_0 – коэффициент конвективного теплообмена между защитным костюмом и внешней средой, Вт/(м²·К);

ε – степень черноты поверхности, характеризующая её излучающую способность;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(К³·м²);

T_H – абсолютная температура среды, окружающей исследуемый объект, К.

Как видно, в правой части граничного условия (5) учтен конвективный по закону Ньютона (первое слагаемое) и теплообмен за счёт лучистой энергии.

Разница четвёртых степеней температур может быть представлена в виде

$$\theta_1^4 - T_H^4 = [(\theta_1 + T_H)(\theta_1^2 + T_H^2)](\theta_1 - T_H). \quad (6)$$

Так как температура окружающей среды намного больше температуры в подкостюмном пространстве ($T_H \gg \theta_1$), то выражение в квадратных скобках можно упростить и принять равным

$$\theta_1^4 - T_H^4 \approx T_H^3(\theta_1 - T_H). \quad (7)$$

Тогда граничное условие (5) представим в виде [2, 3]

$$\lambda_1 \frac{\partial \theta_1(0, y, \tau)}{\partial x} = (\alpha_0 + \varepsilon \sigma T_H^3) [\theta_1(0, y, \tau) - T_H]. \quad (8)$$

В месте контакта защитного костюма с телом человека тепловой поток опишет уравнение

$$\lambda_3 \frac{\partial \theta_3(h, y, \tau)}{\partial x} = \alpha [\theta_3(h, y, \tau) - T_{\text{ч}}] - q_{\text{ч}}, \quad (9)$$

где α – коэффициент теплообмена между защитным костюмом и человеком, Вт/(м²·К);

h – толщина оболочки теплозащитного костюма, м;

$T_{\text{ч}}$ – температура тела человека, К;

$q_{\text{ч}}$ – мощность теплового потока, поступающего от человека в подкостюмное пространство в зависимости от степени тяжести выполняемой человеком работы, Вт/м².

Между слоями защитного костюма примем равенство тепловых потоков:

$$\lambda_{x1} \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \lambda_{x2} \frac{\partial \theta_2}{\partial x}; \quad \lambda_{x2} \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = \lambda_{x3} \frac{\partial \theta_3}{\partial x}, \quad (10)$$

а также температур:

$$\theta_1 = \theta_2; \quad \theta_2 = \theta_3. \quad (11)$$

Здесь λ_{x1} , λ_{x2} , λ_{x3} – коэффициенты теплопроводности в слоях защитного костюма в направлении оси x , Вт/(м·К).

В направлении оси y , между трубками с охлаждающей водой, примем: на оси симметрии при $y = 0$

$$\frac{\partial \theta_i(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

а на оси y' , пересекающей центр симметрии трубки, при $y = l + d/2$

$$\frac{\partial \theta_1(x, l + d/2, \tau)}{\partial y} = 0; \quad \theta_2(x, l + d/2, \tau) = T_0; \quad \frac{\partial \theta_3(x, l + d/2, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

где l – расстояние по оси симметрии между ближайшими трубками, м;
 d – диаметр трубки, м.

При этом предполагаем, что трубки расположены в поперечном сечении по всей ширине воздушной прослойки и температура воды в них увеличивается не более чем на 10 % от начальной температуры T_0 за счет высокой скорости движения воды в трубках.

Получить аналитическое решение задачи в данном случае невозможно. Поэтому применим численный метод конечных разностей для получения решения задач с вышеприведенными начальными и граничными условиями [4, 5].

Рассмотрим двумерную область с осями x и y (рис. 3) в каждом слое теплозащитного костюма.

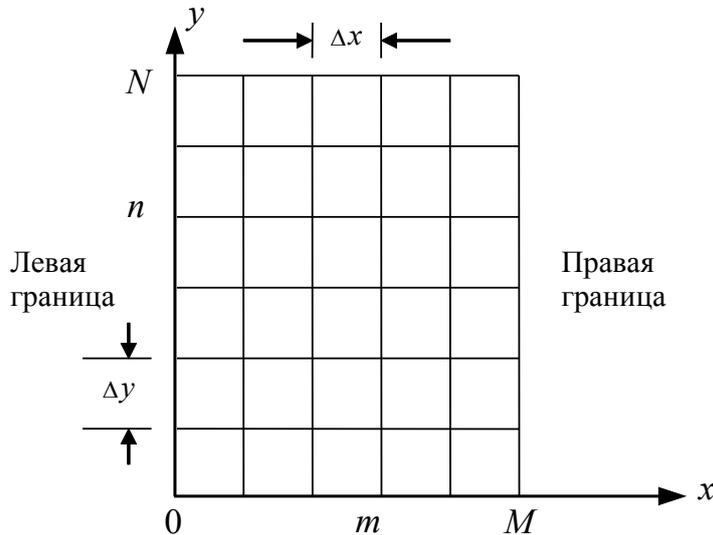


Рис. 3. Условное разбиение каждого слоя теплозащитного костюма на M равных отрезков длиной Δx и на N равных отрезков длиной Δy

Произведем его условное разбиение на элементы: вдоль оси x – на M частей, вдоль оси y – на N частей. Здесь m означает номер шага по x , а n – номер шага по y . Обозначим номер шага по времени через p .

Таким образом, имеем сетку, в узлах которой определяют значения температуры в каждом защитном слое. С течением времени температура будет меняться и указывать на изменение теплового поля в слоях теплозащитного костюма. Представим уравнение (3), а также начальные и граничные условия (4), (8) – (13) в конечных разностях. В результате в явном виде получим, опуская индекс i , для каждого защитного слоя аналог уравнения (3):

$$\bar{\theta}_{m,n}^{p+1} = \bar{\theta}_{m,n}^p + \bar{a}_x(\bar{\theta}_{m-1,n}^p - 2\bar{\theta}_{m,n}^p + \bar{\theta}_{m+1,n}^p) + \bar{a}_y(\bar{\theta}_{m,n-1}^p - 2\bar{\theta}_{m,n}^p + \bar{\theta}_{m,n+1}^p), \quad (14)$$

где $\bar{a}_x = a\Delta\tau / \Delta x^2$ – безразмерный коэффициент температуропроводности вдоль оси x ;

$\bar{a}_y = a\Delta\tau / \Delta y^2$ – безразмерный коэффициент температуропроводности вдоль оси y ;

$\bar{\theta} = \frac{\theta - T_0}{T_H - T_0}$ – безразмерная температура;

m – номер шага по x ;

n – номер шага по y ;

p – номер шага по времени.

Согласно (4) начальным условием в каждом слое будет

$$\bar{\theta}_{m,n}^0 = 0. \quad (15)$$

Формулу (8) в конечных разностях можно представить в виде

$$\Delta\bar{\theta}_1(0, y, \tau) = -\bar{\sigma}(T_H) \left[\bar{T}_H - \bar{\theta}_1(0, y, \tau) \right], \quad (16)$$

где $\bar{\sigma} = \Delta x(\alpha_0 + \varepsilon\sigma\bar{T}_H^3) / \lambda_1$ – безразмерный коэффициент конвективного и лучистого теплообмена.

Преобразуя формулу (16) относительно температуры на поверхности теплозащитного костюма ($m = 0$), получим

$$\bar{\theta}_{1,0,n}^p = \frac{\bar{\theta}_{1,1,n} + \bar{\sigma}\bar{T}_H}{1 + \bar{\sigma}}. \quad (17)$$

Из формулы (17) следует, что чем больше тепловой поток извне, тем больше будет температура на поверхности теплозащитного костюма.

С другой стороны, представляя формулу (9) в конечных разностях, получим формулу для расчёта температуры в месте контакта с телом спасателя:

$$\bar{\theta}_{3,M,n}^p = \frac{\bar{\theta}_{3,M-1,n}^p + \bar{\alpha}\bar{T}_q + \bar{q}}{1 + \bar{\alpha}}, \quad (18)$$

где $\bar{\alpha} = \alpha\Delta x / \lambda_3$ – безразмерный коэффициент теплообмена с телом спасателя;

$\bar{q} = q\Delta x / \lambda_3$ – относительная мощность потока теплоты от спасателя;

$\bar{T}_q = \frac{T_q - T_0}{T_n - T_0}$ – безразмерная температура тела человека.

Из формулы (18) следует, что при увеличении коэффициента теплообмена с телом спасателя уменьшается градиент его температуры и температура на внутренней поверхности теплозащитного костюма. И, наоборот, при отсутствии теплообмена с телом спасателя ($\bar{\alpha} = 0$) на этой поверхности температура приближается к температуре, зависящей исключительно от внешней среды.

Равенства (10) в конечных разностях между первым и вторым слоями примут вид

$$\bar{\theta}_{1,M,n}^p = \bar{\theta}_{2,0,n}^p = \frac{\bar{\theta}_{1,M-1,n}^p + \bar{\lambda}_{2-1}\bar{\theta}_{2,1,n}^p}{1 + \bar{\lambda}_{2-1}}. \quad (19)$$

Аналогично получим – между вторым и третьим слоями

$$\bar{\theta}_{2,M,n}^p = \bar{\theta}_{3,0,n}^p = \frac{\bar{\theta}_{2,M-1,n}^p + \bar{\lambda}_{3-2}\bar{\theta}_{3,1,n}^p}{1 + \bar{\lambda}_{3-2}}. \quad (20)$$

Здесь $\bar{\lambda}_{2-1} = \lambda_2 / \lambda_1$; $\bar{\lambda}_{3-2} = \lambda_3 / \lambda_2$ – относительные коэффициенты теплообмена между слоями защитного костюма.

Из формул (19) и (20) следует, что температура между слоями теплозащитного костюма зависит от внутренних температур слоёв.

Следовательно, в конечных разностях во всех слоях одежды получим

$$\bar{\theta}_{m,0}^p = \bar{\theta}_{m,1}^p. \quad (21)$$

На оси y' согласно (13) в конечных разностях получим следующие граничные условия:

$$\bar{\theta}_{1,m,N}^p = \bar{\theta}_{1,m,N}^p; \quad \bar{\theta}_{1,m,N}^p = 0; \quad \bar{\theta}_{3,m,N}^p = \bar{\theta}_{3,m,N-1}^p. \quad (22)$$

Эти условия свидетельствуют о том, что в месте расположения трубок во втором слое температура будет всё время начальной или близкой к ней, а между ближайшими верхним и нижним слоями (относительно оси x) тепловой поток отсутствует в силу симметрии расположения трубок.

Таким образом, производя расчёты по полученной формуле (14) и используя начальное условие (15), а также граничные условия (16) – (22), можно выполнять исследование нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – изолирующая оболочка – средство охлаждения – тело спасателя».

Выводы. Разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в противотепловых костюмах спасателя с проточным водяным охлаждением. Предложенный численный метод ее реализации позволяет определить максимально допустимое расстояние между охлаждающими трубками, необходимый диаметр и длину трубок контура водяного охлаждения для обеспечения безопасности спасателя при тушении пожаров.

Список литературы / References

1. Онасенко А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в противогазотепловом костюме с водоледяными охлаждающими элементами / А.А. Онасенко, И.Ф. Марийчук // Форум гірників – 2005: матер. міжнарод. конф. 12 – 14 жовтня 2005. – Т. 3. – Днепропетровск: ГНУ, 2005. – С. 206 – 214.

Onasenko, A.A. and Mariychuk, I.Ph. (2005). *Matematicheskoye modelirovaniye teploobmennyykh protsessov v protivogazoteplovom kostyume s vodoledyanymi okhlazhdayushchimi elementami* [Mathematical modeling of heat exchange processes in the heat-gas protective suit with water ice cooling elements]. *Forum girnykiv 2005: mater. mizhnarod. konf., 12-14 zhovtnia 2005* [Proc. of the Int. Conf. “Forum of Miners 2005”, October, 12-14 2005]. Dnepropetrovsk, GNU, vol. 3, pp. 206 – 214.

2. Онасенко А.А. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек» / А.А. Онасенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. – Вып. 42. – С. 120 – 125.

Onasenko, A.A. (2005). *Teploobmenyye protsessy v sisteme “okruzhayushchaya sreda – okhlazhdayushchiy zhilet – chelovek”* [Heat exchange processes in the system “environment – cooling jacket – man”]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD “Respirator”* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, issue 42, pp. 120 – 125.

3. Марийчук И.Ф. Математическая формулировка задач исследований теплообменных процессов в контейнере с водоледяными аккумуляторами

холода / И.Ф. Марийчук, В.О. Положий // Вісті Донецького гірничого інституту: зб. наук. праць ДонНТУ. – Донецьк, 2008. – № 1. – С. 44 – 54.

Mariychuk, I.Ph. and Polozhiy, V.O. (2008). *Matematicheskaya formulirovka zadach issledovaniy teploobmennykh protsessov v konteynere s vodoledyanymi akkumulyatorami kholoda* [Mathematical formulation of the problems of investigation of heat exchange processes in a container with water ice cold accumulators]. *Visti Donets'kogo girnychogo instytutu: zb. nauk. prats' DonNTU* [Proc. of the Donetsk Mining Institute of the DonNTU “News”]. Donetsk, no. 1, pp. 44 – 54.

4. Положий В.О. Индивидуальная противогазотепловая защита / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Уголь Украины. – 2008. – № 12. – С. 26 – 28.

Polozhiy, V.O. and Mariychuk, I.Ph. (2008). *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita* [Individual heat-gas protection]. *Ugol Ukrainy*, no. 12, pp. 26 – 28.

5. Булгаков Ю.Ф. Индивидуальная противогазотепловая защита / Ю.Ф. Булгаков, С.В. Борщевский, И.Ф. Марийчук. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – 385 с.

Bulgakov, Yu.F., Borshchevskiy, S.V. and Mariychuk, I.Ph. (2015). *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita* [Individual heat-gas protection]. Donetsk, DonNTU, 385 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 22.06.2015

Purpose. To work out the mathematical model of the non-stationary heat-mass exchange processes in the heat protective suits with one-through water cooling.

Methods. Theoretical investigation of the non-stationary heat-mass exchange processes on the basis of the laws of thermodynamics and thermal conductivity.

Results. The mathematical model of the non-stationary heat-mass exchange processes in the heat protection system with one-through water cooling has been developed. It takes into account the radiant and convective flows of the environment as well the convective heat flows from the side of a man depending on difficulty of his active job. The numerical method of realization of the mathematical model allowing the scientifically grounded ascertainment of the necessary distance between the tubes with cooling water and choice of their optimum diameter by creation of the heat protection of the rescuer is proposed.

Scientific novelty. The non-stationary heat-mass exchange processes in the heat protective suits with one-through water cooling were considered for the first time.

Keywords: temperature, heat exchange, heat protection, rescuer, one-through water cooling system, mathematical model, length of tubes, diameter of tubes.

УДК 614.894.7

Л.А. Зборщик, науч. сотр., В.В. Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по науч. работе, Р.С. Плетенецкий, нач. отд., В.В. Говжеев, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

ЗАЩИТА ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ

L.A. Zborshchik, scientific associate, V.V. Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director for science, R.S. Pletenetskiy, head of department, V.V. Govzheyev, scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

PROTECTION OF BREATHING ORGANS BY FIRES

Цель. Определение зависимости сопротивления дыханию от формы регенеративного патрона дыхательного аппарата.

Методика. Статистический анализ результатов исследований дыхательного аппарата на лабораторных стендах.

Результаты. Проведенные практические исследования показали более низкое сопротивление дыханию в самоспасателе с радиальным направлением потока газовой смеси в регенеративном патроне по сравнению с прямоточными регенеративными патронами.

Новизна. В самоспасателе применен регенеративный патрон с радиальным направлением потока газовой смеси.

Практическая значимость. Разработан самоспасатель для защиты органов дыхания человека при пожарах.

Ключевые слова: изолирующие средства защиты дыхания, самоспасатель с химически связанным кислородом, эвакуация при пожаре.

Постановка проблемы. Анализ причин гибели людей на пожарах показал, что наиболее часто летальный исход у пострадавших наступает от отравления продуктами горения. Это обусловлено тем, что в современных условиях на любом производстве, в зданиях с массовым пребыванием людей и в квартирах имеются изделия из резинотехнических и синтетических материалов, которые под воздействием температуры разлагаются и выделяют значительное количество токсичных веществ, что становится причиной многочисленных отравлений и гибели людей [1].

При горении современных синтетических материалов образуется более 200 токсичных газообразных продуктов (оксид углерода, бензол, синильная кислота, фосген, хлористый водород, акролеин, хлор, оксиды азота и др.) в концентрациях, превышающих предельно допустимые в тысячи и более раз. Объемная доля оксида углерода может достигнуть 1,1...2,7 %, диоксида углерода – до 10 %, кислорода – уменьшается до 10...11 % [2]. Установлено, что при нехватке кислорода и наличии диоксида углерода происходит увеличение легочной вентиляции, значительное поступление в организм ядов, присутствующих во вдыхаемых газовых смесях. Наблюдается также эффект аддитивного действия ядов при их совместном поступлении в организм, а также усиление токсического действия при повышении температуры в условиях пожара.

Особенно опасно при пожарах снижение объемной доли кислорода, характерное при нахождении людей в закрытых и задымленных помещениях. Объемная доля кислорода во вдыхаемом воздухе ниже 14...15 % вызывает гипоксию, что приводит к кислородному голоданию. Поэтому для защиты людей в местах массового их пребывания необходимо использовать изолирующие средства защиты органов дыхания, которые обеспечивают пригодным для дыхания воздухом при любой концентрации в окружающей среде токсичных веществ и полном отсутствии кислорода.

В таких случаях для обеспечения жизнедеятельности человека необходимо создание локальной искусственной газовой среды для нормального дыхания, оптимальных или допустимых условий микроклимата. Для этого применяют системы жизнеобеспечения, служащие для коллективной или индивидуальной защиты органов дыхания.

Анализ разработок. Создан широкий спектр средств индивидуальной защиты органов дыхания. Это связано с тем, что человек использует их в самых разнообразных сферах жизни.

По степени защиты от газового состава окружающей среды средства индивидуальной защиты органов дыхания делят на две группы: фильтрующие и изолирующие [3].

В фильтрующих аппаратах очистка вдыхаемого воздуха от вредных веществ (газов, аэрозолей, пыли) происходит при его прохождении через фильтрующий патрон или фильтрующий материал. К положительным качествам таких аппаратов относятся: простота конструкции, небольшие масса и габариты, относительно невысокая стоимость. Однако их нельзя использовать в тех случаях, когда объемная доля кислорода в воздухе составляет менее 17 %. Также применение фильтрующих аппаратов имеет ограничение при высоких концентрациях вредных токсичных веществ или когда неизвестна их концентрация в окружающей среде [4, 5].

В отличие от фильтрующих изолирующие средства индивидуальной защиты органов дыхания не зависят от состава окружающей среды и полностью изолируют органы дыхания человека от вредного влияния токсичных веществ за счет обеспечения чистым воздухом из самого аппарата. Их применяют при полном отсутствии кислорода в окружающей среде и при неустановленном составе вредных примесей в воздухе. Наибольшее распространение получили аппараты с химически связанным и сжатым кислородом.

Накоплен значительный опыт разработки, промышленного выпуска и применения аппаратов со сжатым кислородом, благодаря чему их конструкция достаточно совершенна и надежна.

Однако специалисты в области создания средств индивидуальной защиты органов дыхания считают, что при пожарах наиболее надежна защита людей от ингаляционных поражений изолирующими средствами с химически связанным кислородом. Они обладают меньшей массой и габаритами, имеют длительные

(до 10 лет) сроки хранения, проще по конструкции и в изготовлении, дешевле и практически не требуют технического обслуживания при эксплуатации.

Следует отметить, что создание самоспасателя с химически связанным кислородом с низким сопротивлением дыханию и приемлемыми массогабаритными характеристиками – непростая задача.

Результаты исследований. В связи с этим НИИГД «Респиратор» разработан гражданский изолирующий самоспасатель 1ГИС-25, представляющий собой малогабаритный аппарат с химически связанным кислородом [6, 7]. В состав аппарата входят: регенеративный патрон, пусковое устройство, воздухопроводная система с теплообменником, лицевая часть, включающая в себя полумаску с оголовьем и защитный капюшон.

В гражданском самоспасателе принята схема изолирующего дыхательного аппарата с химически связанным кислородом с маятниковым направлением газоздушного потока, являющимся оптимальным для аппаратов данного класса. Новое конструкторское решение в самоспасателе – применение в регенеративном патроне радиального направления газоздушной смеси (так называемый патрон с «развернутым» слоем). Применение патрона подобного типа позволяет уменьшить сопротивление дыханию, которое является одним из главных критических параметров для самоспасателей данного типа.

Пусковое устройство конструктивно выполнено отдельным от патрона элементом, соединенным своей полостью с дыхательным мешком. Подобное исполнение пускового устройства позволяет избежать попадания продуктов отработки пускового брикета на кислородсодержащее вещество регенеративного патрона, что могло бы негативно сказаться на работе патрона.

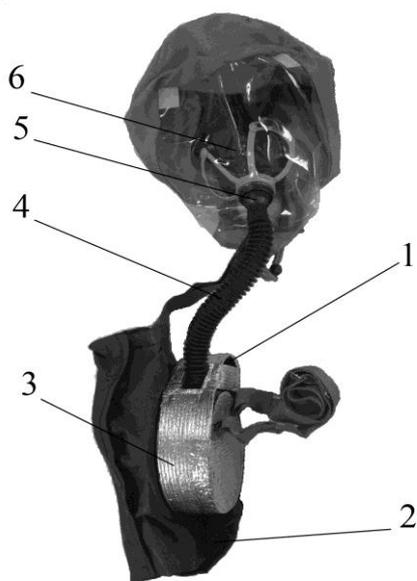


Рис. 1. Самоспасатель 1ГИС-25 в рабочем состоянии:

- 1 – пусковое устройство; 2 – дыхательный мешок; 3 – регенеративный патрон;
- 4 – гофрированная трубка; 5 – патрубок;
- 6 – полумаска

В качестве лицевой части используют полумаску с капюшоном, которая обеспечивает хорошую обтюрацию и удобна для неподготовленных пользователей, капюшон же обеспечивает защиту органов зрения от дыма, а также дополнительную обтюрацию. На затылочной части капюшона расположена светоотражающая пленка. Аппарат размещают в герметичной вакуумированной упаковке (чехле), которую укладывают в пластмассовый футляр, снабженный запором для пломбирования (рис. 1).

Самоспасатель предназначен для эксплуатации при температуре окружающей среды от минус 5 °С до плюс 60 °С, относительной влажности до 100 % при температуре 35 °С (см. таблицу).

Техническая характеристика самоспасателя 1ГИС-25

| | |
|--|-----|
| Время защитного действия, мин, не менее: при легочной вентиляции 35 дм ³ /мин и температуре окружающей среды (25±2) °С | 25 |
| при легочной вентиляции 10 дм ³ /мин (в состоянии покоя, ожидании помощи) | 100 |
| Сопротивление дыханию самоспасателя за время защитного действия, кПа, не более | 0,8 |
| Температура вдыхаемой из самоспасателя газовой смеси, °С, не более | 55 |
| Объемная доля диоксида углерода во вдыхаемой газовой смеси в течение времени защитного действия, %, не более | 3,0 |
| Масса самоспасателя в состоянии готовности к применению, кг, не более | 2,1 |
| Габариты самоспасателя в футляре, мм, не более: высота | 110 |
| ширина | 195 |
| длина | 310 |
| Назначенный срок хранения самоспасателя в ожидании применения (от даты изготовления до списания), годы | 5 |

Принцип работы самоспасателя (см. рис. 1) следующий: при нажатии кнопки пускового устройства оно срабатывает с выделением кислорода, влаги и теплоты. Кислород заполняет дыхательный мешок, что позволяет человеку дышать в период разработки кислородсодержащего продукта в регенеративном патроне, а влага и теплота способствуют ускорению этого процесса. В регенеративный патрон по гофрированной трубке через патрубок из полумаски поступает выдыхаемый воздух. В патроне воздух очищается от диоксида углерода, обогащается кислородом и поступает в дыхательный мешок. При вдохе воздух из дыхательного мешка следует в обратном направлении, дополнительно обогащаясь кислородом, и поступает в дыхательные пути человека. Избыточное количество воздуха удаляется автоматически через избыточный клапан.

Процесс очистки воздуха и его обогащение кислородом происходят с выделением теплоты, поэтому при дыхании корпус самоспасателя постепенно нагревается, а вдыхаемый воздух становится теплым, что свидетельствует о нормальной работе аппарата.

В соответствии с разработанной конструкторской документацией изготовлена опытная партия самоспасателей 1ГИС-25, которая успешно прошла предварительные и приемочные испытания.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность избранной конструктивной схемы регенеративного патрона. Патрон с радиальным направлением газоздушного потока в процессе работы имеет более низкий уровень сопротивления дыханию по сравнению с традиционным прямоточным патроном (рис. 2).

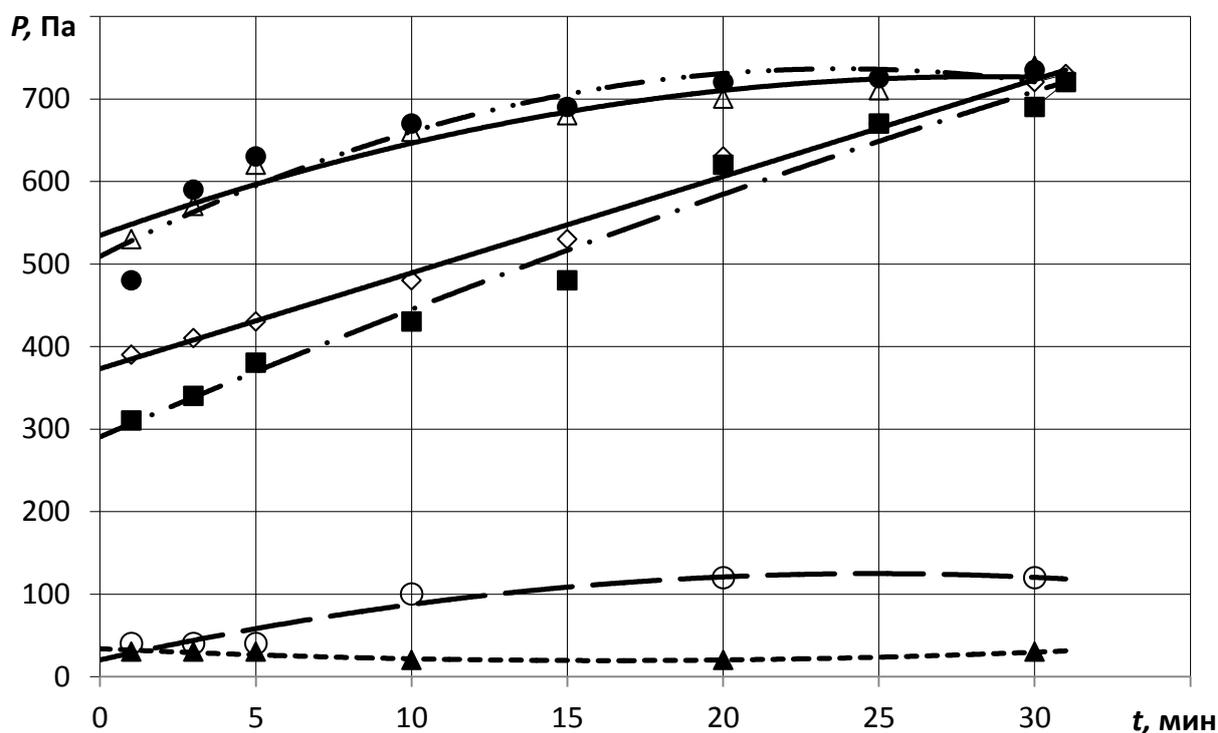


Рис. 2. Динамика сопротивления дыханию в самоспасателях 1ГИС-25 и СИ-30:

- ◇— при вдохе и нагрузке средней тяжести (1ГИС-25);
- при выдохе и нагрузке средней тяжести (1ГИС-25);
- - -▲- - - при вдохе и легкой нагрузке (1ГИС-25);
- при выдохе и легкой нагрузке (1ГИС-25);
- △— при вдохе и нагрузке средней тяжести (СИ-30);
- при выдохе и нагрузке средней тяжести (СИ-30)

Выводы. Испытания опытной партии самоспасателей 1ГИС-25 подтвердили, что разработанный малогабаритный изолирующий дыхательный аппарат с химически связанным кислородом соответствует современному техническому уровню, обладает комфортными условиями дыхания для гражданского населения. Самоспасатель обеспечивает защиту органов дыхания

и зрения человека от воздействия не пригодной для дыхания среды, образующейся при пожарах в отелях, производственных помещениях, школах, больницах, офисах, жилых домах, метрополитене.

Список литературы / References

1. Тудос А. Самоспасатели / А. Тудос // Охрана труда и социальное страхование. – 2000. – № 6. – С. 39 – 43.

Tudos, A. (2000). *Samospasateli* [Self-rescuers]. *Okhrana truda i sotsialnoye strakhovaniye*, no. 6, pp. 39 – 43.

2. Грачев В.А. Газодымозащитная служба / В.А. Грачев, Д.В. Поплавский. – М.: Пожтехника, 2004. – 379 с.

Grachyev, V.A. and Poplavskiy, D.V. (2004). *Gazodymozashchitnaya sluzhba* [Gas and smoke protection service]. Moscow, Pozhtekhnika, 379 p.

3. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: (EN 133:2001, IDT):ДСТУ EN 133:2005.

State Standard of the Ukraine (EN 133:2001, IDT):ДСТУ EN 133:2005. *Sredstva individualnoy zashchity organov dykhaniya* [Respiratory protective devices]. (In Ukrainian).

4. Правила выбора и применения средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД): НПАОП.0.00-1.04-07. – Киев, 2007. – 32 с. (Нормативно-правовой акт по охране труда).

Pravila vybora i primeneniya sredstv individualnoy zashchity organov dykhaniya (SIZOD): НПАОП.0.00-1.04-07 (Normativno-pravovoy akt po okhrane truda) [Regulations on selection and application of respiratory protective devices (normative legal act on labour protection): НПАОП.0.00-1.04-07] (2007). Kiev, 32 p.

5. Средства индивидуальной защиты органов дыхания для самоспасения. Фильтрующие устройства с капюшоном для самоспасения во время пожара. Требования, испытания, маркировка: (EN 403:1993, IDT):ДСТУ EN 133:2005.

State Standard of the Ukraine (EN 403:1993, IDT):ДСТУ EN 133:2005. *Sredstva individualnoy zashchity organov dykhaniya dlya samospaseniya. Filtruyushchiye ustroystva s kapyushonom dlya samospaseniya vo vremya pozhara. Trebovaniya, ispytaniya, markirovka* [Respiratory protective devices for self-rescue. Filter devices with a hood for self-rescue during a fire. Requirements, tests, marking] (2005). (In Ukrainian).

6. Пат. 47408 UA A62B, 25.01.2010. Ізолювальний дихальний апарат / Л.О. Зборщик, М.М. Ковалевська, П.С. Пашковський, Е.Г. Ільїнський; НДІГС «Респіратор». – № u200912199; заявл. 27.11.2009; опубл. 25.01.2010. Бюл. № 2.

Zborshchik, L.A., Kovalevskaya, M.M., Pashkovskiy, P.S., Il'inskiy, E.G. (2009). *Izoliuvalniy dykhalnyi aparat* [Self-contained breathing apparatus]. Pat. of the Ukraine 47408 UA A62B, no. u200912199.

7. Пат. 56898 UA A62B 19/00, A62B 7/08. Регенеративний патрон ізолювального дихального апарата / М.М. Ковалевська, Е.Г. Ільїнський, Р.С. Плетенецький; НДІГС «Респіратор». – № u201009989; заявл. 12.08.2010; опубл. 25.01.2011. Бюл. № 2.

Kovalevskaya, M.M., Il'inskiy, E.G., Pletenetskiy, R.S. (2010). *Regeneratyvnyi patron izolyuvalnogo dykhalnogo aparata* [Regenerative cartridge of a self-contained breathing apparatus]. Pat. of the Ukraine 56898 UA A62B 19/00, A62B 7/08, no. u201009989.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.Г. Богатыревым.
Дата поступления рукописи 22.05.2015*

Purpose. Determination of the dependence of the respiratory resistance on the form of a regenerative cartridge of a breathing apparatus.

Methodology. Statistical analysis of results of investigations of the breathing apparatus stand-tested in the laboratory.

Results. The practical investigations carried-out have shown the lower breathing resistance in a self-rescuer with a regenerative cartridge having the radial direction of the gas-air mixture flow in comparison to the direct-flow regenerative cartridges.

Novelty. The regenerative cartridge with the radial direction of the gas-air mixture flow was used in the self-rescuer.

Practical value. The self-rescuer was developed to save the breathing organs of a man by the fires.

Keywords: self-contained breathing protection means, self-rescuer, chemical oxygen type, evacuation by the fire.

УДК 536.242

Е.Л. Завьялова, канд. техн. наук, доц., О.П. Чепак, магистрант Донецкого национального технического университета, Донецк

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ В КАРЬЕРАХ

*Ye.L. Zavyalova, Cand. Sci. (Tech.), associate professor, O.P. Chepak, postgraduate
(Donetsk National Technical University, Donetsk)*

PARAMETERS OF THE TECHNOLOGY OF RESTORATION OF BIOLOGICAL DIVERSITY IN OPEN PITS

Цель. Определение параметров технологии восстановления биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров на основании раскрытия закономерностей теплообмена между породным массивом и водной средой при использовании геотермальных теплообменников в биоочистном сооружении.

Методика. Комплексный подход, включающий анализ литературных источников, посвященных вопросам восстановления биологического разнообразия на остающихся после выемки полезного ископаемого территориях, теоретические исследования переноса теплоты от породного массива к теплоносителю в геотермальном теплообменнике, расчетно-аналитический метод при определении основных параметров технологии.

Результаты. Определены основные параметры технологии восстановления биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров с использованием геотермальной энергии для поддержания в зимний период температуры, необходимой для жизнедеятельности гидробионтов, участвующих в процессе очистки воды.

Научная новизна. Установленные закономерности теплообмена между породным массивом и водной средой при использовании геотермальных теплообменников в биоочистном сооружении позволили определить зависимость температуры воды от глубины скважины. Использование глинографитной смеси в пространстве между кожухом теплообменника и грунтом позволит увеличить удельный теплосъем более чем в 5 раз и уменьшить глубину скважины в 1,7 раза.

Практическая значимость. Поддержание необходимой температуры воды в биоочистителе создаст комфортные условия для жизнедеятельности гидробионтов круглогодично и таким образом будет способствовать восстановлению биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров.

Ключевые слова: выработанные пространства карьеров, геотермальная энергия, гидробионты, биологическое разнообразие, глинографитная смесь.

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. На сегодняшний день в горно-добывающей промышленности существует ряд экологических проблем. Одна из них – восстановление биоразнообразия карьерного пространства при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Благодаря значительным запасам полезных ископаемых, расположенных близко к дневной поверхности, развитой индустриальной базе на большинстве предприятий цементной промышленности используют открытый способ разработки полезных ископаемых. Он наиболее перспективен в технологическом и экономическом отношениях. Вместе с тем на предприятиях

недостаточен уровень природоохранных и ресурсосберегающих технологий. Остающиеся после выемки исходного сырья, например мела или мергеля, выработанные пространства представляют собой безжизненный пейзаж – лишённые плодородного почвенного слоя впадины со склонными к эрозионному разрушению бортами. Горно-добывающие работы убивают растения, изменяют микроценоз, разрушают плодородный слой, консументы лишаются мест своего обитания из-за нарушения пищевой цепочки и условий жизни в целом. Самопроизвольное восстановление флоры и фауны на этих территориях занимает сотни лет, а иногда остается невозможным.

Результаты анализа последних исследований и публикаций. Ускорить процесс формирования биогеоценоза в выработанных пространствах карьеров можно, только создав для этого необходимые гидрогеологические условия. Предложен способ, позволяющий ускорить восстановление биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров путем очистки воздуха и гидросферы, возрождения флоры и фауны на основе круглогодичного управления состоянием потоков карьерных вод за счет использования геотермальной энергии [2].

Основной водоприток в карьер происходит из водоносного горизонта, который показан с левого борта карьера (рис.1). Выработанное пространство схематично представлено в виде прямоугольника. В центре выработанного пространства расположена основная дамба, сооружаемая из железобетона, или насыпная, из не склонных к размоканию материалов, например из кусков песчаника, известняка, оработанных автомобильных скатов, строительных или других отходов четвертого класса.

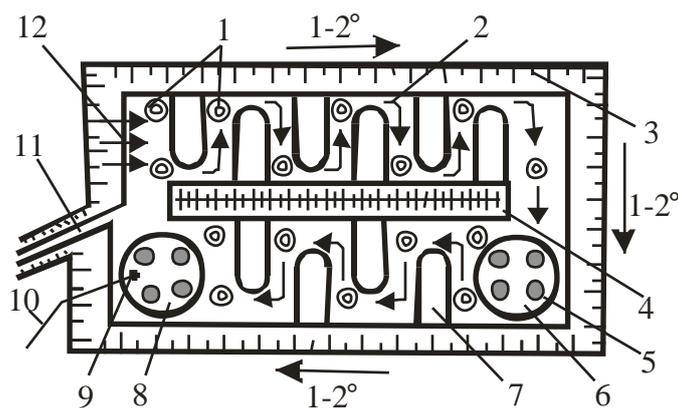


Рис. 1. Схема сооружения для очистки воды карьера с использованием геотермальной энергии:

- 1 – вертикальный скважинный коллектор «труба в трубе»; 2 – русло; 3 – борт карьера;
 4 – основная дамба; 5 – скважины, заполненные теплопроводной смесью; 6 – отстойник № 1;
 7 – дополнительная дамба; 8 – основной отстойник; 9 – насос; 10 – труба для откачивания
 воды; 11 – въездная полутраншея; 12 – водоприток

Основная функция дамбы – разделить дно карьера для создания возможности кругового движения водного потока, тем самым увеличив путь движения воды и обеспечив продолжительность её физической и биологической очистки. Для увеличения длительности прохождения воды через выработанное пространство, тем самым увеличения степени очистки воды, созданы вспомогательные дамбы, разделяющие верхнюю и нижнюю часть карьера. Вспомогательные дамбы расположены в шахматном порядке. В областях расположения дамб предусмотрено образование болотистой среды с обильной растительностью. Основой дамбы будут служить бетонные блоки или каменистые насыпи из не склонных к размоканию горных пород, перекрытые слоем чернозёма. Для минимизации эрозии и вымывания почвы поверхность дамб заселяют растениями.

Кроме того, широко известна способность высших водных растений очищать воду. Основная идея низкзатратной фитотехнологии состоит в использовании природных элементов защиты рек от загрязнения и очистки воды, которые используют для своего функционирования солнечную энергию и не нуждаются в обслуживании [1]. К таким элементам, в первую очередь, относится высшая водная растительность: камыш, тростник, рогоз, рдест, аир и многие другие.

К дискуссионным вопросам, связанным с эксплуатацией сооружений фитотехнологии, относится зимний режим. Чтобы избежать снижения эффективности очистки воды в зимний период, необходимо поддержание температуры воды в очистном сооружении на уровне 10...12 °С.

Для круглогодичной очистки воды по руслу водотока справа и слева от вспомогательных дамб предложено пробурить скважины, располагая в них вертикальный скважинный коллектор «труба в трубе». Вода из водоносного горизонта попадает в межтрубное пространство и за счет скоростного напора движется вниз по трубе. По мере продвижения происходит теплообмен между стенкой металлической трубы с температурой вмещающих пород и водным потоком, в результате чего температура воды повышается. В нижней части трубы поток за счет скоростного напора и разности плотностей нагретой и холодной воды меняет направление на 180° и поднимается по внутренней пластиковой трубе на поверхность.

Поддержание необходимой температуры воды в биоочистителе круглый год предотвратит промерзание мелководных потоков, обеспечит круглогодичную очистку воды и воздуха.

Постановка задачи. Цель работы – определение параметров технологии восстановления биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров на основании раскрытия закономерностей теплообмена между породным массивом и водной средой при использовании геотермальных теплообменников в биоочистном сооружении.

Результаты исследований. Для определения параметров технологии восстановления биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров произведен тепловой и гидравлический расчет.

Коаксиальный теплообменник (рис. 2) представляет собой стальной цилиндрический кожух диаметром D , закрытый снизу, который помещен в пробуренную скважину. В этом кожухе коаксиально размещена труба из специального плохо проводящего теплоту материала (например, пластика) диаметром d , открытая снизу. Вода, опускаясь по кольцевому каналу вниз, нагревается земной теплотой. Нагретая вода поднимается по внутренней трубе вверх на поверхность земли.

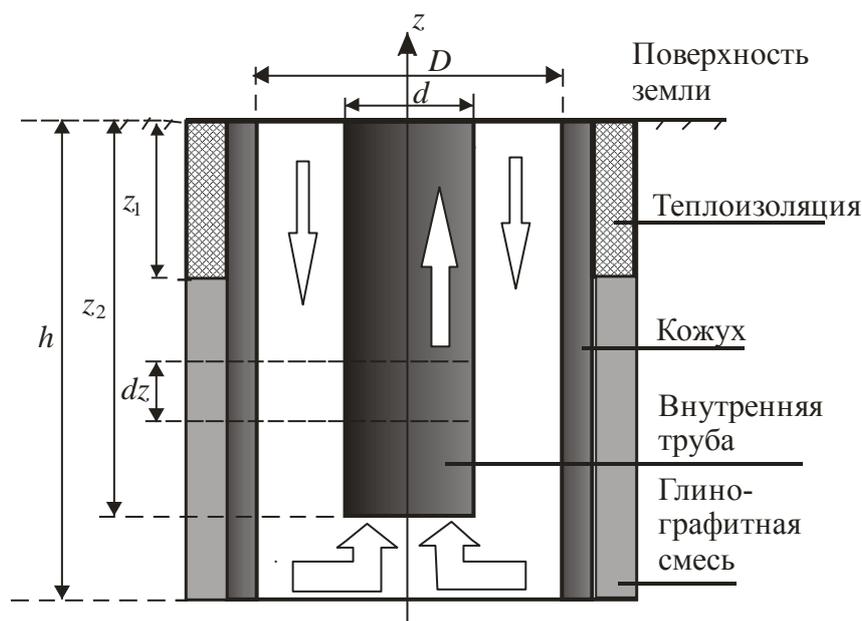


Рис. 2. Схема теплообмена в геотермальной скважине

Такая конструкция является экологичной, поскольку структуру глубинного грунта не затрагивает. Очевидно, что от поверхности земли до некоторой глубины окружающие слои земли будут холоднее, чем вода, и произойдет потеря теплоты. Для предотвращения этой потери необходима частичная теплоизоляция стального кожуха. На оставшейся части длины коллектора пространство между стенкой скважины и поверхностью кожуха заполняют для улучшения теплообмена глинографитной смесью, теплопроводность которой выше теплопроводности вмещающих пород.

Принимаем следующие допущения:

- теплообменом между слоями воды вдоль оси z пренебрегаем;
- теплообменом через внутреннюю трубу пренебрегаем, т.е. считаем температуру нагретой воды постоянной; $T_2 = \text{const}$;
- температура внешней поверхности скважины – постоянная и равна температуре грунта T_1 , соответствующей глубине бурения;

• температура грунта – постоянная (восстанавливается за счет геотермальной энергии).

В соответствии с этими допущениями задача теплообмена – стационарная. Выделим элементарный участок dz на кольцевом канале скважины. Количество теплоты, попадающей через выделенный кольцевой зазор от грунта к воде:

$$dQ = \pi Dk(T_r - T)dz, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 $T = T(z)$ – текущая температура воды, К.

Это же количество теплоты поглощает вода:

$$dQ = cMdT, \quad (2)$$

где M – расход воды, кг/с;

c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

$$M = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\rho v, \quad (3)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;

v – скорость течения воды по кольцевому зазору, м/с.

Сравнивая уравнения (1) и (2), имеем

$$dT = \frac{\pi Dk}{M}(T_r - T)dz. \quad (4)$$

Принимаем, что температура грунта изменяется по линейному закону:

$$T_r = T_{z0} + \text{grad}T_r z, \quad (5)$$

где T_{z0} – температура поверхности земли, К;

$\text{grad}T_r$ – температурный градиент грунта, К/м;

z – расстояние от поверхности земли, м;

$z > z_1$ – глубина, до которой температура грунта остается постоянной (для условий Донбасса $z_1=15$ м; $T_r=T_{z0}$).

Обозначим комплекс $A = \frac{\pi Dk}{Mc}$, тогда

$$dT = A \left(T_{z0} + \text{grad}T_{\Gamma} - T \right) dz, \quad (6)$$

$$\frac{dT}{dz} + AT = A \left(T_{z0} + \text{grad}T_{\Gamma}z \right). \quad (7)$$

Это нелинейное дифференциальное уравнение с правой частью вида

$$y' + P(z)y = Q(z), \quad (8)$$

где $y = T$; $P(z) = A$; $Q(z) = A(T_{z0} + \text{grad}T_{\Gamma}z)$.

Его решение имеет вид

$$y = e^{-\int Pdz} \left(\int Qe^{\int Pdz} dz + C \right), \quad (9)$$

где C – const интегрирования.

В нашем случае решение принимает вид

$$T = e^{-\int Adz} \left(\int \frac{A}{T_{z0}} + \text{grad}T_{\Gamma}z \right) e^{\int Adz} dz + C. \quad (10)$$

$\int Adz = Az$, тогда имеем

$$T = T_{z0} + \frac{\text{grad}T_{\Gamma}}{A} (Az - 1) + Ce^{-Az}. \quad (11)$$

Из граничного условия: при $z = z_1$, $T = T_1$,

где T_1 – температура воды на входе в теплообменник, находим постоянную интегрирования:

$$C = \left(T_1 - T_{z0} - \frac{\text{grad}T_{\Gamma}}{A} (Az_1 - 1) \right) e^{-Az_1}. \quad (12)$$

Тогда текущая температура нагреваемой воды:

$$T = T_{z0} + \frac{\text{grad}T_{\Gamma}}{A} (Az - 1) + \left(T_1 - T_{z0} - \frac{\text{grad}T_{\Gamma}}{A} (Az_1 - 1) \right) e^{-A(z_1 - z)}. \quad (13)$$

Глубину изоляции определим из условия равенства температур грунта и воды:

$$\text{при } z = z_1 \quad T_1 = T_{z0} + (\text{grad}T_r)z_1 ; \quad (14)$$

$$z_1 = \frac{T_1 - T_{z0}}{\text{grad}T_r} . \quad (15)$$

Задаваясь температурой нагревания воды $T = T_2$, определяем требуемую длину внутренней трубы z_2 , решая неявное уравнение

$$T_2 = T_{z0} + \frac{\text{grad}T_r}{A} (Az_2 - 1) + \left(T_1 - T_{z0} \frac{\text{grad}T_r}{A} (Az_1 - 1) \right) e^{-A(z_1 - z_2)} . \quad (16)$$

На участке $0 < z \leq z_1$, где $T_1 > T_r$, для предотвращения потерь теплоты и снижения температуры воды скважину необходимо снабдить теплоизоляцией. Рассчитываем параметры изоляции.

При $T_1 = \text{const}$ находим по справочной литературе физические параметры воды $\rho_1, C_{p1}, \lambda_1, \nu_1, \text{Pr}_1$, где Pr_1 – число Прандтля.

При расходе воды, равном M , скорость течения в кольцевом канале

$$\nu_1 = \frac{4M}{\text{Pr}_1 \pi (D^2 - d^2)} , \quad (17)$$

а число Рейнольдса
$$\text{Re} = \frac{\nu_1 d_3}{\nu_1} , \quad (18)$$

где $d_3 = D - d$ – эквивалентный диаметр канала, м.

Средняя температура грунта на участке:

$$\bar{T}_r = \frac{1}{z_1} \int_0^{z_1} (T_{z0} + \text{grad}T_r z) dz = T_{z0} + \frac{\text{grad}T_r}{2} z_1 . \quad (19)$$

Принимаем температуру стенки стального кожуха $T_c = \bar{T}_r$. При этой температуре для материала кожуха (стали) находим по справочной литературе коэффициент теплопроводности λ_c и число Прандтля Pr_1 .

Число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи от воды к стенке кожуха:

$$\text{Nu}_1 = 0,021 \text{Re}_1^{0,8} \text{Pr}_1^{0,43} \left(\text{Pr}_1 / \text{Pr}_c \right)^{0,25}; \quad (20)$$

$$\alpha_1 = \text{Nu}_1 \frac{\lambda_1}{d_3}. \quad (21)$$

Принимаем в качестве изоляции материал с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{из}}$.

Тогда коэффициент теплопередачи от воды к грунту на участке $0 < z < z_1$:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}}}, \quad (22)$$

где $\delta_c, \delta_{\text{из}}$ – толщина стенки стального кожуха и изоляции соответственно, м;
 $\lambda_c, \lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности стали и изоляционного материала соответственно, Вт/(м·К).

При условии $k_1 \rightarrow 0$ выбираем толщину изоляции $\delta_{\text{из}}$.

Принимаем для расчета следующие данные: $T_{z0} = 10,1$ °С; $T_1 = 7$ °С; $T_2 = 12$ °С; $T_r = 15$ °С – средняя температура вмещающих горных пород; $D = 100$ мм; $d = 50$ мм; $\rho = \rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м³ – плотность воды; $c = c_{\text{рв}} = 4,187$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении; $\text{grad}T_r = 1/33 = 0,0303$ К/м; толщина слоя теплоизоляции (пеностекло) на участке $0 < z < z_1$ – $\delta_{\text{из}} = 0,02$ м; $\lambda_{\text{из}} = 0,47$ Вт/(м·К); толщина стенки стального кожуха $\delta_c = 0,03$ м; $\lambda_c = 24,4$ Вт/(м·К) (сталь 4Х13, нержавеющая); коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки кожуха к воде $\alpha_2 = 4652$ Вт/(м·К).

В соответствии с формулой (22) коэффициент теплопередачи от грунта к воде на участке $0 < z < z_1$ равен 22,7 Вт/(м²·К).

На участке $z_1 < z < z_2$ заполняем пространство между кожухом и массивом глинографитной смесью с массовой долей графита 50 %, толщиной $\delta_{\text{гг}} = 10$ мм [3]. Тогда коэффициент теплопроводности смеси $\lambda_{\text{гг}} = 15,8$ Вт/(м·К), а коэффициент теплопередачи $k_2 = 483$ Вт/(м²·К).

Определим основные параметры биоочистного сооружения на примере карьера «Балка Мокрая» ПАТ «ХайдельбергЦементУкраина». Среднесуточный расход воды в карьере $Q = 660$ м³/сут. Принимаем следующие допущения. Вода проходит по дну карьера и частично нагревается в скважинах до температуры $T_2 = 12$ °С, имея начальную температуру $T_1 = 7$ °С. В целом вода в карьере нагревается до температуры $T_{\text{cp}} = 10$ °С. Находим требуемый расход воды через скважины:

$$QT_{\text{cp}} = Q_1 T_2 + (Q - Q_1) T_1,$$

$$Q_1 = Q(T_{\text{cp}} - T_1) / T_2 = 396 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Принимаем $N = 24$ скважины, значит, расход через одну скважину равен $q = 16,6 \text{ м}^3/\text{сут} = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, а массовый расход $M = 0,192 \text{ кг/с}$.

Комплекс $A_1 = 8,9 \cdot 10^{-3}$; $A_2 = 0,189$. Расчеты по уравнениям (15) и (16) для этих данных приведены в таблице.

Изменение температуры воды по глубине скважины при использовании глинографитной смеси

| $z, \text{ м}$ | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 |
|-----------------------------|---|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $T, \text{ }^\circ\text{C}$ | 7 | 10,668 | 11,453 | 12,21 | 12,968 | 13,725 | 14,483 | 15,24 | 15,998 | 16,755 | 17,513 |

Был также проведен расчет изменения температуры воды по глубине скважины при отсутствии глинографитной смеси (рис. 3). Стальной кожух теплообменника контактирует со смесью песчаников и аргиллитов: $\lambda' = 3,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и воды: $\lambda'' = 0,59 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В этом случае коэффициент теплопередачи от грунта к воде равен $k = 43,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а комплекс $A = 0,017$.

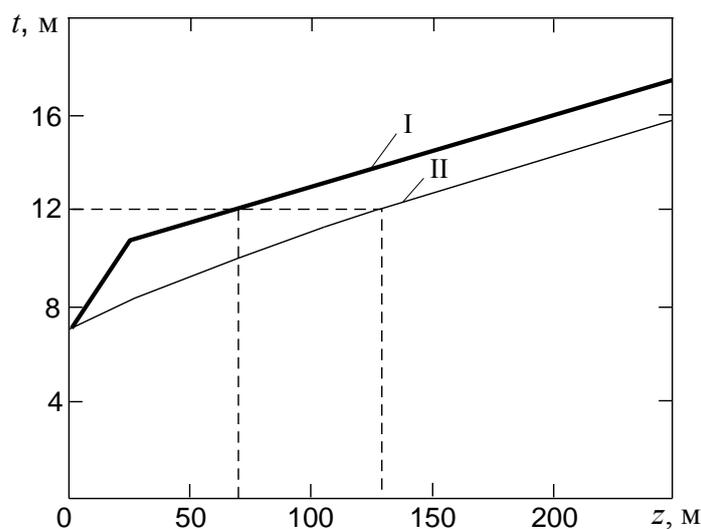


Рис. 3. Изменение температуры воды по глубине скважины с использованием глинографитной смеси (I) и без использования ее (II)

Таким образом, для нагревания воды до той же температуры при использовании глинографитной смеси в качестве заполнителя пространства за трубами требуется скважина длиной в 1,7 раза меньше, чем в случае непосредственного контакта стального кожуха с вмещающими породами.

Таким образом, согласно проведенным расчетам, для нагревания $660 \text{ м}^3/\text{сут}$ воды за счет геотермальной энергии до температуры $10 \text{ }^\circ\text{C}$ необходимо пробурить 24 геотермальных скважины диаметром 200 мм и длиной 76 м. Последние надо оснастить теплоизоляцией из пеностекла толщиной 20 мм на глубину 25 м, а затем установить стальной кожух из стали

4X13 с толщиной стенки 20 мм, а коаксиально с ним пластиковую трубу диаметром 50 мм и длиной 75 м. Пространство между кожухом и массивом на участке от 25 до 75 м заполняют глинографитной смесью с массовой долей графита 50 %.

При этом через скважины будет проходить 396 м³/сут воды. Температура воды на выходе равна 12 °С. Перемешивание с оставшейся частью воды позволит поднять температуру последней в карьере до 10 °С.

Выводы. Установленные закономерности теплообмена между породным массивом и водной средой при использовании геотермальных теплообменников в биоочистном сооружении позволили определить его основные параметры (количество скважин и их глубину) для поддержания температуры 10 °С в зимний период.

Поддержание необходимой температуры воды в биоочистителе позволит создать комфортные условия для жизнедеятельности гидробионтов круглогодично; предотвратить промерзание мелководных потоков и гибель водорослей и моллюсков в зимнее время; в летний период в результате охлаждения воды в мелководной части карьера также улучшатся условия для жизнедеятельности гидробионтов; содержащийся в очистном сооружении ресурс воды будет выполнять круглогодично функцию очистки среды путем растворения диоксида углерода и других газов с последующим усвоением их растениями для строения и питания клеток; использовать незамерзающий водоем как место для зимовки водоплавающих птиц. Все это вместе взятое будет способствовать восстановлению биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров.

Список литературы / References

1. Кислица А.С. Низкозатратные фитотехнологии для очистки сточных вод, защиты рек и водохранилищ от загрязнения / А.С. Кислица. – Харьков: Украинский центр фитотехнологий, 2007. – 18 с.

Kislitsa, A.S. (2007). *Nizkozatratnyye fitotekhnologii dlya ochistki stochnykh vod, zashchity rek i vodokhranilishch ot zagryazneniya* [Low-cost based phytotechnology for cleaning waste waters, protection of rivers and water storage reservoirs against pollution]. Kharkov, Ukrainskiy tsentr fitotekhnologiy, 18 p.

2. Костенко В.К. Восстановление биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров/ В.К. Костенко, Е.Л. Завьялова, О.П. Чепак // Проблемы недропользования: междунар. форум-конкурс молодых ученых, 23-25 апреля 2014 г.; сб. науч. тр. Ч. II. – СПб, 2014. – С. 131 – 133.

Kostenko, V.K., Zavyalova, Ye.L. and Chepak, O.P. (2014). *Vosstanovleniye biologicheskogo raznoobraziya v vyrabotannykh prostranstvakh karyerov* [Restoration of biological diversity in wastes of the open pits]. *Problemy nedropol'zovaniya: mezhdunar. forum-konkurs molodykh uchyenykh, 23-25 aprelya*

2014 g.: *sb. nauch. tr. Ch. II*. [Proc. of the International forum – competition of young scientists, Part II]. Saint Petersburg, pp. 131 – 133].

3. Пат. на корисну модель № 91730 Україна, МПК F24J3/08. Спосіб видобування геотермального тепла / В.К. Костенко, О.Л. Зав'ялова, І.В. Скринецька, О.С. Шипика, О.П. Чепак, Ю.І. Філатов; заявник і власник ДОННТУ. – № u2014 02110; заявл. 03.03.2014; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 13.

Kostenko, V.K., Zavalova, Ye.L., Skrynets'ka I.V., Shyuka, O.S., Chepak, O.P. and Filatov, Yu.I. (2014). *Sposib vydobuvannia geothermal'nogo tepla* [The method of producing the geothermal heat]. Useful model pat. of the Ukraine, no. u2014 02110.

*Рекомендовано к публикации канд. хим. наук А.В. Кибальным.
Дата поступления рукописи 29.05.2015*

Purpose. Determination of the parameters of the technology of restoration of biological diversity in wastes of the open pits on the basis of disclosure of regularities of the heat exchange between the rock massif and aqueous medium by the use of a geothermal heat exchanger in a biocleaning installation.

Methodology. The unified approach including the analysis of literature sources devoted to the problems of restoration of biological diversity in territories being left after excavation of minerals, theoretical investigations of transfer of the heat to the rock massif in the geothermal heat exchanger, design-analytical method by determination of principal parameters of the technology.

Results. The principal parameters of the technology of restoration of biological diversity in the wastes of the open pits with the use of the geothermal energy to keep up the temperature necessary for the vital activity of hydrocoles taking part in the process of water cleaning in the winter period are determined.

Scientific novelty. The regularities of the heat exchange between the rock massif and aqueous medium by the use of the geothermal heat exchanger in the biocleaning installation allowed determining the dependence of water temperature on the depth of the hole. The use of the clay-graphite mixture in the room between the casing of the heat exchanger and ground will permit to increase the specific heat pickup more than 5 times and to reduce the depth of the hole to 1.7.

Practical value. The maintaining of the necessary water temperature in the biocleaner will create the comfortable conditions for the vital activity of the hydrocoles all the year round and will contribute to restoration of biological diversity in the wastes of the open pits, therefore.

Keywords: wastes of the open pits, geothermal energy, hydrocoles, biological diversity, clay-graphite mixture.

УДК 504.5:336.02

*Е.В. Кравченко, канд. эконом. наук, зав. аспирантурой НИИГД «Респиратор», Донецк***ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИНАНСИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ
ПО БОРЬБЕ С ТЕХНОГЕННЫМИ АВАРИЯМИ***Ye. V. Kravchenko, Cand. Sci. (Econ.), head of postgraduate course (NIIGD “Respirator”, Donetsk)***ECONOMIC ASPECTS OF THE FINANCING OF MEASURES
ON CONTROL THE ANTHROPOGENIC ACCIDENTS**

Цель. Систематизация методологических подходов к экономическим аспектам повышения эффективности природоохранных мероприятий на современном этапе развития общества.

Методика. Аналитическое обобщение материалов по проблеме повышения эффективности природоохранных мероприятий.

Результаты. Предложены методологические подходы к формированию и реализации экологического страхования и использованию страховых фондов.

Научная новизна. Предложен системный подход к управлению природопользованием и реализации природоохранных мероприятий.

Практическая значимость. Использование предложенных методологических подходов к повышению эффективности реализации природоохранных мероприятий в условиях увеличивающейся техногенной опасности.

Ключевые слова: страхование, кредитование, техногенные аварии, природопользование, охрана природы.

Постановка проблемы. Сфера взаимодействия общества и природы характеризуется высокой степенью сложности и охватывает три группы отношений – природопользование, охрану окружающей природной среды, обеспечение экологической безопасности. Необходим системный подход к эффективному экологическому управлению экономической деятельностью общества.

В естественных условиях качество природной среды обеспечивает сама природа путем саморегуляции, самоочищения от вредных для неё веществ. Естественный цикл природы построен по принципам безотходного процесса, где конечный продукт служит исходным сырьем следующего цикла.

Производство построено на такой технологии, когда выбросы загрязняют атмосферу, сбросы загрязняют водные источники, складировать отходы на территориях, что приводит к техногенным авариям и негативно воздействует на окружающую природную среду.

Усложнение техники и появление новых технологий, как любая деятельность человека, сопровождаются взаимодействием со сложными техническими системами и не могут гарантировать абсолютной безопасности. Существует потенциальная экологическая опасность процесса взаимодействия общества с окружающей природной средой, которая определяется понятием риска.

Экологический риск рассматривается как осознанная опасность (угроза) того, что субъект хозяйственной деятельности понесет потери вследствие экологических нарушений, вызванных этой деятельностью при неблагоприятном стечении обстоятельств, просчетах и других факторах техногенного, природного, социального, экономического и политического характера на всех возможных уровнях, от локального до глобального.

Одним из важнейших условий гармонизации отношения общества и природы является экологизация экономической сферы, которая включает:

- экологически оптимальное формирование потребностей общества и сбалансирования его жизнедеятельности;
- создание соответствующего уровня социально-экологической направленности в распределении эколого-экономических благ;
- гарантирование экологически благоприятных и безопасных условий реализации отношений между обществом и природой.

Для охраны окружающей природной среды и обеспечения экологической безопасности применяют широкий комплекс взаимосвязанных политических, экономических, технических, организационных, государственно-правовых и других способов.

Проблеме эколого-экономических связей, обеспечивающих эффективное общественное производство, посвящены научные исследования таких известных ученых современности, как И.П. Герасимов, С.С. Гребенкин, Ю.Л. Израэль, М.А. Клименко, В.К. Козуля, В.К. Костенко, А.И. Родионов, В.Д. Рябченко, Г.В. Стадницкий, Н.П. Тихомиров, Н.А. Трофименко и др. [1 – 5].

Цель выполненного исследования – систематизация методологических подходов к экономическим аспектам повышения эффективности природоохранных мероприятий на современном этапе развития общества.

В статье рассмотрены следующие вопросы:

- финансовые аспекты рационального природопользования;
- экологически ориентированная налоговая система;
- льготное инвестиционное кредитование;
- экологическое страхование;
- экологические займы.

Основное содержание. Концепция устойчивого развития, принятая на конференции ООН «Окружающая среда и развитие», нацеливает общество на использование новых подходов и инструментов в экономике и определяет целью экономического механизма согласование экономических и экологических интересов производства. При этом важно оценить физические изменения в окружающей природной среде и экономический ущерб от её загрязнения.

Экономический ущерб от загрязнения и истощения окружающей природной среды имеет две составляющие: натуральные потери от прямого уничтожения почвы, леса, загрязнения водных ресурсов и затраты на ликвидацию и компенсацию ущерба.

Для выполнения природоохранных мероприятий необходимо обеспечение их соответствующими материальными средствами. Поскольку основной вред окружающей природной среде наносят промышленные предприятия, то и основными источниками финансирования этих мероприятий должны быть средства самого предприятия, независимо от формы собственности. К ним следует

отнести амортизационные отчисления на оборудование, здания и сооружения, обеспечивающие снижение вредных выбросов и отходов производства, а также часть прибыли.

Дополнительными источниками финансирования природоохранных мероприятий могут быть банковские кредиты, в отдельных случаях – государственные и муниципальные бюджетные средства, средства экологических фондов. Последние предназначены для финансирования воссоздания природных ресурсов, научных исследований, внедрения экологически чистых технологий, строительства очистительных сооружений, экологического воспитания и образования.

К природоохранным мероприятиям следует относить все виды хозяйственной деятельности, направленные на снижение и ликвидацию отрицательного антропогенного воздействия на окружающую среду, сохранение, улучшение и рациональное использование природоресурсного потенциала.

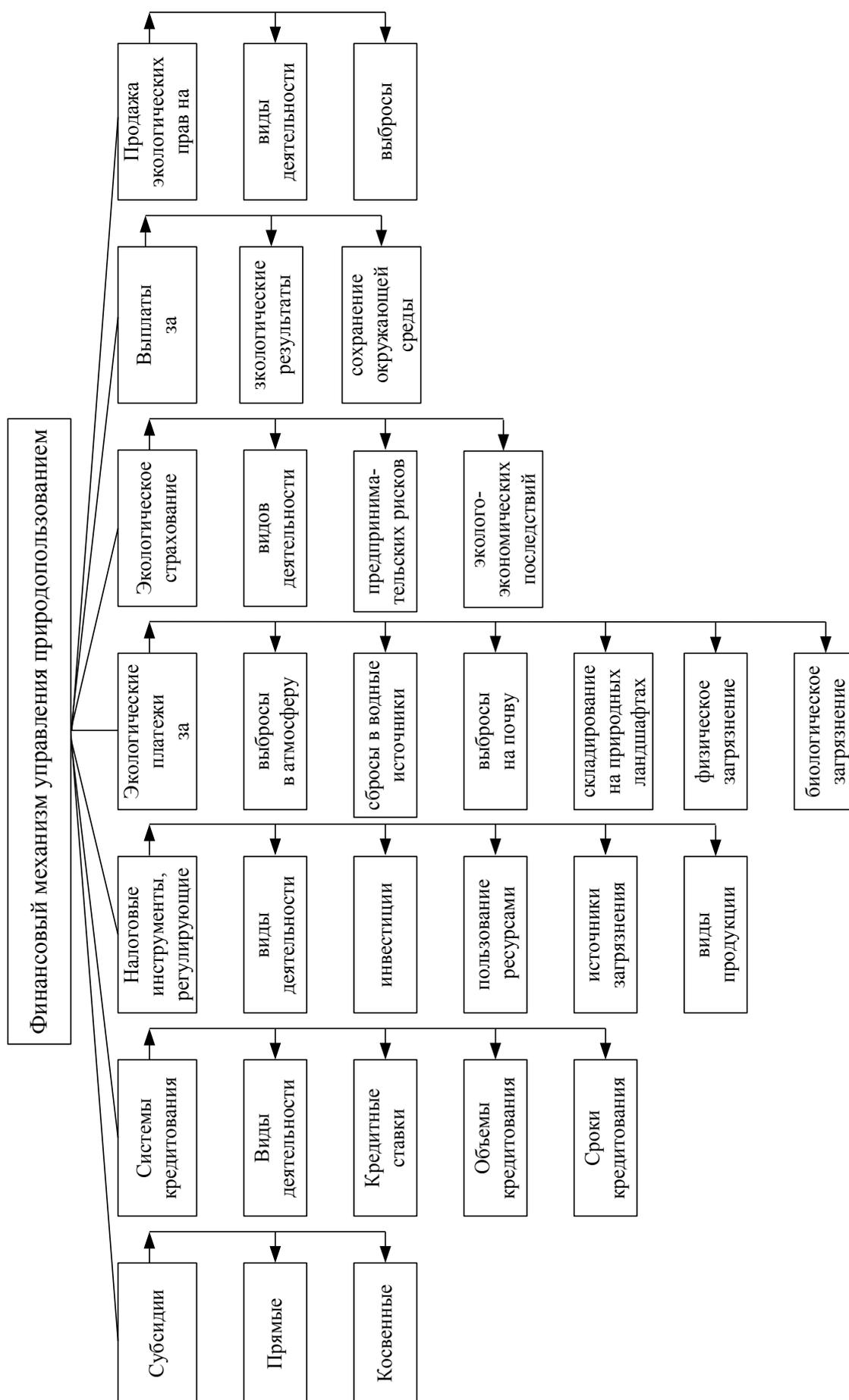
Меру достижения поставленных целей оценивают по показателям экологических и экономических результатов природоохранных мероприятий. К экологическим результатам относятся: снижение отрицательного влияния на окружающую среду и улучшение ее состояния за счет снижения объемов поступающих в среду загрязнений; увеличение количества и улучшение качества пригодных к использованию земельных, лесных и водных ресурсов. Социально-экономические результаты выражаются в повышении уровня жизни населения и эффективности производства.

Для окончательного принятия проекта природоохранного мероприятия экологическая эффективность первична по отношению к экономической эффективности затрат на мероприятие. Экономическую эффективность определяют на основании подхода, именуемого «анализ „затраты-выгода”» путем сопоставления экономических результатов с затратами, необходимыми для их осуществления. При этом определяют общую и сравнительную эффективность природоохранных затрат и чистый экономический эффект.

Чистый экономический эффект природоохранного мероприятия складывается из следующих составляющих:

- предотвращение экономического ущерба в связи со снижением загрязнения окружающей среды, затрат в материальном производстве, непроизводительной сфере и соответствующих расходов населения;
- прирост денежной оценки природных ресурсов, сберегаемых (улучшаемых) благодаря природоохранным мероприятиям;
- уменьшение потерь ценного сырья благодаря рециклингу отходов;
- прирост денежной оценки реализуемой продукции за счет более полной утилизации сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов в результате осуществления природоохранных мероприятий;
- социальный эффект – экономия затрат на лечение работников и выплаты по временной потере работоспособности и др.

Одним из важнейших механизмов управления природопользованием является финансовый механизм (см. рисунок).



Для выполнения своих функций по удовлетворению общественных потребностей государству необходимы определенные суммы денежных средств, часть из которых поступает через налоги. Налог – это обязательный, индивидуально безвозмездный платеж, взимаемый с организации и физических лиц в форме отчуждения принадлежащих им по праву собственности, хозяйственного ведения или оперативного управления денежных средств для финансирования обеспечения деятельности государства и (или) муниципального образования.

В государстве может действовать более 40 видов налогов и сборов, направляемых в различные целевые фонды. В их состав входит и фонд охраны природной окружающей среды, налоги в который отнесены к общественным налогам и сборам (обязательным платежам), призванным решать две основные задачи:

- сделать стоимость продукции более адекватной по отношению к затратам и ущербу, наносимому окружающей природной среде;
- способствовать компенсации экологического ущерба конкретным загрязнителем, а не всем обществом (т.е. способствовать реализации принципа «загрязнитель платит»).

Охрана окружающей природной среды даст необходимый результат, если ее загрязнение будет экономически не выгодно хозяйствующему субъекту. Поэтому используют следующие финансовые инструменты управления охраной окружающей природной среды:

- плата за загрязнение окружающей среды (за выбросы в атмосферу и сбросы в водные объекты загрязняющих веществ, за размещение отходов);
- плата за специальное использование природных ресурсов (земли, недр, вод, лесов, объектов животного и растительного мира);
- система штрафов и исков для возмещения ущерба, причиненного нарушением природоохранного законодательства;
- прямые субсидии для выполнения конкретных природоохранных мероприятий;
- стимулирование в системе охраны окружающей природной среды.

Современный механизм платежей за загрязнение и убыток, наносимый окружающей природной среде, не учитывает всех аспектов экономических и социальных затрат общества в результате хозяйственной деятельности, размер этой платы не обеспечивает в полном объеме покрытия природоохранных потребностей и свидетельствует о недостаточной эффективности системы принудительного взыскания экологических платежей.

При существующих размерах штрафных санкций за экологические нарушения их выгоднее платить, чем строить и эксплуатировать природоохранные объекты. В принципе любые формы экономического принуждения (налоги, штрафы) имеют негативную мотивацию, так как не создают внутренних побудительных мотивов и просто повышают издержки производства и снижают прибыль. Поэтому необходимо практиковать

позитивное стимулирование, при котором применение ресурсосберегающих и малоотходных технологий должно облагаться понижением налогов.

Для того чтобы внедрение налоговых льгот не сопровождалось потерей бюджетных доходов, необходимо устанавливать повышенные налоги на экологически опасные изделия или применяющиеся экологически опасные технологии, оборудование и транспортные средства с целью реализации так называемого принципа «фискальной нейтральности».

Результаты исследований существующего порядка учета экологических мероприятий и расходов на их осуществление позволяют утверждать, что необходимо внедрение в практику ведения хозяйства промышленных предприятий всех форм собственности экологического учета как составляющей бухгалтерского учета. Это позволит получить информацию о характерных для каждого предприятия связях между расходами, выручкой, потреблением сырья и энергии и проведенными природоохранными мероприятиями.

Для развития предприятия, повышения конкурентоспособности его продукции необходимо постоянное инвестирование в применение новых технологий, техническое перевооружение. Как правило, собственных средств на эти цели у предприятия недостаточно и оно вынуждено прибегать к внешним заимствованиям под достаточно высокий процент. В этих условиях осуществлять капиталоемкие, с длительным сроком окупаемости природоохранные мероприятия становится проблематично.

В определенной степени это можно решить путем организации льготного кредитования экологических программ и природоохранных мероприятий из средств бюджетов различных уровней и специализированных фондов, а также создания системы экологических банков. В мировой практике уже имеется опыт создания и успешного функционирования таких банков.

Необходимо создание условий, при которых были бы заинтересованы заемщики (природопользователи) и кредиторы (банки). Этого можно достичь, если кредитование для экологических целей будет льготным, а банки получают от государства гарантии компенсации затраченных ими средств и предоставления налоговых льгот самим банкам.

При необходимости пополнения финансовых ресурсов государство часто прибегает к внутренним и внешним заимствованиям путем выпуска облигаций на определенный срок и под достаточно высокий процент по сравнению с кредитами, получаемыми от международных банков (МВФ, ЕБРР и др.). Этот, основанный на рыночных механизмах, способ финансирования может быть использован и для финансирования природоохранной деятельности.

Экологические займы будут представлять собой способ привлечения юридических и физических лиц на условиях добровольности, срочности, возвратности и платности для дополнительного финансирования природоохранных нужд сверх текущих возможностей государства и предприятий. Выпуск экологических ценных бумаг (облигаций) должен быть экономически интересен для потенциальных инвесторов, для чего необходима

их надежная защита от инфляции и банкротства, а также предоставления эмитентам определенных льгот.

Процесс формирования рыночных отношений сопровождается снижением ответственности субъектов хозяйствования за аварийное загрязнение окружающей среды. Предотвращение ущерба от загрязнения окружающей среды, как правило, связано со значительными затратами и требует правовой регламентации отношений, возникающих в процессе антропогенной (производственной) деятельности между собственником предприятия и обществом. Эти отношения могут регулироваться специальным видом страхования.

Экологическое страхование – это образование страховых фондов для предупреждения экологических аварий и катастроф; возмещение убытков, причиненных юридическим и физическим лицам вследствие загрязнения окружающей среды; обеспечение условий проживания населения и функционирования предпринимателей всех форм собственности в зонах чрезвычайных экологических ситуаций.

Субъектами экологического страхования могут выступать физические и юридические лица. Объектом экологического страхования можно рассматривать любой экологический риск загрязнения окружающей среды и потенциального экономического ущерба, причиняемого загрязнением производственными, бытовыми и другими отходами, транспортными средствами и т.д.

Процесс формирования рынка экологических страховых услуг только начинается. Пока еще нет достаточного опыта страхования ответственности и страхования рисков, связанных с деятельностью промышленных предприятий. Для нормального формирования рынка страховых экологических услуг необходимы экономико-правовое, методологическое и методическое обоснование экологического страхования, квалифицированные кадры страховщиков (экспертов и юристов).

Функциями экологического страхования должны стать:

- формирование экологической ответственности физических и юридических лиц за результаты антропогенной деятельности;
- стимулирование противоаварийных мероприятий путем дифференциации страховых тарифов и выплат предприятиями за безаварийную работу;
- обеспечение компенсационных гарантий пострадавшим (третьим лицам и работникам предприятия-страхователя) независимо от финансового состояния предприятия-виновника аварийного загрязнения окружающей среды;
- обеспечение устойчивости финансового предприятия при необходимости возмещения ущерба пострадавшим от аварийного загрязнения и затрат на восстановление собственного производства;
- обеспечение реализации правовых гарантий экологической защиты физических и юридических лиц за счет сформированных страховых фондов.

Страхование может быть добровольным или обязательным. Обязательное охватывает предприятия, внесенные в утверждаемый в законодательном порядке перечень экологически опасных объектов.

Финансовой основой экологического страхования должна стать система экологических страховых фондов, к которым следует отнести:

- страховые фонды предприятий-источников повышенного экологического риска для реализации ответственности за возмещение части убытка, ответственность за которые не подлежит передаче страховщику;
- фонды взаимного страхования, создаваемые отраслевыми или региональными объединениями таких предприятий, с соответствующим отказом от услуг страховой компании;
- фонды страхования экологического риска, которые обеспечивают страховую защиту третьих лиц в случае причинения им ущерба аварийным загрязнением окружающей среды, также компенсацию убытков самого предприятия. Этот фонд аккумулирует средства у страховщика (страховой компании) и обеспечивает имущественную ответственность предприятий-источников повышенного экологического риска за нанесение убытков третьим лицам и собственному производству из-за внезапного аварийного загрязнения среды.

Механизм реализации экологического страхования базируется на использовании соответствующих показателей. Определение степени экологической опасности (экологического риска) предприятия – достаточно сложный и трудоемкий процесс из-за отсутствия нормативной базы для таких расчетов.

Главной методологической проблемой экологического страхования является определение исходной базы для расчета страховых тарифов (размеры убытков, причиняемых физическим лицам и имуществу, методика их исчисления, создание системы нормативов для расчетов). При формировании тарифных ставок нельзя не учитывать противоречия между реальными финансовыми возможностями страхователя и ограничением страховой возможности страховщиков, а также размеры ущерба, причиняемого предприятиями различных отраслей, которые сильно колеблются.

Несмотря на комплекс еще не решенных вопросов в оценке экономических последствий техногенных аварий в краткосрочной и долгосрочной перспективе, методическом обеспечении экологического страхования и его форм, методы управления в аспекте финансового стимулирования природоохранной деятельности более гибкие по сравнению с методами прямого (административного) регулирования и требуют их дальнейшего развития и совершенствования.

Выводы

1. Постоянное, с все возрастающими темпами, ухудшение состояния окружающей природной среды и её влияние на состояние здоровья населения планеты требует принятия неотложных мер по повышению эффективности экологического управления в локальном и глобальном масштабах.

2. Необходима научно обоснованная оценка экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды и затрат на проведение природоохранных мероприятий.

3. Финансовые аспекты рационального природопользования и охраны окружающей природной среды более эффективны, чем методы прямого (административного) регулирования.

4. Существующая налоговая система должна быть более экологически ориентированной и обеспечить смягчение последствий от производственной деятельности общества.

5. Большие затраты на реализацию природоохранных мероприятий при сложившейся общей достаточно низкой эффективности работы предприятий с устаревшими технологиями и оборудованием требуют разработки и реализации льготного инвестиционного кредитования на их осуществление.

6. Важным направлением обеспечения ликвидации последствий аварий техногенного характера и загрязнения окружающей природной среды является экологическое страхование и его экономически обоснованные тарифы.

7. Эффективность управления рациональным природопользованием и реализацией природоохранных мероприятий может быть обеспечена только на основе системного подхода.

Список литературы / References

1. Системно-экономические аспекты экологизации производства и управления предприятием: монография / С.С. Гребенкин, В.К. Костенко и др. – Донецк: ВИК, 2010. – 401 с.

Grebyenkin, S.S., Kostenko, V.K. etc. (2010). *Sistemno-ekonomicheskiye aspekty ekologizatsii proizvodstva i upravleniya predpriyatiyem: Monografiya* [System-economic aspects of ecologization of the production and operation of business: Monograph]. Donetsk, VIK, 401 p.

2. Максименко Н.В. Організація управління в екологічній діяльності / Н.В. Максименко, В.В. Задніпровський, О.М. Клименко. – Харків: ХНУ ім. В.М. Карабіна, 2007. – 370 с.

Maksymenko, N.V., Zadniprovs'kyi, V.V. and Klymenko, O.M. (2007). *Organizatsiia upravlinnia v ekologichnii diialnosti* [Organization of management in ecological activity]. Kharkov, V.M. Karabin KhNU, 370 p.

3. Моніторинг дозвілля / О.М. Клименко и др. – Київ: Академія, 2006. – 360 с.

Klymenko, O.M. etc. (2006). *Monitoring dozvillia* [Spare time monitoring]. Kyiv, Akademiia, 360 p.

4. Кислый В.Н. Экологизация управления предприятием: монография / В.Н. Кислый, Е.В. Лапин, Н.А. Трофименко. – Сумы: Университетская книга, 2002. – 340 с.

Kislyu, V.N., Lapin, Ye.V. and Trofimenko, N.A. (2002). *Ekologizatsiya upravleniya predpriyatiyem: Monographiya* [Ecologization of operation of business: Monograph]. Sumy, Universitetskaya kniga, 340 p.

5. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками / под ред. проф. Н.П. Тихомирова. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 350 с.

Tikhomirov, N.P. (ed.) (2003). *Metody analiza i upravleniya ekologo-ekonomicheskimi riskami* [Methods of analysis and ecoeconomic risk management]. Moscow, YuNITI-DANA, 350 p.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Г. Стариковой.
Дата поступления рукописи 04.05.2015*

Purpose. Systematization of methodological approaches to economic aspects of effectiveness increase of nature-conservative measures at the present stage of community development.

Methodology. Analytical generalization of materials on the problem of the effectiveness increase of nature-conservative measures.

Results. The methodological approaches to forming and realization of the ecological insurance and to the use of insurance funds are proposed.

Scientific novelty. The system approach to the nature management control and realization of the nature-conservative measures is proposed.

Practical value. Use of the methodological approaches proposed to the effectiveness increase of realization of the nature-conservative measures under conditions of the rising anthropogenic danger.

Keywords: insurance, crediting, anthropogenic accidents, nature management, protection of nature.

II. Пожарная безопасность

УДК [614.841.45:614.841.13]:001.891.573

*П.С. Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по науч. работе,
И.Н. Зинченко, канд. техн. наук, ведущий инж., А.М. Богомаз, аспирант
НИИГД «Респиратор», Донецк*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОЖАРЕ В ЗДАНИИ

*P.S. Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director for science, I.N. Zinchenko,
Cand. Sci. (Tech.), leading engineer, A.M. Bogomaz, postgraduate student
(NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES BY A FIRE IN A BUILDING

Цель. Статья посвящена вопросам тепломассообмена при пожаре в различных помещениях с образованием дыма и токсичных газов, с дальнейшим их распространением по коридорам и лестницам.

Представлен анализ результатов работ в этом направлении. Показано, что при отдельных исследованиях процессов тепломассообмена в помещении или в коридоре не учитывается их взаимосвязь. Кроме того, отсутствует чёткая модель пиролиза и горения твёрдых материалов. Поэтому цель исследования – разработка математической модели тепломассообмена с образованием дыма и токсичных газов с дальнейшим её использованием при решении задач эвакуации людей.

Методы. При разработке математической модели пожара с образованием дыма и токсичных газов использованы классические уравнения тепломассообмена в трёхмерном пространстве, сведенные к зонным и интегральным моделям. Предложен численный метод решения дифференциальных уравнений с центральными разностями против потока и неявными схемами.

Результаты. Анализ полученных результатов показывает, что введение в рассмотрение обобщённого уравнения тепломассопереноса позволяет решать одновременно задачи теплообмена воздуха с окружающими стенами и ограждающими конструкциями, определения оптической плотности дыма и концентрации оксида углерода в любой момент их образования.

Выводы. Разработанный метод позволяет давать оценку динамики развития пожара с образованием дыма и токсичных газов. Полученные результаты численных расчётов позволят иметь полную информацию о пожаре и принимать меры по его ликвидации и спасению людей.

Ключевые слова: пиролиз, пожар, температура, дым, токсичные газы, тепломассообмен, помещение, коридор, эвакуация, ликвидация пожара.

Введение. По данным МЧС, только за 2007 г. в Российской Федерации зарегистрировано более 211 тысяч пожаров. Согласно мировой статистике более 80 % пожаров происходит с участием полимерных и композиционных материалов. В этой связи в последние годы существенно повышены требования пожаро- и взрывобезопасности, предъявляемые к полимерным и композиционным материалам во всех областях их применения. Специфика процессов загорания, распространения пламени, образования дыма и токсичных продуктов при горении полимеров позволяет выделить горение

полимерных материалов в отдельное направление. Под пожарной опасностью полимерных и композиционных материалов понимают комплекс свойств, который наряду с горючестью включает в себя способность к воспламенению, загоранию, распространению пламени, количественную оценку дымообразующей способности и токсичности продуктов сгорания. Выделение газообразных токсичных веществ в результате горения полимерных строительных материалов – серьезная опасность, связанная с их использованием. Достаточно указать, что термическое разложение при горении 1 кг полимера дает столько газообразных токсичных веществ, что их достаточно для отравления воздуха в помещении объемом 2000 м³. У человека, находящегося в таком помещении, через 10...15 мин возникает тяжелое отравление или даже наступает смерть. В этой связи особое место отводят задачам обеспечения безопасности людей при эвакуации и пожаротушении. Для обеспечения безопасной эвакуации людей необходимо знать продолжительность пожара, количество образующегося дыма и токсичных газов, направление их перемещения в сложной системе коридоров, лестниц и помещений. Имеются различные интегральные, зонные и полевые методы расчёта тепломассообмена при пожаре [1, 2]. Однако в этих работах рассматривают в отрыве друг от друга процессы, происходящие одновременно во всей сложной системе коридоров, лестниц и помещений. Кроме того, до конца не изучены вопросы пиролиза, возникновения пламенного горения и дымообразования, что является основным направлением для дальнейшего исследования процессов тепломассообмена.

Методы. Предложена модель тепломассообмена при пожаре с образованием дыма и токсичных газов, с их перемещением в помещениях, коридорах и лестницах, с учётом термического расширения газов и их обменом со стенами и ограждающими конструкциями. Все дифференциальные уравнения тепломассообмена и переноса сведены к одному обобщенному уравнению, представленному в виде [1]

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho u E) = \operatorname{div}(A \operatorname{grad} E) + G, \quad (1)$$

где E – зависящая обобщённая переменная, означающая температуру T , K , в зоне горения, температуру на стенах и ограждающих конструкциях Θ , K , концентрацию кислорода C , кг/м³, концентрацию токсичного газа Z , кг/м³, оптическую плотность дыма D , дБ, плотность воздуха ρ , кг/м³, скорость воздуха u , м/с, коэффициент диффузии субстанции A , м²/с; интенсивность источников выделения теплоты, газа, дыма G . Размерность интенсивности источника G зависит от вида субстанции. Используя уравнение неразрывности потока газов [1, 3]

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho u) = 0, \quad (2)$$

можно представить уравнение (1) в виде

$$\rho \frac{\partial E}{\partial \tau} + \rho u \operatorname{div} E = \operatorname{div}(A \operatorname{grad} E) + G. \quad (3)$$

В проекциях на оси координат представим уравнение (3) в виде

$$\rho \frac{\partial E}{\partial \tau} + \rho u \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho A \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho A \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho A \frac{\partial E}{\partial z} \right) + G, \quad (4)$$

где x, y, z – оси координат, м.

В уравнении (4) приведена одна составляющая скорости воздуха вдоль направления движения конвективных потоков (над нейтральной и под нейтральной осью). На рис.1 представлена схема тепломассообмена в помещении [1].

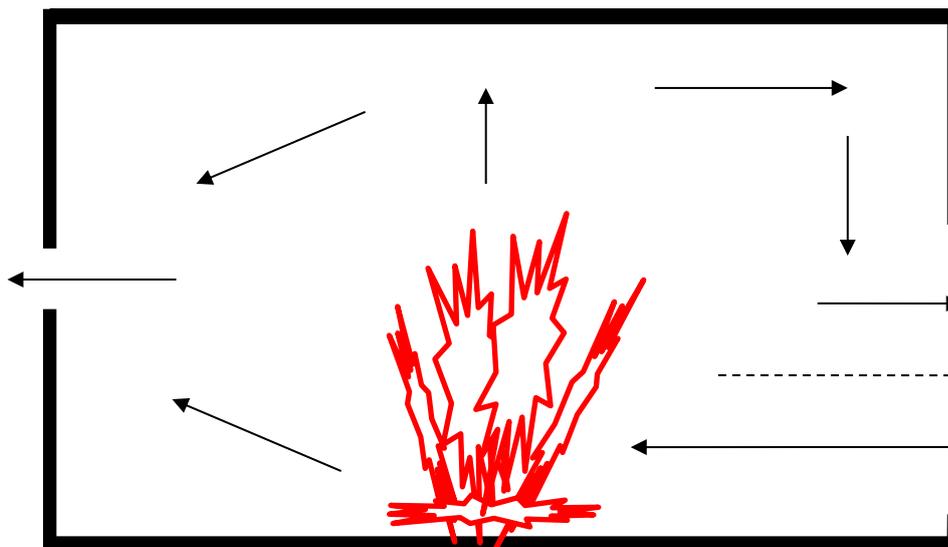


Рис. 1. Схема движения дыма и токсичных газов при пожаре в помещении (над и под нейтральной линией: на выход в коридор и на вход из коридора, на выход слева при вытяжной вентиляции)

Разделим левую и правую части уравнения (4) на значение плотности воздуха при нормальных условиях и, принимая коэффициенты диффузии любой субстанции за константы, получим

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial E}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial E}{\partial x} = A_1 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + A_2 \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + A_3 \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + G, \quad (5)$$

где $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$ – скорость воздуха, которая будет постоянной при стационарных условиях независимо от температуры согласно уравнению неразрывности (2), м/с;

$A_i = \rho A_i / \rho_0$ – коэффициенты диффузии субстанции константы, разные по разным направлениям, м²/с.

Результаты. Будем рассматривать систему помещений, коридоров и лестниц, условно разделив в каждом верхний и нижний потоки газов. Поэтому представим уравнение (5) в конечных разностях по поперечным координатам и получим

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial E}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial E}{\partial x} = A_1 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + 2A_2 \frac{E_{\text{ст}} - E}{\Delta y^2} + 2A_3 \frac{E_{\text{ст}} - E}{\Delta z^2} + G, \quad (6)$$

где $E_{\text{ст}}$ – значение любой субстанции на стенах, принятой одинаковой слева, справа, снизу или сверху;

$\Delta y, \Delta z$ – половина высоты или ширины помещения или коридора, м.

Упрощая уравнение (6), получим

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial E}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial E}{\partial x} = A_1 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \gamma(E_{\text{ст}} - E) + G, \quad (7)$$

где $\gamma = 2 \left(\frac{A_2}{\Delta y^2} + \frac{A_3}{\Delta z^2} \right)$ – обобщённый коэффициент теплообмена со

стенами помещения, коридора или лестницы, с⁻¹.

Входящее в уравнение (7) отношение плотностей ρ/ρ_0 обычно принимают за константу, однако исходя из уравнения состояния газов его необходимо рассматривать как отношение температур T_0/T . Рассматривая каждую субстанцию отдельно (T – температура, C – концентрацию кислорода, Z – концентрацию оксида углерода, D – оптическую плотность дыма), вместо одного уравнения (7) получим систему уравнений:

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = A_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \gamma(T_{\text{ст}} - T) + G_1; \quad (8)$$

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = A_2 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \gamma(C_{\text{ст}} - C) + G_2; \quad (9)$$

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial Z}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial Z}{\partial x} = A_3 \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_{\text{ст}} - Z) + G_3; \quad (10)$$

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial D}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial D}{\partial x} = A_4 \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} + \gamma(D_{\text{ст}} - D) + G_4. \quad (11)$$

Система уравнений (8) – (11) при задании функций G_i выделения или поглощения каждой субстанции и задании начальных условий $E(x, 0) = E_0$, а также граничных условий стыковки параметров в местах сопряжений помещений, коридоров и лестниц позволяет численными методами [4] получить полную картину дымообразования, появления токсичных газов и их перемещения во всей системе помещений, коридоров и лестниц. Движущими силами здесь являются принудительная (вытяжная) вентиляция и тепловая депрессия за счёт разности веса газов в очаге пожара и на входе в лестничные пролёты.

Будем считать, что массовый расход продуктов пиролиза (газообразного углерода и частиц твёрдого материала), образующихся при термическом разложении, связан со скоростью их образования [5]

$$\frac{dI}{d\tau} = -k_1 I, \quad (12)$$

где I – расход продуктов пиролиза, кг/с;

k_1 – константа скорости реакции при пиролизе, с^{-1} .

Решением уравнения (12) при начальном условии $I(0) = I_0$ является экспоненциальная зависимость вида

$$I = I_0 \exp(-k_1 \tau), \quad (13)$$

где I_0 – начальный расход продуктов пиролиза, кг/с.

Поступление продуктов пиролиза в поток воздуха связано с его диффузией и движением в порах и трещинах уравнением

$$\frac{dm}{d\tau} = -k_2(m - I), \quad (14)$$

где m – массовый расход газообразных продуктов пиролиза, поступающих в поток воздуха, кг/с;

k_2 – коэффициент газообмена между потоком воздуха, порами и трещинами в твёрдом материале, с^{-1} .

Искомое решение уравнения (14) при начальном условии $m(0) = 0$ имеет вид

$$m(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} \left[\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau) \right]. \quad (15)$$

На рис. 2 представлены результаты расчёта по формуле (15) сгорания продуктов пиролиза в потоке воздуха при различных относительных параметрах газообмена.

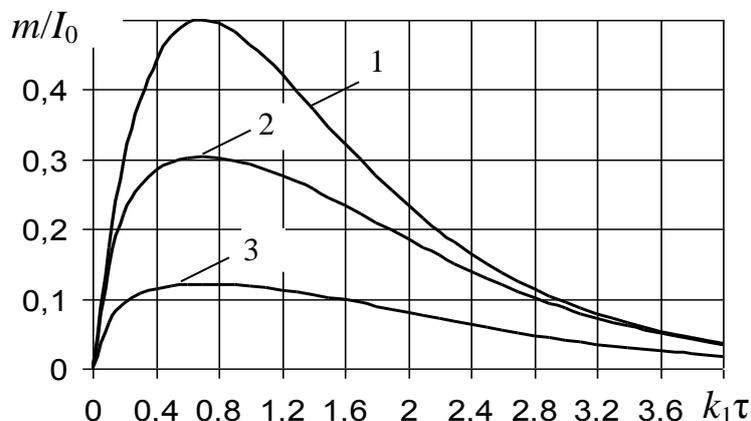


Рис.2. Динамика пиролиза в потоке воздуха при различных относительных параметрах газообмена:
1 – $k_2/k_1 = 2$; 2 – $k_2/k_1 = 1,001$; 3 – $k_2/k_1 = 0,5$

Как видно, чем интенсивней поступление продуктов пиролиза в поток воздуха, тем интенсивней процесс горения.

При выгорании горючего материала передний фронт очага пожара перемещается с определённой скоростью. Поэтому необходимо учитывать этот фактор и представлять формулу (15) интенсивности выделения и горения газообразных веществ при пожаре в виде

$$m(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} \left[\exp\left(-k_1(\tau - x/w)\right) - \exp\left(-k_2(\tau - x/w)\right) \right], \quad (16)$$

где w – скорость перемещения очага пожара, м/с.

Формула (16) верна при $\tau > x/w$ и должна обращаться в нуль при $\tau < x/w$.

Поступая в поток воздуха, продукты пиролиза мгновенно вступают в химическую реакцию и в зависимости от концентрации кислорода выделяют теплоту в единице объёма с интенсивностью [5]

$$G_1 = \chi \frac{m H_c}{V} \frac{C}{C_0}, \quad (17)$$

где χ – коэффициент неполноты сгорания горючего материала;

H_c – теплота сгорания летучих веществ, кДж/кг;

V – объём зоны термического разложения, м³.

Интенсивность источника поглощения кислорода при горении тесно связана с функцией теплового источника и может быть представлена в виде

$$G_2 = -\delta G_1 / H_c, \quad (18)$$

где δ – эмпирическая константа.

Интенсивность источника выделения оксида углерода при горении может быть представлена в виде

$$G_3 = \chi \frac{\varepsilon m}{V} (1 - C/C_0), \quad (19)$$

где ε – доля оксида углерода в продуктах горения.

Интенсивность источника выделения дыма при горении может быть представлена в виде

$$G_4 = (1 - \chi) \frac{m}{V} (1 - C/C_0). \quad (20)$$

Полученные зависимости (17) – (20) используют в системе уравнений (8) – (11) как функции источников теплоты, интенсивности расходования кислорода, образования оксида углерода и дыма при горении твёрдого материала.

Результаты разработанного метода исследований тепломассообмена при пожаре в здании существенно отличаются от известных методов тем, что учитывают термическое расширение газов и дыма, их перемещение по всей системе помещений, коридоров и лестниц.

Предложенный метод позволяет определить время появления дыма и оксида углерода на различных расстояниях от места возникновения пожара в помещении с дальнейшим распространением их по коридорам и лестницам.

Выводы. Разработана математическая модель процессов тепломассообмена при пожаре в помещении с последующим распространением продуктов горения в коридоры и лестницы. Полученные результаты могут быть использованы для установления мест в здании с недопустимыми концентрациями дыма и оксида углерода и для определения путей эвакуации людей.

Список литературы / References

1. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

Puzach, S.V. (2005). *Metody raschyeta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods of calculation of the heat-mass exchange by the fire in a room and their use by solution of practical problems of fire-explosion safety]. Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii, 336 p.

2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров/ Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

Drayzdeyl, D. (1990). *Vvedeniye v dinamiku pozharov* [Introduction in dynamics of fires]. Moscow, Stroyizdat, 424 p.

3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Loytsyanskiy, L.G. (2003). *Mekhanika zhidkostey i gazov* [Mechanics of fluids and gases]. Moscow, Drofa, 840 p.

4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

Rouch, P. (1980). *Vychislitel'naya gidrodinamika* [Computing hydrodynamics]. Moscow, Mir, 616 p.

5. Ковалишин В.В. Математичне моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами на об'єктах значної протяжності / В.В. Ковалишин // Науковий вісник НДПБ. – 2013. – №1 (27). – С. 153 – 160.

Kovalyshyn, V.V. (2013). *Matematychnе modeliuвання rozvytku i gasinnia pozhezh riznymy zasobamy na ob'iektakh znachnoi protiazhnosti* [The mathematical modeling of development and fighting the fires with various methods on objects of considerable length]. *Naukovyi visnyk NDIPB*, no. 1 (27), pp. 153 – 160.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 06.07.2015*

Purpose. The article is devoted to the problems of the heat-mass exchange by the fire with generation of smoke and toxic gases in various buildings, with their further spread along corridors and stairs.

The analysis of results of the works in this direction is presented. It is shown that the interaction between the heat-mass exchange processes in the room or corridor doesn't be taken into account by their separate investigations. Besides, the clear model of thermal decomposition and burning of solid materials is lacking. That is why the purpose of the investigation is working-up the mathematical model of heat-mass exchange by the fire with generation of smoke and toxic gases with its further use by solution of problems of evacuation of the people.

Methods. By working-out the mathematical model of the fire with generation of smoke and toxic gases the classic equations of the heat-mass exchange in the three-dimensional space brought to the band and integral models are used. The numerical method of solution of the differential equations with central differences against the flow and with implicit circuitry is proposed.

Results. The analysis of the results received shows that the introduction for consideration of the generalized equation of the heat-mass exchange permits to solve the problems of the heat exchange of air with the surrounding walls and enclosing constructions, of determination of the optical smoke density and carbon oxide concentration at the same time at any point of their generation.

Conclusions. The method worked out allows evaluating the dynamics of development of the fire with generation of smoke and toxic gases. The results of the numerical calculations received permit to have the complete information about the fire and to take measures for its elimination and rescue of the people.

Keywords: thermal decomposition, fire, temperature, smoke, toxic gases, heat-mass exchange, room, corridor, evacuation, fire fighting.

УДК [614.842.6:614.846.6]:536.35

В.В. Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по науч. работе, В.В. Соколянский, ст. науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОСТЕКЛЕНИИ КАБИН АВТОМОБИЛЕЙ

V.V. Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director for science, V.V. Sokolyanskiy, senior scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

HEAT EXCHANGE PROCESSES IN CAB WINDOWS OF FIRE-FIGHTING VEHICLES

Цель. Исследовать процесс нагревания остекления кабин пожарных автомобилей внешним тепловым потоком с учетом особенностей процесса теплообмена в светопрозрачных ограждениях.

Методы. Теоретический анализ теплообменных процессов при внешнем тепловом воздействии на остекление кабины автомобиля; стендовые и полномасштабные полигонные испытания светопрозрачных элементов ограждений.

Результаты. На основании уравнения теплового баланса получены аналитические зависимости для определения средней температуры остекления кабин автомобилей при воздействии внешнего теплового излучения. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов по точным и приближенным формулам. Теоретические расчеты подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Вывод. Разработана математическая модель процесса теплообмена окружающей среды со светопрозрачными элементами ограждения кабины автомобиля, позволяющая рассчитывать температуру остекления при внешнем тепловом воздействии.

Ключевые слова: кабина автомобиля, светопрозрачные ограждения, остекление, тепловой поток, температурное поле, тепловые потери, математическая модель, стационарный тепловой режим, нестационарный тепловой режим.

Постановка проблемы. При внешнем тепловом воздействии на кабину пожарного автомобиля поступление теплоты через ограждения будет различным и определяет его схема воздействия источника теплового излучения на автомобиль (с одной боковой стороны, с двух боковых сторон, спереди, сзади).

Ограждения кабины автомобиля различны по своим конфигурациям и теплофизическим свойствам, но толщина каждого из них много меньше его протяженности, что позволяет процесс теплообмена каждого элемента рассматривать как одномерный. Это упрощает разработку математической модели теплообмена окружающей среды с кабиной автомобиля, с помощью которой можно рассчитывать параметры микроклимата внутри кабины.

Анализ последних исследований. Существует большое количество расчетных методов определения параметров микроклимата в кабине при стационарном и нестационарном тепловых режимах. Эти методы имеют высокую точность, однако при некоторых схемах обогрева (в частности, при фронтальном воздействии теплового излучения) в расчетах появляется большое расхождение с результатами эксперимента. И это расхождение

увеличивается при повышении интенсивности внешнего теплового излучения в связи с тем, что при такой ориентации кабины излучение от пожара воздействует главным образом на ее остекление. Поэтому необходимо учитывать существенные отличия процессов теплообмена в непрозрачных и светопрозрачных ограждениях при их нагревании тепловым излучением.

Цель исследования. Цель настоящей статьи – исследование процессов нагревания остекления кабин пожарных автомобилей тепловым потоком открытого пожара с учетом особенностей процессов теплообмена в непрозрачных и светопрозрачных ограждениях.

Материалы и результаты исследований. В отличие от непрозрачных ограждений (металлических стенок) характер поглощения теплового излучения светопрозрачным материалом (остеклением) объемный [1]. Температурное поле в светопрозрачной пластине с двусторонним теплообменом (рис. 1) определяется следующим уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q \frac{k_{\Pi}}{c_p \rho} e^{-k_n x} \quad (1)$$

с граничными условиями третьего рода:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_1 (T_1 - T_{в1}); \quad (2)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha_2 (T_2 - T_{в2}) \quad (3)$$

и начальными условиями: при $\tau = 0 \rightarrow T = T_0$,

- где a – коэффициент температуропроводности материала пластины, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 q – плотность падающего на пластину теплового потока, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;
 k_{Π} – средний интегральный коэффициент поглощения материала пластины, м^{-1} ;
 c_p – удельная теплоемкость материала, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;
 ρ – плотность материала пластины, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;
 λ – коэффициент теплопроводности пластины, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;
 α_1 – коэффициент теплоотдачи с наружной стороны пластины, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$;
 T_1 – температура наружной поверхности пластины, К;
 $T_{в1}$ – температура воздуха с наружной стороны пластины, К;
 δ – толщина пластины, м;

- α_2 – коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны пластины, Вт·м⁻²·К⁻¹;
 T_2 – температура внутренней поверхности пластины, К;
 $T_{в2}$ – температура воздуха с внутренней стороны пластины, К;
 T_0 – начальная температура поверхности пластины, К.

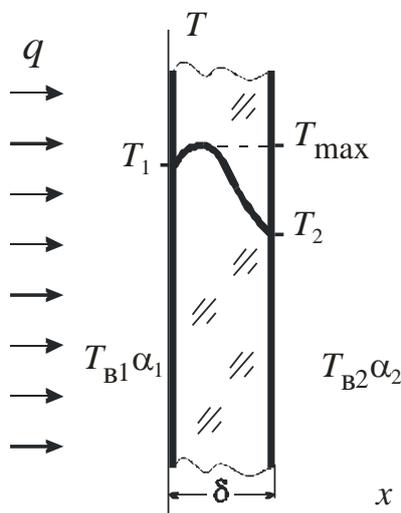


Рис. 1. Температурное поле внутри светопрозрачной пластины

При стационарном тепловом режиме уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q k_{\Pi}}{\lambda} e^{-k_n x} = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями (2) и (3).

Решение уравнения (4) совместно с граничными условиями (2) и (3) приводит к следующему выражению, характеризующему температурное поле в пластине:

$$T_{(x)} = T_1 + \frac{q\delta}{\lambda} \frac{1}{\text{Bi}} \left(1 - e^{-\text{Bu} \frac{x}{\delta}} \right) - \left(\frac{q\delta}{\lambda} - T_1 \text{Bi}_1 + T_{в1} \text{Bi}_1 \right) \frac{x}{\delta}, \quad (5)$$

где

$$T_1 = \frac{T_{в2} + T_{в1} \left(\text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2} \right) + \frac{q\delta}{\lambda} \left[1 - \left(\frac{1}{\text{Bi}} - \frac{1}{\text{Bi}_1} \right) \left(1 - e^{-\text{Bu}} \right) \right]}{1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_1}{\text{Bi}_2}}, \quad (6)$$

где Bi_1 и Bi_2 – критерии Био; $Bi_1 = \alpha_1 \delta / \lambda$; $Bi_2 = \alpha_2 \delta / \lambda$;

Bu – критерий Бугера; $Bu = k_{\Pi} \delta$.

В соответствии с уравнениями (5), (6) были проведены расчеты T_1 , T_2 , T_{\max} для остекления кабин автомобилей ЗиЛ-130 (закаленное автомобильное стекло $\delta = 5$ мм) и МАЗ-543 (органическое стекло $\delta = 24$ мм) при заданных коэффициентах теплоотдачи α_1 и α_2 .

Расчет установившейся (стационарной) температуры светопрозрачной пластины из закаленного стекла можно выполнить по упрощенной зависимости, как для термически тонкой стенки [3]:

$$q = \frac{\alpha(T_{\text{ст}} - T_0)}{k_{\Pi} \delta}, \quad (7)$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ – суммарный коэффициент теплоотдачи с внутренней и наружной сторон пластины, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$;

$T_{\text{ст}}$ – установившаяся (стационарная) температура пластины, К.

Здесь термически тонкой стенкой считается элемент ограждения, температуру внутри которого в направлении наименьшего размера можно считать постоянной при заданных граничных условиях (критерий $Bi < 0,25$) [3].

Из уравнения (7) получено выражение для установившейся температуры термически тонкой пластины:

$$T_{\text{ст}} = T_0 + \frac{q k_{\Pi} \delta}{\alpha}. \quad (8)$$

Полученные расчетные зависимости максимальной температуры закаленного стекла от плотности теплового потока, падающего на поверхность при заданных значениях коэффициента теплоотдачи, а также зависимость установившейся температуры закаленного стекла от плотности теплового потока и интенсивности теплоотдачи в соответствии с выражением (8) показаны на рис. 2. Здесь же представлены результаты экспериментальных исследований [2].

Расхождение между расчетными и экспериментально полученными значениями температуры стекла кабины автомобиля ЗиЛ-130 не превышает 25 %. Отличие в результатах расчетов по формуле (5) и формуле (8) не превышает 12 %, что говорит о достаточной адекватности предлагаемых способов вычисления температуры. Следовательно, для инженерных расчетов достаточно использовать приближенную формулу (8) вместо точной формулы (5).

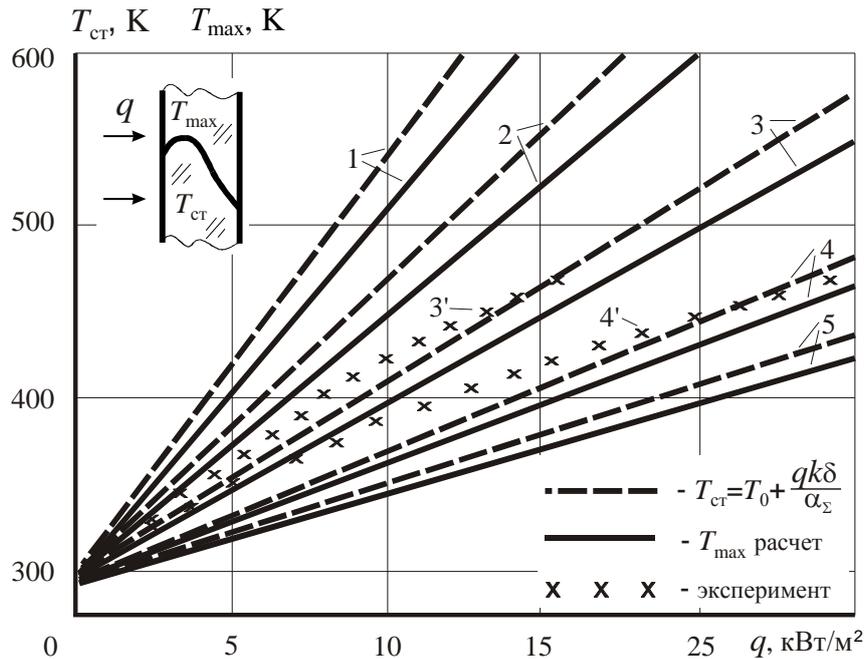


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры закаленного стекла от плотности падающего теплового потока:

$$1 - \alpha = 5,6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}; 2 - \alpha = 8 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}; 3, 3' - \alpha = 12 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}; \\ 4, 4' - \alpha = 18 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}; 5 - \alpha = 24 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$$

В реальных условиях теплоотдача с поверхности пластины осуществляется свободной конвекцией и излучением, т.е.

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}},$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности пластины конвекцией, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$;

$\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности пластины излучением, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в общем случае может быть определен по формуле [2]

$$\alpha_{\text{ки}} = 1,98T_i - T_{\text{ви}}^{0,25},$$

где T_i – температура i -й поверхности пластины, К;

$T_{\text{ви}}$ – температура воздуха у i -й поверхности пластины, К,

а коэффициент теплоотдачи излучением – по выражению

$$\alpha_{\text{ли}} = \frac{\varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{\text{ви}}^4)}{T_i - T_{\text{ви}}},$$

где ε_i – приведенная степень черноты i -й поверхности пластины;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$.

Для вычисления температур в этом случае используют метод последовательных приближений.

Зависимости перепада температур на поверхностях пластины из закаленного стекла от падающего на нее теплового потока при изменении условий теплообмена одной из пластин приведены на рис. 3.

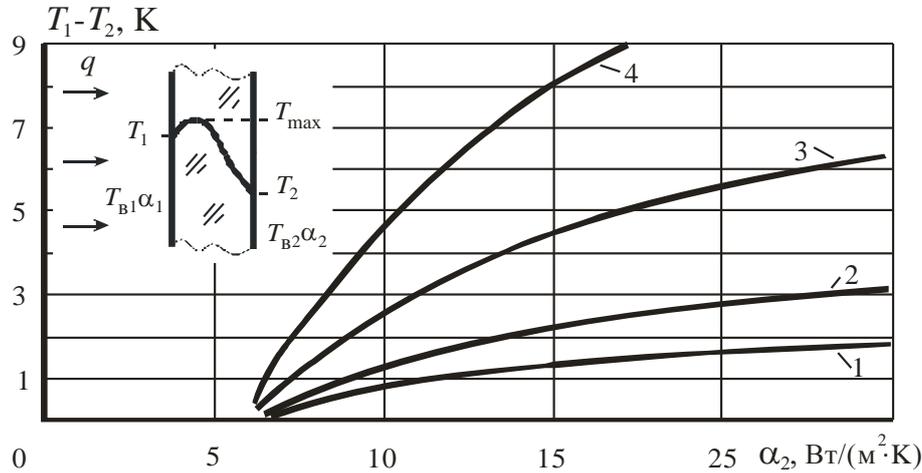


Рис. 3. Зависимость перепада температур между двумя поверхностями закаленного стекла от изменения условий теплоотдачи на необогреваемой поверхности при $\alpha_1 = \text{const} = 5,6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$:
 1 – $q = 4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$; 2 – $q = 7 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$; 3 – $q = 14 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$; 4 – $q = 25 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$

На рис. 4 приведены расчетные и экспериментально полученные значения температур поверхностей органического стекла в кабине автомобиля МАЗ-543 [2]. Расчетом установлено, что разность температур между обогреваемой и необогреваемой поверхностями составляет около 30 %, а T_{max} почти в 2 раза превышает T_2 . Расхождение между расчетными и экспериментально полученными данными не превышает 15 %.

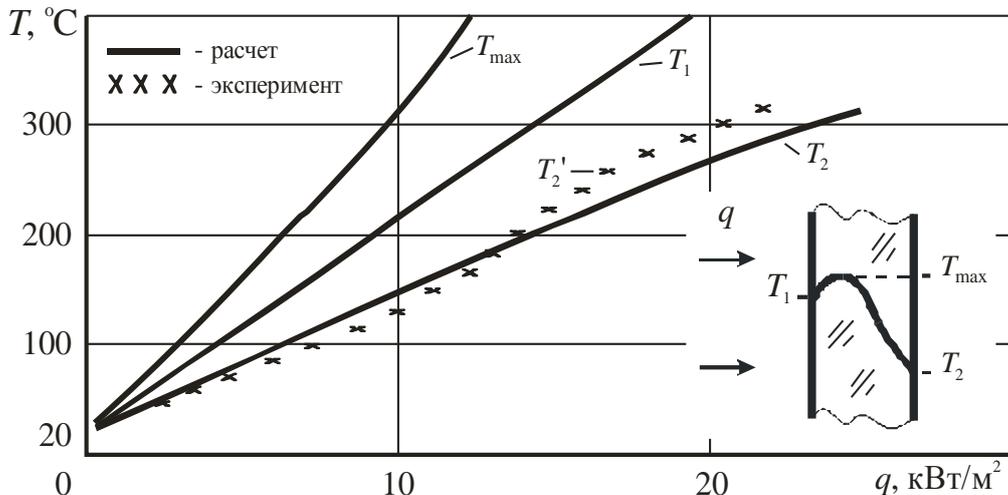


Рис. 4. Зависимость температур поверхностей органического стекла от плотности падающего теплового потока при теплоотдаче излучением и свободной конвекцией

Для установления зависимости температуры средней по толщине стекла от продолжительности нагревания при нестационарном режиме было составлено уравнение теплового баланса для остекления кабины автомобиля [4]:

$$c \frac{dT}{d\tau} = k_{\text{п}} q - \alpha_1 (T - T_{\text{в1}}) - \alpha_2 (T - T_{\text{в2}}) \quad (9)$$

с начальными условиями: при $\tau = 0 \rightarrow T = T_0$,

где T – средняя по объему температура стекла, К.

Уравнение (9) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первой степени. Запишем это уравнение в стандартной форме:

$$\frac{dT}{d\tau} + T \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{c} = \frac{k_{\text{п}} q + \alpha_1 T_{\text{в1}} + \alpha_2 T_{\text{в2}}}{c}. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$T = \frac{k_{\text{п}} q + \alpha_1 T_{\text{в1}} + \alpha_2 T_{\text{в2}}}{\alpha_1 + \alpha_2} + C e^{-\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{c} \tau}, \quad (11)$$

где C – константа интегрирования.

Определим значение C из начального условия: при $\tau = 0 \rightarrow T = T_0$. Тогда

$$C = T_0 - \frac{k_{\text{п}} q + \alpha_1 T_{\text{в1}} + \alpha_2 T_{\text{в2}}}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (12)$$

Для установившегося (стационарного) режима, при $\tau \rightarrow \infty$:

$$T = T_{\text{ст}} = \frac{k_{\text{п}} q + \alpha_1 T_{\text{в1}} + \alpha_2 T_{\text{в2}}}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (13)$$

Таким образом

$$T = T_{\text{ст}} + \left(T_0 - T_{\text{ст}} \right) e^{-\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{c} \tau}. \quad (14)$$

Коэффициенты теплоотдачи могут быть определены по формулам:

- при теплоотдаче свободной конвекцией (при скорости ветра, равной нулю, и неработающей системе вентиляции) [2]

$$\alpha_1 = 1,98 \left(T - T_{в1} \right)^{0,25} ;$$

$$\alpha_2 = 1,98 \left(T - T_{в2} \right)^{0,25} ;$$

- при скорости ветра V , не равной нулю [2]

$$\alpha_1 = 7,21V^{0,25} .$$

Результаты расчетов температуры остекления автомобиля по формуле (14) представлены на рис. 5, где показана динамика нагревания остекления автомобиля солнечной радиацией при различных скоростях ветра. Здесь же показаны результаты экспериментальных исследований по данным работы [2].

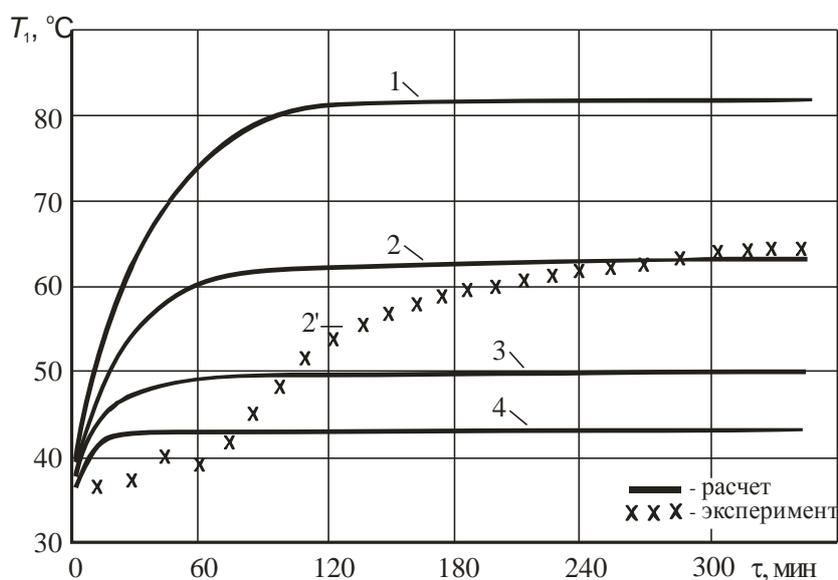


Рис. 5. Изменение температуры остекления кабины ЗиЛ-130 при воздействии солнечной радиации $T_{в1}=34$ °C; $T_{в2}=f(\tau)$:

$$1 - V_B = 0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; 2, 2' - V_B = 2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; 3 - V_B = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; 4 - V_B = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

Экспериментальная установившаяся температура остекления соответствует расчетной при скорости ветра, примерно равной $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом скорость изменения температуры в эксперименте существенно отличается от расчетной. Такое расхождение объясняется, по-видимому, наличием порывов ветра при проведении эксперимента, что замедляло нагревание объекта.

Выводы. На основании выполненных исследований разработана математическая модель процесса теплообмена окружающей среды со светопрозрачными элементами ограждения кабины автомобиля, состоящая из уравнений (5), (8), (14). Модель позволяет рассчитывать температуру остекления в стационарном и нестационарном режимах нагревания.

Список литературы / References

1. Аvezов Р.Р. Влияние коэффициента ослабления солнечного излучения светопрозрачных ограждений на тепловые потери через них / Р.Р. Аvezов, Н.Р. Аvezова // Гелиотехника. – 2012. – № 2. – С. 34–45.

Avezov, R.R. and Avezova, N.R. (2012). *Vliyanie koeffitsienta oslableniya solnechnogo izlucheniya svetoprozrachnykh ograzdeniy na teplovyye poteri cherez nikh* [Influence of the attenuation coefficient of solar radiation of translucent protections on thermal losses through them]. *Geliotekhnika*, no. 2, pp. 34 – 35.

2. Исхаков Х.И. Защита автотранспортных средств от воздействия тепловых потоков пожара: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03, 05.26.01 / Харис Исхакович Исхаков; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М., 1991. – 338 с.

Iskhakov, Kh.I. (1991). *Sashchita avtotransportnykh sredstv ot vozdeystviya teplovykh potokov pozhara*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Protection of trucking facilities against influence of thermal flows of a fire. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Mosc. gos. tekhn. univ. im. N.E. Baumana, 338 p.

3. Зарубин В.С. Температурные поля конструкций летательных аппаратов / В.С. Зарубин. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.

Zarubin, V.S. (1978). *Temperaturnyye polya konstruktsiy letatel'nykh apparatov* [Temperature fields of airplane structures]. Moscow, Mashinostroyeniye, 184 p.

4. Соколянский В.В. Аналитическое выражение для температуры светопрозрачных ограждений кабин автомобилей на пожаре // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – Макеевка: ДГАСА, 1996. – Вып. 96-3(4). – С. 161 – 163.

Sokolyanskiy, V.V. (1996). *Analiticheskoye vyrazheniye dlya temperatury svetoprozrachnykh ograzhdeniy kabin avtomobiley na pozhare* [Analytical expression for the temperature of translucent protections of vehicle cabs on a fire]. *Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy akademii stroitel'stva i arkhitektury* [Bulletin of the Donbass state academy of building and architecture]. Makeyevka, DGASA, issue 96-3(4), pp. 161 – 163.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Г. Стариковой.
Дата поступления рукописи 30.06.2015

Purpose. To investigate the process of heating the cab windows of the fire-fighting vehicles with the outside thermal flow taking into account peculiarities of the heat exchange process in translucent protections.

Methods. Theoretical analysis of the heat exchange processes by the outside heat influence on the cab windows of the vehicle; bench and full-scale tests of the translucent elements of the protections.

Results. On the ground of the heat balance equation the analytical dependences to determine the average temperature of the cab windows of the vehicles by influence of the outside thermal radiation were received. The comparative analysis of the calculation results by exact and approximate formulae was carried out. The theoretical calculations are confirmed with the results of the experimental investigations.

Conclusion. The mathematical model of the heat exchange process of the environment with the translucent elements of the protection of the vehicle cab permitting to calculate the temperature of the cab windows by the outside thermal influence is worked out.

Keywords: cab of vehicle, translucent protections, windows, heat flow, temperature field, thermal losses, mathematical model, stationary thermal conditions, non-stationary thermal conditions.

УДК 622.822.22

*С.П. Греков, д-р техн. наук, замнач. отд., Е.А. Головченко, нач. отд.
НИИГД «Респиратор», Донецк*

СВЯЗЬ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ УГЛЕЙ И ЭНДОГЕННОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ

*S.P. Grekov, Dr. Sci. (Tech.), deputy head of department, Ye.A. Golovchenko,
head of department (NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

RELATIONSHIP OF THE ACTIVATION ENERGY OF COALS TO ENDOGENOUS FIRE HAZARD

Цель. Раскрытие механизма влияния энергии активации на пожароопасность угольного скопления путем обобщения и анализа накопленного за длительный период времени материала об эндогенных пожарах на угольных шахтах Донбасса.

Методика. Анализ и обобщение материалов по химической активности углей, критической температуре самовозгорания, энергии активации и других факторов, определяющих склонность углей к самовозгоранию.

Результаты. Изучено около 30 случаев окисления углей в лабораторных условиях, найдены их химическая активность, критические температуры самовозгорания, скорости тепловыделения, коэффициенты внутренней диффузии, энергии активации. Исследована зависимость химической активности углей от степени их метаморфизма и показано, что она имеет максимальное значение при содержании горючих около 25 %.

Исследована зависимость критической температуры самовозгорания углей от количества выделенной при окислении угля теплоты, приходящейся на 1 м² реакционной поверхности, и получено выражение для ее вычисления.

Исследования показали, что энергия активации определяется соотношением теплоты, выделяемой при реакции окисления углей, и коэффициентом внутренней диффузии, параметром химической активности углей, зависящим от степени углефикации. Предложена аналитическая зависимость для ее вычисления.

Проанализировано и изучено 66 шахтопластов Донбасса, на которых за 10-летний период возникло более 250 пожаров. Сопоставление энергии активации на этих пластах с количеством возникших пожаров позволило получить между ними корреляционную зависимость.

Научная новизна. Раскрыт механизм влияния энергии активации на пожароопасность угольного скопления, заключающийся в совместном действии химической активности и количества выделяемой при самонагревании угля теплоты, приходящейся на 1 м² реакционной поверхности.

Практическая значимость. Предложена зависимость для вычисления возможного количества пожаров от энергии активации для углей шахт Донецкого бассейна.

Ключевые слова: уголь, пожароопасность, активация, самовозгорание, Донбасс.

Постановка задачи. Энергия активации – основной параметр, характеризующий скорость реакции окисления угля кислородом воздуха: чем больше энергия активации, тем медленнее при данной температуре идет реакция. Для различных температур константы скорости реакции k , с⁻¹, определяют по закону Аррениуса:

$$k = k_0 \exp\left[-E/RT\right], \quad (1)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель;

E – энергия активации, Дж/моль;
 R – газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T – температура, К.

Первые данные о процессе окисления углей были получены на основе термогравиметрических исследований при нагревании с постоянной скоростью. Установлено, что при температуре до 70 °С доминирует процесс образования пероксидов, в интервале от 70 до 150 °С доминирующим становится процесс разложения этих пероксидов; от 120...150 °С – процесс образования относительно более устойчивых «угольно-кислородных комплексов». Энергия активации на первой стадии 1,5...16,7 кДж/моль, на второй 25...29 кДж/моль, на третьей 62...71 кДж/моль.

В НИИГД «Респиратор» значения энергии активации и предэкспоненциального множителя определяют по результатам исследований температурной зависимости скорости окисления углей в интервале температур от начальной T_0 до критической $T_{кр}$ по известной из физической химии формуле

$$E = R(\ln k_{кр} - \ln k_{л}) / \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{кр}} \right), \quad (2)$$

где $k_{кр}$ – константа скорости окисления угля при критической температуре, с⁻¹;
 $k_{л}$ – константа скорости окисления угля при начальной температуре лабораторного опыта, с⁻¹;
 T_0 – начальная температура окисления, К;
 $T_{кр}$ – значение температуры, при которой происходит изменение процесса взаимодействия кислорода с углем, что характеризует период начала разложения адсорбционных комплексов перекисного типа и приводит к резкому возрастанию скорости реакций, К.

В работе [1] накоплен значительный экспериментальный материал по определению констант скоростей химических реакций для углей шахт Донбасса, критических температур самовозгорания и количеству эндогенных пожаров.

Цель настоящей работы – раскрытие механизма влияния энергии активации на пожароопасность угольного скопления путем обобщения и анализа накопленного за длительный период времени материала об эндогенных пожарах на угольных шахтах Донбасса.

Материалы исследований. Воспользуемся экспериментальными данными автора [1] по 28 шахтопластам с исследованиями констант скоростей химических реакций и критических температур самовозгорания (табл. 1).

Значения энергии активации найдем из теоретической формулы

$$T_{кр} = \frac{E}{2R} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4R}{E} T_0} \right), \quad (3)$$

откуда

$$E = \frac{T_{кр}^2 R}{T_{кр} - T_0} \quad (4)$$

Таблица 1

Характеристики углей

| Шахта | V^r | Пласт | $T_{кр},$ К | $k_{кр} \cdot 10^2,$ c^{-1} | $E,$ Дж/моль | $k_0,$ c^{-1} | $\ln \left(\frac{k_{кр}}{k_0} \right)$ | $D \cdot 10^7, m^2/c$ | $v_{go} \cdot 10^{-3},$ Дж/моль | $\frac{v_{go} \cdot 10^{-9},}{D} \frac{Дж}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{М}^2}$ |
|-------------------------|-------|-------|----------------|----------------------------------|-----------------|--------------------|---|-----------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| «Комсомолец» | 30 | l_3 | 366 | 0,31 | 16866 | 0,79 | -5,54 | 2,6 | 2,4 | 8,1 |
| Им. А.И. Гаевого | 22 | l_3 | 360 | 0,40 | 17950 | 1,51 | -6 | 2,5 | 2,5 | 10,0 |
| Им. Ю.А. Гагарина | 25 | l_1 | 358 | 0,14 | 18363 | 0,67 | -6,11 | 1,9 | 3,7 | 9,4 |
| « | 25 | l_3 | 358 | 0,43 | 18363 | 2,06 | -6,17 | 2,54 | 2,7 | 10,6 |
| Им. М.И. Калинина | 20 | l_6 | 370 | 0,15 | 16252 | 0,3 | -5,29 | 1,9 | 2,4 | 12,6 |
| «Северная» | 20 | l_1 | 358 | 0,28 | 18363 | 1,34 | -6,17 | 2,3 | 3,1 | 13,4 |
| « | 25 | l_3 | 355 | 0,43 | 19042 | 2,73 | -6,45 | 2,54 | 3,0 | 11,8 |
| «Горецкая» | 28 | l_3 | 372 | 0,25 | 15972 | 0,44 | -5,17 | 2,24 | 1,9 | 8,5 |
| Им. А.Ф. Засядько» | 36 | l_1 | 373 | 0,23 | 15837 | 0,38 | -9,1 | 2,18 | 5,9 | 27,1 |
| « | 34 | m_3 | 375 | 0,28 | 15581 | 0,41 | -5 | 1,9 | 2,4 | 12,6 |
| «Куйбышевская» | 36 | l_4 | 366 | 0,90 | 16866 | 2,3 | -5,54 | 2,87 | 4,1 | 14,3 |
| «Моспинская» | | h_4 | 370 | 0,9 | 16252 | 1,78 | -5,3 | 2,87 | | |
| Им. А.А. Скочинского | 31 | h_6 | 353 | 0,82 | 19537 | 1,56 | -5,25 | 2,84 | 3,2 | 11,2 |
| Им. Челюскинцев | 33 | m_3 | 360 | 0,65 | 17950 | 2,62 | -6 | 2,74 | 3,0 | 10,9 |
| Им. В.М. Бажанова | 27 | m_3 | 368 | 0,36 | 16550 | 0,8 | -5,4 | 2,43 | 3,0 | 13,3 |
| «Калиновская-Восточная» | 20 | l_1 | 370 | 0,1 | 16252 | 2,17 | -5,28 | 3,4 | 2,9 | 8,5 |
| Им. К.И. Поченкова | 34 | m_3 | 357 | 0,33 | 18580 | 1,59 | -6,17 | 2,4 | 3,5 | 14,6 |
| Им. К.И. Поченкова | 25 | l_1 | 370 | 0,6 | 1625 | 1,18 | -5,28 | 2,7 | 2,9 | 10,7 |
| «Чайкино» | 30 | l_3 | 357 | 0,47 | 18580 | 2,47 | -6,25 | 2,58 | 3,2 | 12,4 |
| «Александровская» | 9 | l_1 | 375 | 0,2 | 15581 | 0,3 | -5 | 2,1 | 1,4 | 6,7 |
| «Булавинская» | 10 | l_3 | 366 | 0,25 | 16866 | 0,64 | -5,55 | 2,03 | 1,9 | 7,2 |
| «Красный Октябрь» | 15 | l_1 | 370 | 0,3 | 16252 | 0,59 | -5,28 | 2,35 | 2,4 | 10,2 |
| «Полтавская» | 7 | l_1 | 380 | 0,23 | 14999 | 0,26 | -4,72 | 2,18 | 1,4 | 6,4 |
| « | 8 | l_3 | 382 | 0,24 | 14788 | 0,26 | -4,68 | 2,211 | 1,5 | 6,7 |
| «Ольховатская» | 8 | l_3 | 365 | 0,18 | 17032 | 0,49 | -5,6 | 2,04 | 1,6 | 7,8 |
| «Юнком» | 15 | l_1 | 357 | 0,3 | 18580 | 1,57 | -6,26 | 2,55 | 2,3 | 9,0 |
| «Донецкая» | 7 | h_4 | 379 | 0,8 | 15109 | 0,97 | -4,8 | 2,87 | 3,2 | 11,3 |

Найденные значения энергии активации для всех экспериментов представлены в графе 6 табл. 1. Там же в графе 7 представлены значения k_0 , определенные по формуле (1).

Поскольку влияние энергии активации E сказывается на эндогенной пожароопасности через константу скорости химической реакции, то будем искать зависимость эндогенной пожароопасности от химической активности угля, определяемой параметрами $k_{кр}$ и k_0 .

Воспользуемся экспериментальными данными, приведенными в табл. 1, и построим зависимость E от $\ln(k_{кр}/k_0)$ (рис. 1).

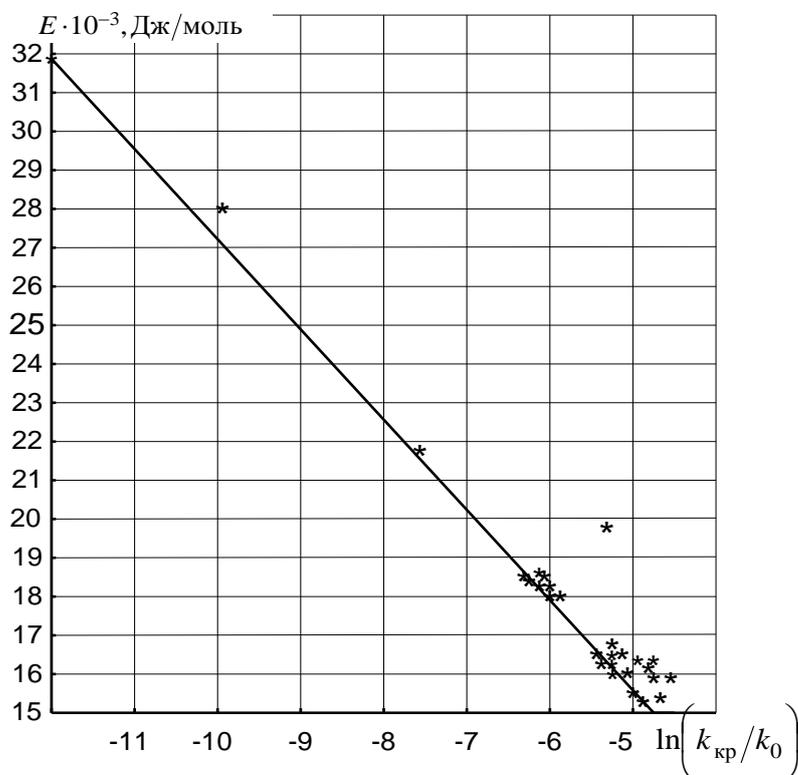


Рис. 1. Зависимость энергии активации от химической активности углей

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретической зависимостью

$$E = -T_{кр} R \ln \left(\frac{k_{кр}}{k_0} \right), \quad (5)$$

найденной из формулы (1), что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Некоторый разброс данных связан с тем, что в опытах использовали угли разной степени метаморфизма.

Согласно формуле (5) энергия активации E для углей различной степени углефикации зависит от их химической активности и критической температуры самовозгорания.

С целью выявления зависимости химической активности углей от степени их метаморфизма воспользуемся данными табл. 1 и построим зависимость $\ln(k_{кр}/k_0)$ от содержания в углях летучих горючих V^f (рис. 2).

Как следует из представленных результатов, несмотря на значительный разброс данных, прослеживается четкая зависимость химической активности углей от содержания горючих с максимумом при $V^f \approx 25\%$.

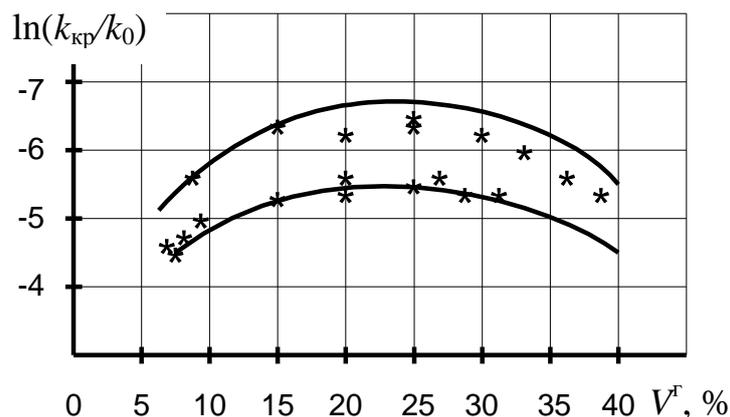


Рис. 2. Зависимость химической активности углей от степени метаморфизма

Критические температуры самовозгорания углей – это температуры, при которых происходит изменение процесса взаимодействия кислорода с углем и характера аккумуляции теплоты в процессе окисления. Согласно данным экспериментальных исследований [1] они для различных углей колеблются в широком диапазоне (323...393 К).

Изменение процесса окисления углей зависит от свойств угольного вещества, в том числе коллекторных, определяемых фильтрационным объемом и коэффициентом внутренней диффузии.

Поэтому можно предположить, что критические температуры угля зависят от соотношения параметров скорости выделения теплоты ν_{qo} , Дж/(моль·с), и коэффициентов внутренней диффузии D , м²/с.

Воспользуемся работой [2], в которой найдены скорости выделения теплоты для углей шахт, представленных в табл. 1, и работой [3], где даны коэффициенты внутренней диффузии, и построим зависимость $T_{кр}$, К, от ν_{qo}/D , Дж/(моль·м²) (рис. 3).

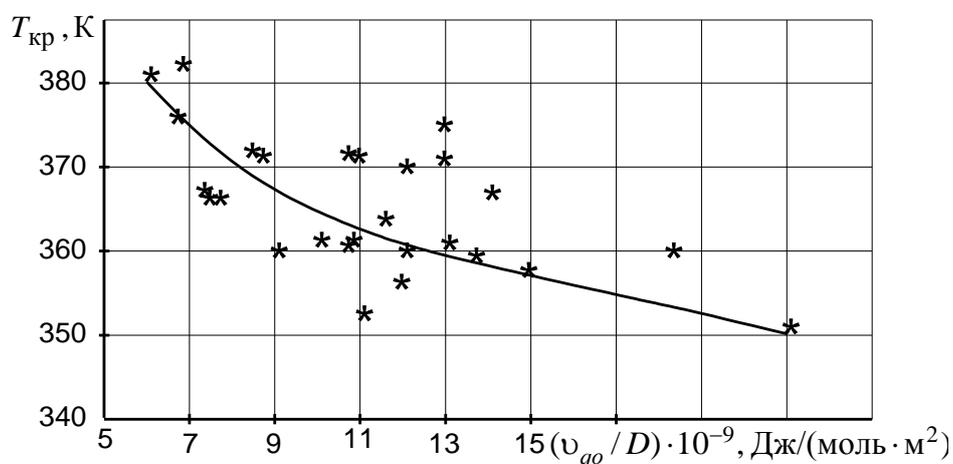


Рис. 3. Зависимость критической температуры самовозгорания угля от соотношения скорости тепловыделения и коэффициента внутренней диффузии в углях

Эта зависимость описывается выражением

$$T_{кр} = 1835 \left(\frac{v_{qo}}{D} \right)^{-0,07}. \quad (6)$$

Как следует из представленных результатов, несмотря на значительный разброс экспериментальных данных, все же прослеживается связь $T_{кр} = f(v_{qo}/D)$, характеризующая снижение критической температуры с увеличением количества теплоты, приходящейся на 1 м² реакционной поверхности.

Таким образом, энергия активации определяется соотношением теплоты, выделяющейся при окислительной реакции угля, и коэффициента внутренней диффузии и параметров $\ln(k_{кр}/k_0)$, зависящих от степени метаморфизма углей.

Используя уравнения (5) и (6), можно записать

$$E = -1835 \left(\frac{v_{qo}}{D} \right)^{-0,07} R \ln \left(\frac{k_{кр}}{k_0} \right). \quad (7)$$

В монографии [1] отмечено, что в науке отсутствуют объективные критерии достоверности предложенных методов определения склонности углей к самовозгоранию. В качестве такого критерия автор [1] использовал наличие или отсутствие зависимости между интенсивностью возникновения пожаров и показателем химической активности углей. Он исходил из предположения, что наличие этой зависимости должно свидетельствовать об объективности предложенного показателя и его связи с самовозгоранием угля. При этом подчеркивалось, что химическая активность могла реализоваться в эндогенный пожар при наличии условий образования скоплений отбитого или разрыхленного угля и доступа к нему кислорода. Автором проанализировано 82 случая определения химической активности угля и количество возникших эндогенных пожаров и дана корреляционная зависимость между ними.

Так как химическая активность является отражением энергии активации углей, которая зависит также от критической температуры их самовозгорания, то будет правильным искать количество возникших эндогенных пожаров в зависимости от энергии активации. Воспользуемся данными автора [1] о количестве эндогенных пожаров и химической активности угля и данными работы [2] о тепловом эффекте окисления и вычислим согласно выражению (7) энергию активации углей.

Сопоставление значений энергии активации углей, найденных при исследовании 66 шахтопластов Донецкого бассейна, с фактическим количеством эндогенных пожаров (табл. 2), возникших за 10-летний период на этих пластах, позволило построить график распределения количества возникших эндогенных пожаров $N_{п}$ в зависимости от энергии активации E , представленный на рис. 4.

Таблица 2

Энергия активации углей Донецкого бассейна и количество
эндогенных пожаров

| Шахта | Пласт | Скорость тепло- выделения $v_0 \cdot 10^{-3}$, Дж/(моль·с) | Коэффициент диффузии $D \cdot 10^7$, м ² /с | $\frac{v_0}{D} \cdot 10^{-9}$, Дж/ моль·м ² | Константа скорости окисления $k_{кр} \cdot 10^2$, с ⁻¹ | Предэкспоненциаль- ный множитель k , с ⁻¹ | $\ln \frac{k_{кр}}{k_0}$ | Энергия актива- ции E , Дж/моль | Количество пожаров за 10 лет |
|---------------------|----------|---|---|---|--|--|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Им. В.И. Ленина | l_5 | 3,24 | 2,88 | 11,25 | 0,145 | 0,46 | -5,76 | 17380 | - |
| « | l_4 | 3,24 | 2,83 | 11,44 | 0,050 | 0,17 | -5,83 | 17565 | 1 |
| « | l_3 | 3,08 | 2,48 | 12,42 | 0,159 | 0,64 | -6,00 | 17950 | 8 |
| « | l_2 | 3,03 | 2,88 | 10,52 | 0,117 | 0,35 | -5,69 | 1705 | 5 |
| « | k_7 | 2,97 | 2,96 | 10,3 | 0,139 | 0,37 | -5,58 | 16966 | - |
| « | k_7 | 3,03 | 2,86 | 10,59 | 0,125 | 1,55 | -7,12 | 20656 | 1 |
| « | k_4 | 2,62 | 2,73 | 9,59 | 0,226 | 0,54 | -5,49 | 16705 | 2 |
| « | k_4 | 2,68 | 2,73 | 9,82 | 0,158 | 0,54 | -5,49 | 16705 | - |
| Им. Ю.А. Гагарина | m_2 | 2,86 | 3,71 | 7,71 | 0,120 | 0,20 | -5,11 | 15837 | 1 |
| «Комсомолец» | m_3 | 2,92 | 2,94 | 9,60 | 0,261 | 0,62 | -5,48 | 16705 | - |
| « | l_3 | 2,1 | 2,61 | 8,1 | 0,307 | 0,61 | -5,28 | 16250 | 10 |
| Им. М.И. Калинина | l_5 | 2,56 | 2,61 | 9,8 | 0,064 | 0,15 | -5,48 | 16705 | 4 |
| « | l_4 | 2,50 | 2,68 | 9,33 | 0,181 | 0,41 | -5,41 | 16550 | 1 |
| « | k_7 | 2,26 | 2,60 | 9,08 | 0,149 | 0,31 | -5,35 | 16398 | 12 |
| Им. К.А. Румянцева | k_7 | 2,43 | 2,86 | 8,49 | 0,093 | 0,18 | -5,2 | 16252 | 1 |
| « | l_8 | 2,56 | 2,72 | 9,42 | 0,142 | 0,31 | -5,41 | 16550 | 2 |
| « | l_5 | 2,68 | 2,42 | 11,07 | 0,204 | 0,58 | -5,64 | 17035 | 5 |
| « | l_3 | 2,74 | 2,34 | 11,71 | 0,141 | 0,48 | -5,84 | 17534 | - |
| «Александр-Запад» | l_1 | 1,81 | 2,62 | 6,96 | 0,198 | 0,29 | -4,84 | 15580 | 15 |
| « | l_3 | 2,14 | 2,74 | 7,81 | 0,131 | 0,22 | -5,17 | 15972 | - |
| « | k_7 | 1,62 | 1,82 | 8,90 | 0,173 | 0,36 | -5,35 | 16398 | - |
| « | h_{10} | 1,72 | 1,68 | 10,23 | 0,156 | 0,43 | -5,61 | 17032 | - |
| «Торецкая» | l_4 | 3,24 | 1,95 | 16,62 | 0,092 | 0,17 | -6,66 | 19538 | 1 |
| Им. С. Тюленина | kn_2 | 2,49 | 2,07 | 12,03 | 0,238 | 0,68 | -5,92 | 17754 | - |
| «Победа» | h_8 | 3,29 | 2,56 | 12,85 | 0,387 | 1,56 | -6,00 | 17950 | - |
| « | l_3 | 3,24 | 2,4 | 13,50 | 0,294 | 1,29 | -6,08 | 18152 | - |
| « | kn_2 | 3,33 | 2,67 | 12,47 | 0,321 | 1,21 | -6,93 | 17754 | - |
| Им. XXV съезда КПСС | k_2^2 | 2,92 | 2,96 | 9,86 | 0,247 | 0,65 | -5,58 | 196 | 2 |
| « | n_1 | 3,57 | 1,82 | 19,62 | 0,189 | 2,34 | -7,12 | 10650 | - |
| Им. Ильича | l_2 | 2,56 | 2,88 | 8,89 | 0,073 | 0,15 | -5,34 | 16398 | 1 |
| «Вергилевская» | l_4 | 1,72 | 2,5 | 6,88 | 0,207 | 0,29 | -4,95 | 15458 | 1 |
| Им. М.В. Чеснокова | l_8 | 3,13 | 2,6 | 12,03 | 0,173 | 0,64 | -5,92 | 17754 | 3 |
| «Панфиловская» | k_8 | 3,48 | 2,4 | 14,50 | 0,154 | 0,88 | -5,36 | 18807 | - |
| « | m_3 | 3,71 | 2,4 | 15,45 | 0,144 | 0,92 | -6,46 | 19041 | - |
| «Бутовка-Донецкая» | n_1 | 3,53 | 2,34 | 13,90 | 0,126 | 0,60 | -6,17 | 18363 | 2 |
| Им. А.Ф. Засядько | m_3 | 5,9 | 2,76 | 20,29 | 0,227 | 3,19 | -7,25 | 20966 | 3 |
| « | k_8 | 3,13 | 2,76 | 11,34 | 0,265 | 0,75 | -5,65 | 17035 | - |
| « | l_4 | 3,33 | 2,95 | 11,29 | 0,178 | 0,50 | -5,65 | 17035 | - |
| « | l_1 | 2,4 | 1,67 | 14,37 | 0,283 | 1,48 | -6,26 | 18580 | 4 |
| «Красногвардейская» | l_1 | 3,24 | 2,81 | 11,53 | 0,224 | 0,76 | -5,84 | 17565 | 13 |

Окончание табл. 2

| Шахта | Пласт | Скорость тепло-выделения $v_0 \cdot 10^{-3}$, Дж/(моль·с) | Коэффициент диффузии $D \cdot 10^7$, м ² /с | $\frac{v_{qo}}{D} \cdot 10^{-9}$, Дж/моль·м ² | Константа скорости окисления $k_{кр} \cdot 10^2$, с ⁻¹ | Предэкспоненциальный множитель k , с ⁻¹ | $\ln \frac{k_{кр}}{k_0}$ | Энергия активации E , Дж/моль | Количество пожаров за 10 лет |
|----------------------|---------|--|---|---|--|--|--------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| «Горняк» | l_7 | 3,53 | 1,72 | 20,52 | 0,183 | 2,57 | -7,24 | 10966 | 14 |
| « | l'_8 | 3,53 | 2,33 | 15,15 | 0,170 | 0,89 | -6,26 | 18580 | - |
| «Курахова» | k_8 | 3,66 | 2,60 | 14,08 | 0,10 | 0,52 | -6,26 | 18580 | 7 |
| Им. Г.Г. Капустина | m_3 | 3,50 | 1,90 | 18,42 | 0,188 | 1,83 | -6,88 | 20075 | 29 |
| «Новодружеская» | k^H_8 | 3,71 | 2,36 | 15,72 | 0,133 | 0,85 | -6,45 | 19041 | 15 |
| « | k^B_8 | 3,71 | 2,67 | 13,90 | 0,190 | 0,33 | -5,16 | 15363 | - |
| «Матросская» | m^B_3 | 3,66 | 2,40 | 15,25 | 0,293 | 1,86 | -6,45 | 19041 | - |
| «Кременная» | k^H_8 | 3,53 | 2,21 | 15,97 | 0,169 | 1,18 | -6,55 | 19285 | 8 |
| « | l'_1 | 3,62 | 2,5 | 14,45 | 0,167 | 0,96 | -6,37 | 18807 | 2 |
| «Никанор» | l_4 | 1,72 | 2,07 | 8,3 | 0,263 | 0,49 | -5,22 | 16110 | 2 |
| Им. Артема | l^o_1 | 2,14 | 2,09 | 10,23 | 0,345 | 0,95 | -5,62 | 17032 | 17 |
| «Углегорская» | k^l_7 | 1,51 | 3,2 | 4,72 | 0,248 | 0,22 | -4,49 | 14397 | 1 |
| « | l_1 | 1,62 | 2,1 | 7,71 | 0,99 | 1,64 | -5,11 | 15838 | - |
| «Булавинская» | l_1 | 1,62 | 1,97 | 8,22 | 0,189 | 0,35 | -5,22 | 16110 | 16 |
| Им. К. Маркса | k^H_4 | 2,14 | 2,99 | 7,15 | 0,183 | 0,27 | -4,99 | 15580 | 5 |
| « | m^l_9 | 2,50 | 2,76 | 9,06 | 0,203 | 0,43 | -5,35 | 16398 | 1 |
| «Юнком» | k_8 | 1,81 | 2,04 | 8,87 | 0,300 | 0,62 | -5,34 | 16398 | 1 |
| «Коммунист» | g_8 | 1,28 | 4,0 | 3,16 | 0,500 | 0,30 | -4,09 | 13502 | 1 |
| Им. XVII съезда КПСС | k^2_2 | 1,62 | 3,93 | 4,12 | 0,439 | 0,33 | -4,33 | 14044 | - |
| «Изваринская» | k^H_2 | 2,80 | 2,7 | 10,37 | 0,242 | 0,66 | -5,62 | 17032 | - |
| « | i_3 | 2,56 | 2,9 | 8,82 | 0,242 | 0,50 | -5,35 | 16398 | - |
| «Западная» | i_3 | 2,86 | 2,82 | 10,14 | 0,350 | 0,89 | -5,54 | 16866 | - |
| «Донецкая» | k^H_2 | 3,03 | 2,74 | 11,05 | 0,357 | 1,05 | -5,58 | 17204 | - |
| «Центральная» | k^B_3 | 2,80 | 2,52 | 11,11 | 0,217 | 0,62 | -5,64 | 17035 | - |
| «Краснодонская» | m^l_8 | 1,14 | 3,93 | 2,9 | 0,348 | 0,20 | -4,02 | 13363 | - |

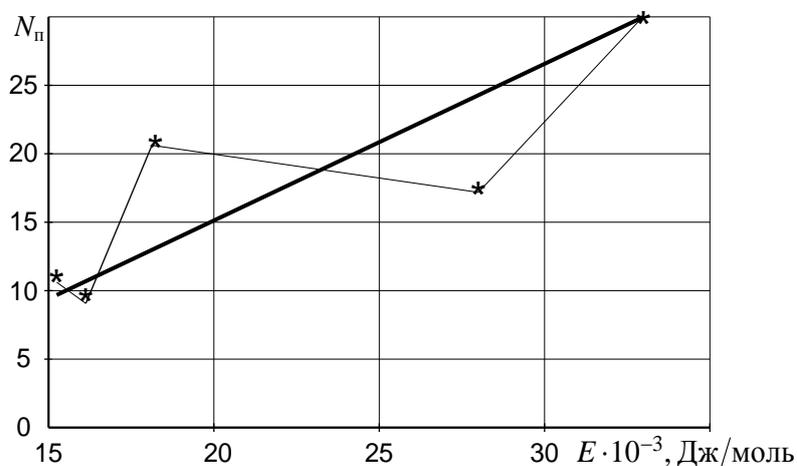


Рис. 4. Зависимость количества эндогенных пожаров от энергии активации углей

Корреляционная зависимость количества пожаров от энергии активации может быть представлена зависимостью

$$N_{\text{п}} = -9,37 + 1,16 \cdot 10^{-3} E. \quad (8)$$

Из полученных данных следует, что энергия активации углей является одним из факторов, который необходимо учитывать при оценке пожароопасности угольных скоплений. С физической точки зрения даже у активных, легкоокисляющихся углей, имеющих высокую энергию активации, определяемую большой химической активностью и критической температурой, процесс самовозгорания может не перейти в возгорание вследствие затруднений накопления теплоты при высоких температурах. И, наоборот, угли, имеющие небольшую энергию активации, могут самовозгореть вследствие даже небольшого повышения температуры при низкотемпературном окислении. Как отмечает автор [1], наглядным подтверждением данного тезиса являются весьма частые случаи самовозгорания угля на пласте m_3 шахты им. Г.Г. Капустина, где критическая температура самовозгорания всего 327 К при весьма низком значении константы скорости окисления.

Выводы. Таким образом, энергия активации является одним из важных показателей, характеризующих способность углей самовозгораться. Умение определять ее экспериментально или вычислять на основании найденных опытным путем химической активности углей, скорости тепловыделения, коэффициентов внутренней диффузии или критической температуры самовозгорания позволит уточнить расчеты, связанные с определением возможности самовозгорания конкретного угольного скопления.

Список литературы / References

1. Пашковский П.С. Эндогенные пожары на угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.
Pashkovskiy, P.S. (2013). *Endogennyye pozhary na ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires at coal mines]. Donetsk, Knowledge, 791 p.
2. Греков С.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46 – 50.
Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Orlikova, V.P. (2014). *Teplovoy effect okisleniya ugley i endogennaya pozharoопасnost* [Heat effect of coal oxidation and endogenous fire hazard]. *Ugol Ukrainy*, no. 10, pp. 46 – 50.
3. 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. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2014. – Вып. 51. – С. 78 – 87.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. and Salakhutdinov, T.G. (2014). *Raschet koeffitsientov diffuzii v uglyakh s ispol'zovaniyem khromatograficheskogo metoda* [Calculation of diffusion coefficients 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, issue 51, pp. 78 – 87.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 14.05.2015

Purpose. Disclosure of the mechanism of influence of the activation energy on the fire hazard of a coal accumulation by means of generalization and analysis of the material about endogenous fires at the mines of the Donets Basin stored during the long period of time.

Methodology. Analysis and generalization of the materials on chemical activity of coals, critical temperature of spontaneous combustion, activation energy and other factors determining liability of coals to spontaneous combustion.

Results. About 30 cases of oxidation of coals under laboratory conditions were studied, their chemical activity, critical temperatures of spontaneous combustion, heat generation velocities, internal diffusion coefficients, activation energies were found. The dependence of the chemical activity of coals on the degree of their metamorphism was investigated. It is shown that it has a maximum value when the content of combustibles is about 25 %.

The dependence of the critical temperature of the spontaneous combustion of coals on the quantity of heat isolated by coal oxidation and being the share of 1 m² of the reaction surface was investigated, and the expression for its calculation was obtained.

The investigations showed that the activation energy is determined by the ratio of heat emitted by the oxidation reaction of coals and the internal diffusion coefficient, i.e. the parameter of the chemical activity of coals depending on the coal rank. The analytical dependence for its calculation was proposed.

66 coal seams of the Donets Basin where over 250 fires during the 10-year period arose were analyzed and studied. The comparison of the activation energy on these seams with the quantity of the fires arisen allowed receiving the correlation dependence between them.

Scientific novelty. The mechanism of influence of the activation energy on the fire hazard of the coal accumulation consisting in the combined action of the chemical activity and quantity of heat isolating by the self-heating of coal being the share of 1 m² of the reaction surface was disclosed.

Practical value. The dependence to calculate the possible quantity of the fires because of the activation energy for coals of the mines of the Donets Basin was proposed.

Keywords: coal, fire hazard, activation, spontaneous combustion, Donets Basin.

УДК 622.822.225

*С.П. Греков, д-р техн. наук, замнач. отд., В.П. Орликова, науч. сотр.
НИИГД «Респиратор», Донецк*

РЕАКЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ УГЛЕЙ

*S.P. Grekov, Dr. Sci. (Tech.), deputy head of department, V.P. Orlikova, scientific associate
(NIIGD "Respirator", Donetsk)*

REACTIONARY ACTIVITY OF COALS

Цель. Моделирование процесса поглощения кислорода углями по ранее разработанным теоретическим предпосылкам образования и распада поверхностного комплексного соединения и экспериментальным данным НИИГД «Респиратор», а также нахождение доли реакционной поверхности, на которой возможны гетерогенные процессы, для различных типов углей, их газоносности и энергии активации.

Методика. Основана на математической модели гетерогенного процесса адсорбции кислорода с реакцией окисления первого порядка и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор».

Результаты. Найдено математическое решение для определения доли поглощенного углем кислорода, которая соответствует доле поверхности угля, вступившей в реакцию окисления, с учетом процесса выделения метана. Для расчета доли поглощенного углем кислорода использованы результаты экспериментального определения склонности углей к самовозгоранию. По результатам исследования скорости образования поверхностного комплексного соединения во времени найдено, что при $t = 300$ ч параметр достигает минимального значения, после которого начинается постепенное увеличение процесса окисления. Аналогичные результаты получены для всех анализируемых углей. Сделано предположение, что параметр, характеризующий реакционную поверхность угля, зависит от его внутренних свойств: петрографического состава, степени метаморфизма, скорости реакции окисления, энергии активации. Поэтому найдены эмпирические зависимости, позволяющие определять константы скорости выделения метана и образования поверхностного комплексного соединения с учетом влияния перечисленных свойств угля.

Научная новизна. Результаты работы позволяют определить долю реакционной поверхности, на которой возможны гетерогенные процессы окисления, для различных типов углей, их газоносности и энергии активации, а также рассмотреть механизм низкотемпературного окисления угля с точки зрения кинетики поверхностного комплексного соединения.

Практическая значимость. Полученные зависимости позволяют определять инкубационный период самовозгорания угля.

Ключевые слова: гетерогенный процесс, доля реакционной поверхности, низкотемпературное окисление, скорость реакции, энергия активации, самовозгорание.

Состояние вопроса. Реакционная активность угля – важнейшая характеристика, от которой зависит процесс выделения теплоты и нагревания угля. Многочисленные исследования позволили эмпирически систематизировать данные об их реакционной способности, хотя некоторые принципиальные вопросы механизма окислительного процесса до конца еще не выяснены. Согласно количественной теории Н.Н. Семенова, горение возникает в результате выделения избытка теплоты при протекании цепных реакций.

На процесс окисления угля воздухом оказывают влияние разные факторы, в том числе размер зерен, влажность, концентрация кислорода, условия теплообмена и др. Одни из первых исследований, в которых окисление материала при изменяющейся температуре связывали с их пористой структурой, отражены в

работах А.С. Скочинского, В.С. Веселовского, В.Ф. Орешко. Математическое описание процессов окисления материалов для интервала температур 30...115 °С и исследование скорости окисления выполнено авторами Н. Sommers, W. Peters, D.L. Carpenter, пришедшими к выводу, что она остается практически постоянной на поверхности микро- и макропор.

Исследование зависимости поглощения кислорода от температуры и размеров частиц для широкого интервала времени описано в работе L. Lenart и O. Abel, а впоследствии авторами А.У. Кам и А.У. Karsner развиты две модели на основе предположений, что скорость поглощения кислорода контролируется его транспортированием в системе пор и находится под кинетическим контролем.

При изучении реакционной способности углей обычно исходят из того, что реакционная поверхность всех частиц угля постоянна и не претерпевает каких-либо изменений [1, 2]. Вместе с тем при гетерогенных процессах реакционная поверхность непрерывно изменяется в связи с тем, что происходит образование и распад поверхностных соединений при адсорбции кислорода, внутреннее реагирование при проникновении кислорода в глубь частиц угля и образование вблизи поверхности частиц твердых продуктов реакции (золы) [2]. На изменение реакционной поверхности влияет также метановыделение и испарение влаги. Последний вопрос затронут в работе [3], но требует дальнейшего развития с учетом всех вышеперечисленных факторов.

Таким образом, на основании многочисленных исследований установлено, что при низкотемпературном окислении материалов протекают реакции кислорода с адсорбентом, приводящие к изменению физико-химических свойств, что в свою очередь влияет на кинетику адсорбционно-реакционного процесса.

Исследование физико-химических свойств углей и их петрографического состава на эндогенную пожароопасность и статистического материала о происшедших пожарах за длительный промежуток времени позволили разработать две методики определения склонности углей к самовозгоранию. Первая из них основана на статистическом материале о пожарах, вторая – на анализе физических процессов адсорбции кислорода углями. При явном преимуществе второй методики остается невыясненным вопрос нахождения доли реакционной поверхности угля, которая принимает участие в окислении. Использование в методике значения 0,01...0,02 теоретически не обоснованно и приводит к искажению расчетного времени инкубационного периода.

Цель исследований. Моделирование процесса поглощения кислорода углями по ранее разработанным теоретическим предположениям образования и распада поверхностного комплексного соединения и экспериментальным данным НИИГД «Респиратор», а также нахождение доли реакционной поверхности, на которой возможны гетерогенные процессы, для различных типов углей, их газоносности и энергии активации.

Методика проведения исследований основана на математической модели гетерогенного процесса адсорбции кислорода с реакцией окисления первого порядка и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор».

Материалы и результаты исследований. Для определения концентрации кислорода в угле воспользуемся зависимостью из статьи [4], упростив ее для случая, когда адсорбция на поверхности пор протекает быстро, что согласно исследованиям П.П. Золотарева характерно для углей:

$$a_{O_2} = \xi_i C_{ст} \sum_{k=0}^{\infty} B_k \frac{\mu_k^2}{\mu_k^2 + \xi_i \Gamma_d} \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu_k^2}{1 + \xi_i} Fo_d\right) \right], \quad (1)$$

где ξ_i – доля поглощенного углем кислорода;

$C_{ст}$ – концентрация кислорода в межкусковом пространстве на границе с углем, моль/м³, определяется зависимостью

$$C_{ст} = C_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{0,76}{0,83 + J_0 \rho} 1,1 \cdot 10^{-5} t\right) \right], \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация кислорода в межкусковом пространстве угля, моль/м³;

J_0 – газоносность пласта, м³/т;

ρ – плотность угля, т/м³;

t – время, с;

B_k, μ_k – коэффициенты, определяемые в зависимости от значения Bi (критерия Био) по таблицам А.В. Лыкова;

$\Gamma_d = kR^2/D$;

$Fo_d = tD/R^2$;

D – коэффициент внутренней диффузии, м²/с;

k – константа скорости химической реакции, с⁻¹;

R – радиус частиц угля, м.

Примем для анализируемых экспериментов самовозгорания угля, что значения k_i определяются экспоненциальной зависимостью от T , а температура системы T по выражению [4]

$$T = T_0 \left[1 + \Gamma_T \sum_{k=1}^{\infty} B_k \frac{1 - \exp[-(\mu_k^2 - \Gamma_T) Fo_T]}{\mu_k^2 - \Gamma_T} \right], \quad (3)$$

где T, T_0 – текущая и начальная температура угля, К;

$$\Gamma_T = \frac{R^2}{a_T} \frac{1}{\rho C_V} q \xi a_{O_2} \frac{k}{T_0}, \quad (4)$$

R – радиус частиц угля, м;

a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с;

ρ – плотность угля, кг/м³;

$$\begin{aligned}
 c_V & - \text{теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);} \\
 q & - \text{теплота реакции окисления, Дж/моль;} \\
 a_{O_2} & - \text{концентрация кислорода в угле, моль/м}^3; \\
 k & - \text{константа скорости химической реакции, с}^{-1}; \\
 F_{O_T} & = a_T t / R^2.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Решение уравнений (1), (3) при отсутствии теплообмена между углем и окружающими его породами приведено в работе [5] и имеет вид

$$T/T_0 = \exp(\Gamma_T F_{O_T}). \tag{6}$$

В случае учета теплообмена имеем

$$\frac{T}{T_0} = \exp[\Gamma_T F_{O_T} |_{Bi=0} \exp(-4,9 Bi_T^{0,65})], \tag{7}$$

где Bi_T – критерий теплообмена Био.

Подставив уравнения (4) и (5) в (7) и решив выражение относительно t , с, имеем время инкубационного периода

$$t = \ln\left(\frac{T_{кр}}{T_0}\right) \frac{\rho c_V T_0}{q \xi a_{O_2} k} e^{4,9 Bi_T^{0,65}}, \tag{8}$$

где q , Дж/моль, определяется эмпирическим выражением [6]

$$q = 6980 k^{-0,82}. \tag{9}$$

Для определения доли поглощенного углем кислорода воспользуемся результатами определения склонности углей к самовозгоранию (см. таблицу), приведенными в работе [7].

Параметр ξ находим из формулы (8), принимая t равным инкубационному периоду самовозгорания угля и учитывая остальные данные в графах 4 – 6 таблицы. Результаты вычислений приведены в графе 8.

Найденная доля поглощенного углем кислорода ξ , соответствующая доле вступившей в реакцию окисления поверхности угля (на так называемых активных центрах), имеет значения от трех- до девятитысячных и полностью определяется характеристикой угля.

Сделано предположение, что параметр ξ , характеризующий реакционную поверхность угля, зависит от его внутренних свойств: петрографического состава, доли углерода, скорости реакции, энергии активации. Поэтому найдем скорость поглощения кислорода при реакции окисления $\xi a_{O_2} k$ для фиксированного времени t , равного инкубационному периоду, и ее зависимость от энергии активации и доли летучих веществ в угле (рис. 1 и 2).

Характеристики углей и расчетные доли реакционных поверхностей

| Шахта | Плагг | Доля летучих веществ V^r , % | Газоносность J_0 , M^3/T | Температура $T_0/T_{кр}$, К | Константа скорости реакции окисления $k \cdot 10^4$, C^{-1} | Инкубационный период $t \cdot 10^{-6}$, с / t, ч | Доля реакционной поверхности ξ при $t = t_{ник}$ | Концентрация кислорода в угле a_0 , моль/ M^3 | Энергия активации E, Дж/моль | Константа скорости истечения метана $\mu \cdot 10^3$, $ч^{-1}$ | Константа скорости образования поверхностного комплекса соединения $\nu \cdot 10^3$, $ч^{-1}$ | Доля реакционной поверхности $\xi_{ср}$ |
|---|-------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|---|--|---|------------------------------|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Им. Г.Г.Капустина «Лисичанскуголь» | k_8^H | 42,8 | 5...10 | 301/350 | 6,5 | 3,6/1000 | 0,0029 | 8,49 | 20785 | 4,796 | 0,670 | 0,0115 |
| «Северная» «Дзержинскуголь» | l_6 | 33,1 | 10,0 | 305/371 | 9,2 | 3,4/944 | 0,0041 | 7,83 | 17339 | 6,768 | 0,824 | 0,0023 |
| Им. А.Г. Стаханова «Красноармейскуголь» | l_3 | 37,6 | 22,5...25 | 300/383 | 10,8 | 3,5/972 | 0,0073 | 5,12 | 14694 | 15,620 | 1,290 | 0,0052 |
| «Добропольская» «Добропольеуголь» | l_1 | 33,4 | 22,5 | 301/361 | 6,5 | 4,4/1220 | 0,0046 | 5,29 | 18058 | 11,780 | 0,570 | 0,0031 |
| «Полтавская» «Орджоникидзеуголь» | m_4^0 | 34,6 | 16 | 296/393 | 10,6 | 4,1/1140 | 0,0057 | 6,42 | 13238 | 8,992 | 1,484 | 0,0084 |
| «Енакиевская» «Орджоникидзеуголь» | k_8 | 4,9 | 20 | 303/398 | 9,7 | 4,4/1220 | 0,0060 | 5,68 | 13863 | 10,480 | 1,525 | 0,0079 |
| «Карбонит» «Первомайскуголь» | l_6 | 10,5 | 15 | 301/403 | 10,4 | 4,4/1220 | 0,0054 | 6,63 | 13238 | 7,857 | 0,850 | 0,0089 |
| Им. Ф.Э.Дзержинского «Дзержинскуголь» | m_3 | 39,8 | 0,3...5,0 | 298/368 | 10,9 | 2,99/831 | 0,0041 | 9,21 | 16084 | 3,068 | 0,885 | 0,0018 |
| «Щегловская-Глубокая» ДУЭК | l_3 | 28,2 | 10 | 303/388 | 14,4 | 2,7/750 | 0,0060 | 7,83 | 14725 | 8,467 | 1,340 | 0,0034 |
| «Ореховская» шу «Самсоновское-Западное» | l_8^1 | 30,7 | 11...26 | 302/383 | 11,9 | 3,1/861 | 0,0068 | 5,94 | 15056 | 13,710 | 0,970 | 0,0041 |
| «Северная» «Максееуголь» | k_2^{PHH} | 22,5 | 6...14 | 300/383 | 11,4 | 3,2/889 | 0,0052 | 7,83 | 14694 | 7,187 | 0,855 | 0,0040 |
| «Полтавская» «Орджоникидзеуголь» | m_3 | 21,3 | 27...38 | 297/388 | 18,9 | 2,2/611 | 0,0141 | 4,13 | 13754 | 33,250 | 1,266 | 0,0043 |
| «Орджоникидзеуголь» | l_1 | 8 | 15 | 300/382 | 24,0 | 7,3/2030 | 0,0027 | 5,68 | 15007 | 6,315 | 0,760 | 0,0098 |

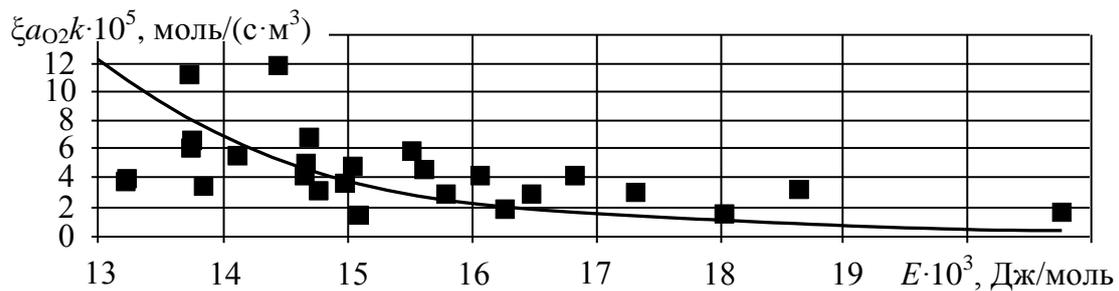


Рис. 1. Зависимость скорости химического реагирования угля от энергии активации

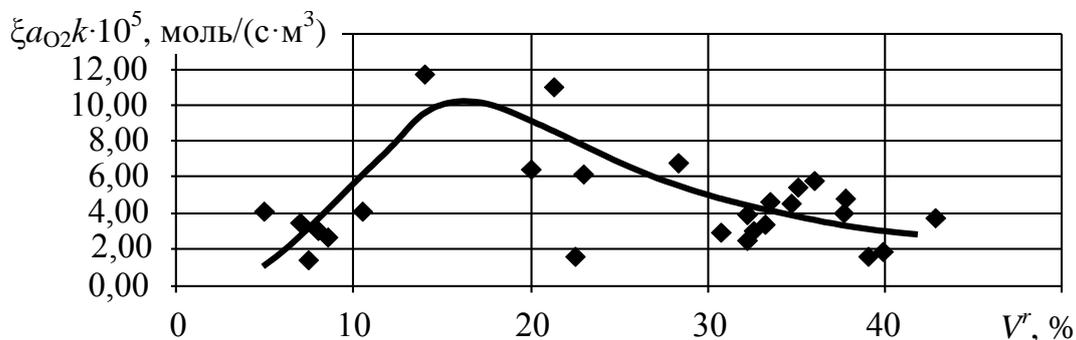


Рис. 2. Зависимость скорости химического реагирования угля от массовой доли летучих веществ

Как следует из представленных на рисунках данных, существует значительный разброс в зависимости от энергии активации и от доли летучих веществ. Это, вероятно, связано с неточностью метода определения инкубационного периода самовозгорания угля, основанного на статистических данных о пожарах, а также разным временем инкубационного периода у угля разных шахт, принятого для определения ξ . Тем не менее прослеживается зависимость скорости поглощения кислорода от энергии активации, что соответствует физической сущности процесса окисления различными углями. Что касается зависимости скорости реакции от доли летучих веществ, то установлено, что свойства, определяющие склонность твердого топлива к окислению, изменяются с метаморфизмом по кривой, имеющей экстремум в области углей средней стадии. Кроме того, характер зависимости полностью соответствует данным [8] о показателях окисления углей, полученных лабораторным путем при хроматографических испытаниях.

Найденные доли поверхности углей, вступающей в реакции окисления с кислородом, относятся ко времени инкубационного периода самовозгорания угля. На самом деле, они постоянно меняются по мере поглощения кислорода и очищения угля.

Поэтому с целью теоретического исследования реакционной поверхности различных углей обратимся к математической модели Б.В. Кантаровича. В работе [9] рассмотрен ход гетерогенной реакции первого порядка с адсорбцией кислорода и предложена физическая модель процесса: вся поверхность угля состоит из свободной поверхности η и поверхности реакционной, занятой молекулами кислорода ζ , а также поверхности, занятой молекулами метана. Это позволило получить равенство

$$\eta + \zeta = 1 - (1 - \eta_0)\exp(-\mu t), \quad (10)$$

где η_0 – доля первоначально свободной поверхности;

μ – константа скорости перехода метана из связанного состояния в свободное, с^{-1} ;

t – время с момента разрушения угольного пласта, с.

Доля реакционной поверхности ξ в результате химических реакций будет связана с поверхностным комплексным соединением. Будем учитывать скорость образования поверхностного комплексного соединения и его распад при соударении с молекулами газовой фазы между частицами угля, а также за счет термического разложения, интенсивность которого зависит от температуры. Тогда можно записать уравнение адсорбции кислорода и уравнение образования и распада поверхностного комплексного соединения в дифференциальном виде:

$$\zeta' = wC_0\eta - u\zeta; \quad (11)$$

$$\xi' = v\zeta - (v + k_1C_0 + k_2)\xi,$$

где w – константа скорости конденсации молекул кислорода при адсорбции, с^{-1} ;

u – константа скорости десорбции кислорода, с^{-1} ;

C_0 – объемная доля кислорода в газовой фазе;

v – константа скорости образования поверхностного комплексного соединения, с^{-1} ;

k_1 – константа скорости распада комплексного соединения при соударении молекул газа, с^{-1} ;

k_2 – константа скорости распада комплексного соединения при его термическом разложении, с^{-1} .

В уравнениях (11) штрихами обозначены производные функций по времени t . К системе уравнений (11) добавим начальные условия:

$$\zeta(0) = \xi(0) = 0. \quad (12)$$

Как отмечено в работе [9], при низкотемпературном окислении и, следовательно, медленном распаде поверхностного комплексного соединения вся поверхность частиц угля успевает связаться с адсорбированными молекулами кислорода, в результате $\zeta \rightarrow 1$. Тогда, если считать, что состояние адсорбции устанавливается раньше образования поверхностного комплексного соединения, решение первого из уравнений (11) будет иметь вид

$$\zeta = 1 - (1 - \eta_0) \exp(-\mu t). \quad (13)$$

Используя выражение (13), получили решение второго уравнения (11) для определения доли реакционной поверхности, связанной с поверхностным комплексным соединением, на котором происходит реакция окисления. В случае, если пренебречь распадом поверхностного комплексного соединения при низкотемпературном окислении, это решение имеет вид

$$\xi = 1 - \exp(-vt) + \frac{v(1-\eta_0)}{\mu-v} [\exp(-\mu t) - \exp(-vt)]. \quad (14)$$

Используем полученное решение при моделировании процесса низкотемпературного окисления угля.

Согласно экспериментальным данным, приведенным в таблице, доля реакционной поверхности ξ найдена для каждого угля как среднее значение для времени инкубационного периода, равного $t = t_{\text{инк}}$, т.е. экспериментально получено $\xi = \xi_{\text{ср}}$. Для других значений t она, вероятно, будет другой. Поэтому поступаем следующим образом.

Находим среднеинтегральное значение $\xi = \xi_{\text{ср}}$ согласно выражению (14) в виде

$$\xi = 1 - \frac{1 - \exp(-vt)}{vt} + \left(\frac{v}{\mu-v}\right) \frac{1}{t} \left[\frac{1 - \exp(-\mu t)}{\mu} - \frac{1 - \exp(-vt)}{v} \right]. \quad (15)$$

Константу скорости истечения метана μ находим из результатов исследований [10] для различных моментов времени, а затем из (15) определяем константу скорости образования поверхностного комплексного соединения v для этого же времени. Имея параметры v и μ , можно согласно (15) найти долю поверхности угля во времени, на которой происходит реакция окисления. Это позволит уточнить формулу (8) нахождения времени достижения углем критического значения, т.е. инкубационного периода самовозгорания.

Выражение для определения μ согласно [10] имеет вид

$$\mu = \frac{3,33 \cdot 10^{-7} J_0}{R^{0,2}} \exp(-2,4 \cdot 10^{-6} t), \quad (16)$$

где J_0 – газоносность пласта, м³/т;

R – радиус частиц угля, м; принимаем равным 0,0005 м.

Моделирование значений μ для углей разной степени метаморфизма позволило уточнить формулу (16) и записать ее в виде

$$\mu = \frac{3,33 \cdot 10^{-7} J_0}{R^{0,2}} \exp \left[-2,4 \cdot 10^{-6} \left(\frac{30}{V^r} \right)^{0,3} t \right], \quad (17)$$

где V^r – массовая доля летучих веществ в угле, %;

30 – среднее значение доли летучих веществ в угле по всем экспериментам, представленным в таблице, или в виде

$$\mu = \frac{3,33 \cdot 10^{-7} J_0}{R^{0,2}} \exp \left[-6,66 \cdot 10^{-6} (V^r)^{-0,3} t \right]. \quad (18)$$

В качестве примера для шахт им. Г.Г. Капустина, «Ореховская» и «Александровская» константы скорости образования поверхностного комплексного соединения v для различных моментов времени t , используя данные, приведенные в таблице (рис. 3).

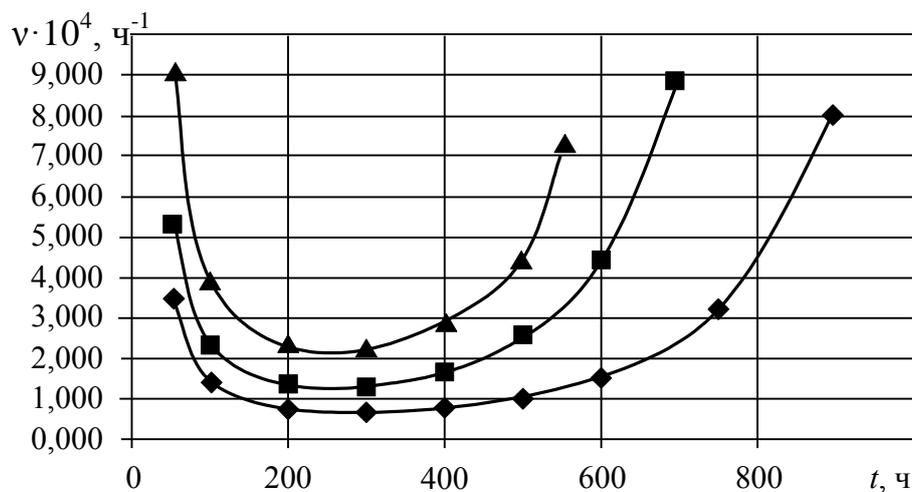


Рис. 3. Зависимость константы скорости образования поверхностного комплексного соединения от времени:

▲ – «Александровская»; ■ – «Ореховская»; ◆ – им. Г.Г. Капустина

Анализ данных рис. 3 показывает, что первый участок кривой характеризуется уменьшением скорости образования поверхностного комплексного соединения и при $t = 300$ ч достигает своего минимального значения. Аналогичные результаты получены для всех углей, представленных в таблице. Падение скорости реакции во времени вполне закономерно с точки зрения радикально-цепной теории. Оно является общим для цепных реакций с вырожденным разветвлением, что подтверждают проведенные эксперименты.

Согласно закономерностям, полученным В.С. Веселовским и другими, на начальной стадии низкотемпературного окисления угля происходит замедление сорбции во времени, которое делится на три периода. Первый период характеризуется наиболее быстрым уменьшением скорости сорбции кислорода, второй – установлением регулярного режима, который подчиняется экспоненциальному закону, и третий – еще меньшим замедлением сорбции. В то же время при медленном низкотемпературном окислении поверхностных слоев угля происходит значительное изменение его свойств, сопровождающееся главным образом разрушением кусков, увеличением в них количества трещин, уменьшением механической прочности. Это в свою очередь способствует проникновению кислорода в глубь угля, увеличению удельной поверхности, доступной для окисления, а затем протеканию химических реакций окисления органической массы угля, сопровождающихся выделением теплоты и при недостатке теплообмена, что приводит к самонагреванию угля. Подтверждением этому является второй участок кривой на рис. 3, где после прохождения минимума значения v начинают постепенно увеличиваться, достигая максимального значения для момента времени, равного инкубационному при самовозгорании угля $t = t_{\text{инк}}$. Различие в характере увеличения окислительных процессов во многом определяется степенью метаморфизма исследуемых углей, а именно наличием свободных радикалов и фенольных элементов структуры в малометаморфизированных углях и высокой концентрацией свободных радикалов в углях высокой степени углефикации.

Для нахождения константы скорости образования поверхностного комплексного соединения v сделано предположение о его зависимости от основной характеристики угля – энергии активации E . На рис. 4 представлены значения v как функции от E по всем экспериментам, приведенным в таблице.

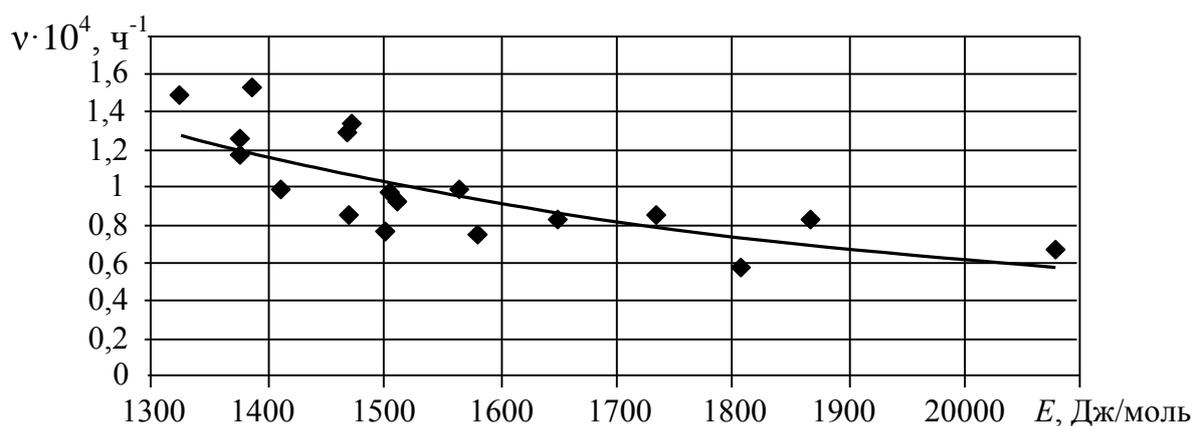


Рис. 4. Зависимость константы скорости образования поверхностного комплексного соединения для времени $t = 300$ ч от энергии активации

Зависимость v , ч⁻¹, от E получена в виде

$$v = 2,2 \cdot 10^{11} E^{-3,66}. \quad (19)$$

Коэффициент корреляции 0,82.

На основании теоретических исследований и обобщения экспериментальных данных по энергии активации и скорости выделения из угля метана с использованием формул (15), (18) и (19) рассчитаны значения доли поглощенного углем кислорода $\xi_{\text{ср}}$ (рис. 5), вступающего в реакцию взаимодействия с углеродом на части реакционной поверхности угля (см. таблицу, графу 13).

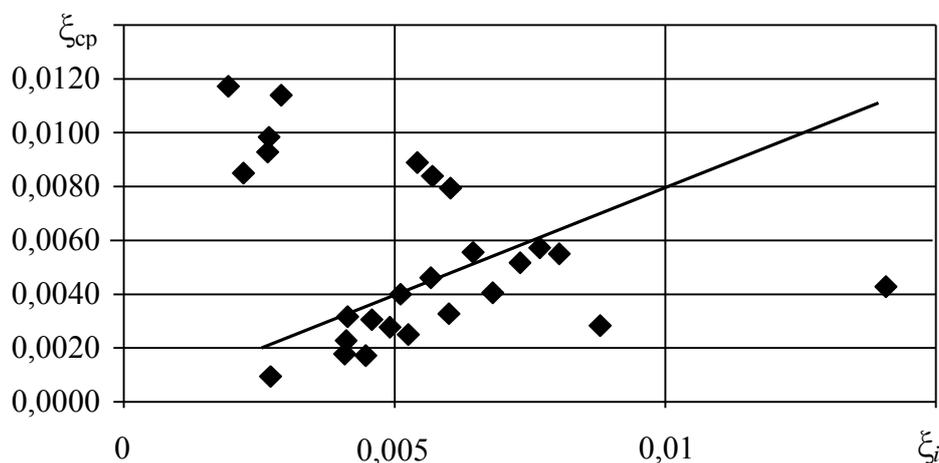


Рис. 5. Сравнение расчетных усредненных значений доли поглощенного углем кислорода $\xi_{\text{ср}}$ с экспериментальными данными по каждому углю ξ_i

Как видно из рис. 5, некоторые точки выпадают из общей корреляционной зависимости, что характерно для углей с высоким и низким значением газоносности пласта. Поэтому необходимо дальнейшее изучение влияния данного фактора на процессы, происходящие с углем.

Выводы. Исследована динамика константы скорости образования поверхностного комплексного соединения на поверхности различных типов углей, позволяющая рассмотреть механизм процесса окисления. Определена доля реакционной поверхности угля, на которой возможны гетерогенные процессы низкотемпературного окисления, что повысит достоверность расчетного времени инкубационного периода самовозгорания угля.

Список литературы / References

1. Лазаров Л. Структура и реакции углей / Л. Лазаров, Г. Ангелова. – София: Изд-во Болгарской АН, 1990. – 232 с.

Lazarov, L. and Angelova, G. (1990). *Struktura i reaktsii ugley* [Structure and reactions of coals]. Sofia, Izd-vo Bolgarskoy AN, 232 p.

2. Березовский Н.А. Математические модели процессов диффузии, сопровождаемой адсорбцией и химическими реакциями / Н.А. Березовский // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т математики. – Киев, 1998. – С. 29 – 31.

Berezovskiy, N.A. (1998). *Matematicheskiye modeli protsessov diffuzii, soprovozhdayemoy adsorbtsiyey i chimicheskimi reaktsiyami* [The mathematical

models of diffusion processes accompanied with adsorption and chemical reactions]. *Nelineynyye krayevyye zadachi matematicheskoy fiziki i ikh prilozheniya: sb. nauch. tr.* [Proc. of the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of the Ukraine “Nonlinear boundary problems of the mathematical physics and their applications”]. Kiev, pp. 29 – 31.

3. Греков С.П. Сорбционные процессы в угольных скоплениях при метановыделении и испарении влаги / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. – Херсон: ХНТУ, 2006. – Вып. 2 (25). – С. 166 – 173.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. and Tynda, G.B. (2006). *Sorbtsionnyye protsessy v ugolnykh skopleniyakh pri metanovydelenii i isparenii vlagi* [Sorption processes in coal accumulations by methane release and water evaporation]. *Sb. Khersonskogo nats. techn. univ.* [Proc. of the Kherson nat. techn. univ.]. Kherson, KhNTU, issue 2 (25), pp. 247 – 251.

4. Греков С.П. Неизотермическая кинетика хемосорбции газов микропористыми сорбентами / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, В.В. Баклан // ЖФХ. – 1996. – Т. 70, № 8. – С. 1496 – 1498.

Grekov, S.P., Kalyusskiy, A.Ye. and Baklan, V.V. (1996). *Neizotermicheskaya kinetika khemosorbtsii gazov mikroporistymi sorbentami* [Nonisothermic kinetics of chemisorption of gases with microporous sorbing agents]. *ENFKh*, vol. 70, no. 8, pp. 1496 – 1498.

5. Определение склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич, И.А. Шайтан // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 10 – 16.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Cygankiewicz, Ya. and Shaytan, I.A. (2000). *Opredeleniye sklonnosti ugley k samovozgoraniyu* [Determination of liability of coals to spontaneous combustion]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, pp. 10 – 16.

6. Греков С.П. Тепловой эффект окисления угля и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46 – 50.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Orlikova, V.P. (2014). *Teplovoy effect okisleniya ugley i endogennaya pozharoопасnost* [Thermal effect of oxidation of coals and endogenous fire hazard]. *Ugol Ukrainy*, no. 11, pp. 46 – 50.

7. Новый метод определения склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Б.И. Кошовский, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 61 – 72.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Koshovskiy, B.I. and Luganskiy, A.M. (2012). *Novyy metod opredeleniya sklonnosti ugley k samovozgoraniyu* [The new method of determination of liability of coals to spontaneous combustion].

Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator" [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 49, pp. 61 – 72.

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

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

9. Пашковский П.С. Сорбционные процессы в газонасыщенных угольных скоплениях с переменной поверхностью / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Сб. науч. тр. Херсонского нац. ун-та. – Херсон, 2007. – Вып. 2(28). – С. 247 – 251.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. and Zinchenko, I.N. (2007). *Sorbtsionnyye protsessy v gazonasyshchennykh ugolnykh skopleniyakh* [Sorptions processes in gas-saturated coal accumulations]. *Sb. Khersonskogo nats. univ.* [Proc. of the Kherson nat. univ.]. Kherson, issue 2 (28), pp. 247 – 251.

10. Истечение метана из частиц угля / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, М.В. Илык, И.Н. Смоланов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2002. – С. 74 – 88.

Grekov, S.P., Koshovskiy, B.I., Ilyk, M.V. and Smolanov, I.N. (2002). *Istecheniye metana iz chastits uglya* [Methane outflow from particles of coal]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator" [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]*. Donetsk, pp. 74 – 88.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 10.02.2015

Purpose. Modeling of the process of oxygen absorption with coals in accordance with theoretical preconditions of formation and decay of a superficial complex compound and experimental data of the NIIGD "Respirator" worked out earlier, as well finding of the part of the reactionary surface which the heterogeneous processes are possible on for various types of coals, their gas content and activation energy.

Methodology. The methodology is based on the mathematical model of the heterogeneous process of adsorption of oxygen with the first-order oxidation reaction and on the experimental data of the NIIGD "Respirator".

Results. The mathematical solution was found to determine the part of oxygen absorbed with coal that corresponds to the part of the coal surface reacted to oxidation taking into account the process of methane release. To calculate the part of oxygen absorbed with coal the results of the experimental determination of liability of coals to spontaneous combustion were used. According to the results of the investigation of the rate of formation of the superficial complex compound in time it was found that the parameter reaches the minimum value by $t = 300$ h following which the gradual increase of the oxidation process begins. The analogous results were received for all analyzable coals. The supposition was made that the parameter characterizing the reactionary surface of coal depends on its internal properties: petrographic composition, metamorphism degree, rate of the oxidation reaction, activation energy. The empirical dependences permitting to determine the constants of the rate of methane release and that one of formation of the complex compound were found taking into account the influence of the coal properties enumerated.

Scientific novelty. The results of the work allow determining the part of the reactionary surface which the heterogeneous oxidation processes are possible on for various types of coals, their gas content and activation energy, as well considering the mechanism of the low-temperature oxidation of coal from the point of view of kinetics of the superficial complex compound.

Practical value. The dependences received permit to determine the incubation period of the spontaneous combustion of coal.

Keywords: heterogeneous process, part of the reactionary surface, low-temperature oxidation, rate of reaction, activation energy, spontaneous combustion.

УДК 622.822.24:614.892.628

*А.Ю. Коляда, нач. отд., С.С. Гребенкин, д-р техн. наук, ведущий науч. сотр.
НИИГД «Респиратор», Донецк*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

*A.Yu. Kolyada, head of the department, S.S. Grebyenkin, Dr. Sci. (Tech.),
leading scientific associate (NIIGD "Respirator", Donetsk)*

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESSES OF MOTION OF WATER DISPERSED IN MINE WORKINGS OF COAL MINES

Цель. Математическое моделирование распределения капель диспергированной воды вдоль горной выработки для эффективного тушения пожара.

Методика. Аналитическое исследование движения потока двухфазной среды в стесненных условиях горной выработки.

Результаты. Получены аналитические зависимости распределения капель воды вдоль выработки и по ее сечению.

Ключевые слова: диспергированная вода, двухфазная среда, распределение капель, турбулентное перемешивание, горная выработка.

Постановка проблемы. Практика тушения подземных пожаров водой показывает, что распыленная вода, хотя и является наиболее эффективным средством, применяется для этих целей довольно редко. Основной причиной является малое расстояние, на которое можно распылять воду. В связи с этим представляет интерес оценка возможности подачи диспергированной воды энергией вентиляционного потока в горной выработке.

Цель работы и постановка задачи. Математическое моделирование распределения капель диспергированной воды при ее переносе вентиляционным потоком вдоль горной выработки для эффективного тушения пожара.

Результаты исследований. При исследовании подачи к очагу пожара диспергированной воды необходимо учитывать следующие факторы: образование двухфазной среды (воздух и капли жидкости) в месте подачи диспергированной воды и далее при её движении с вентиляционным потоком; потери дискретной фазы (капель жидкости) в результате испарения влаги, при столкновении капель со стенками выработки и их осаждения на почву под действием сил гравитации; наличие трения водовоздушной смеси о стенки выработки и, как результат, потери давления; наличие механического и теплового взаимодействия между воздухом и каплями жидкости.

Рассмотрим модель течения двухфазной среды, приняв в общей постановке, что поток нестационарный и двумерный (в вертикальной плоскости), направленный вдоль выработки произвольной длины. В соответствии с общей теорией динамики двухфазных сред [1] представим уравнения движения той или иной фазы в вертикальной плоскости в виде

$$\begin{cases} \varepsilon\rho \frac{du}{d\tau} = -\frac{\partial\varepsilon P}{\partial x} - \varepsilon\rho g \sin\alpha - \frac{\lambda\Pi}{8S} \varepsilon\rho u|u| - \frac{3c_1}{4d_k} \varepsilon\rho_0(u-u_0)|u-u_0|; \\ \varepsilon\rho \frac{dv}{d\tau} = -\frac{\partial\varepsilon P}{\partial y} - \varepsilon\rho g \cos\alpha - \frac{3c_2}{4d_k} \varepsilon\rho_0 v|v|, \end{cases} \quad (1)$$

где ε – объёмная доля воздуха или капель воды;

ρ – плотность водовоздушной смеси, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³;

u – продольная составляющая скорости водовоздушной смеси, м/с;

v – вертикальная составляющая скорости водовоздушной смеси, м/с;

P – давление, Па;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

α – угол наклона выработки к горизонту, рад;

λ – коэффициент сопротивления трения;

Π – периметр касания водовоздушной смесью поперечного сечения выработки, м;

S – площадь поперечного сечения выработки, м²;

c_1 и c_2 – коэффициенты сопротивления относительно движению водовоздушной смеси в продольном и поперечном направлениях;

d_k – диаметр капель, м;

u_0 – продольная составляющая скорости движения воздуха, м/с;

x и y – продольная и вертикальная координаты, м;

τ – время с начала отсчёта, с.

Из анализа системы уравнений (1) следует, что при объёмной доле $\varepsilon = 1$ они переходят в систему уравнений, описывающих турбулентное движение воздуха или воды. Поскольку нас интересует взаимодействие капель жидкости, а не воздуха, будем считать, что система уравнений (1) описывает этот процесс и может быть существенно упрощена. Так, периметр касания капель воды стенок выработки примем равным нулю ($\Pi = 0$). Градиент давления, действующего на капли, также ничтожно мал, в результате чего система уравнений (1) движения капель жидкости примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{d\tau} = -g \sin \alpha - \frac{3c_1}{4d_k} \frac{\rho_0}{\rho} (u - u_0) |u - u_0|; \\ \frac{dv}{d\tau} = -g \cos \alpha - \frac{3c_2}{4d_k} \frac{\rho_0}{\rho} v |v|. \end{array} \right. \quad (2)$$

При рассмотрении сил сопротивления движению твёрдых или жидких частиц обычно принимают закон Стокса [2], т.е. ламинарный режим течения, или турбулентный режим при больших скоростях потока [1]. В первом случае принимают обратно пропорциональную зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса, а во втором коэффициент полагают равным константе. Однако в реальных условиях не исключен промежуточный или переходный режим течения. Поэтому объединим две зависимости в одну и представим её в виде двучленного закона сопротивления движению. Обработка экспериментальных данных [2] по изучению движения шаров различных диаметров в жидкости показала, что зависимость вида

$$c = 24 / \text{Re} + 0,8 \quad (3)$$

может быть использована с достаточной степенью точности в широком диапазоне чисел Рейнольдса $\text{Re} = 1 \div 10^3$ при относительной скорости движения $(u - u_0) = 1 \div 30$ м/с и диаметре капель жидкости $d_k = (50 \div 500) \cdot 10^{-6}$ м. Эта зависимость в проекциях на оси координат примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1 = \frac{24\nu}{|u - u_0| d_k} + 0,8; \\ c_2 = \frac{24\nu}{|v| d_k} + 0,8, \end{array} \right. \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Подставляя формулы (4) в уравнения (2), получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{d\tau} = -g \sin \alpha - \frac{3}{4d_k} \frac{\rho_0}{\rho} (0,8 |u - u_0| + 24\nu / d_k) (u - u_0); \\ \frac{dv}{d\tau} = -g \cos \alpha - \frac{3}{4d_k} \frac{\rho_0}{\rho} (0,8 |v| + 24\nu / d_k) v. \end{array} \right. \quad (5)$$

Выделим два участка выработки за местом подачи воды с зоной перемешивания L_1 и за зоной с максимальной дальностью полёта капель жидкости L_2 (рис. 1).

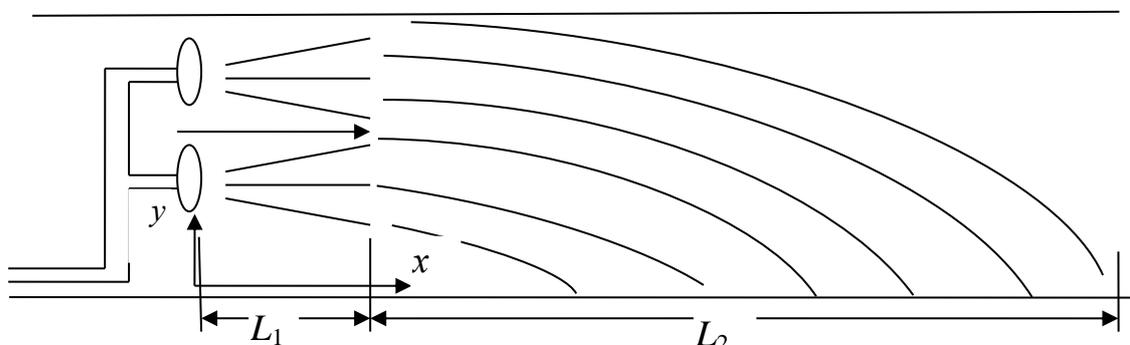


Рис. 1. Схема перемешивания и движения диспергированной воды в горной выработке (стрелкой указано направление движения воздуха)

Направим оси координат, как указано на рис.1. Будем считать, что в зоне перемешивания динамические силы капель жидкости намного больше сил гравитации и последними можно пренебречь. Тогда вместо системы уравнений (4) для зоны перемешивания получим одно уравнение

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{3}{4d_k} \frac{\rho_0}{\rho} (0,8|u - u_0| + 24\nu/d_k)(u - u_0), \quad (6)$$

с граничным условием $u_0 = u_1$. Решение этого уравнения можно представить в виде

$$u(t) = u_0 + \frac{(u_1 - u_0) \exp(-\frac{18\rho_0\nu}{\rho d_k^2} t)}{1 + \frac{(u_1 - u_0)d_k}{30\nu} [1 - \exp(-\frac{18\rho_0\nu}{\rho d_k^2} t)]}. \quad (7)$$

Полученная зависимость описывает закономерности падения скорости движения капель жидкости в зоне их перемешивания от первоначальной до скорости вентиляционного потока. Интегрируя правую часть зависимости, получим формулу для определения предельной длины зоны перемешивания:

$$L_1 = \frac{\rho d_k}{0,6\rho_0} \ln[1 + \frac{(u_1 - u_0)d_k}{30\nu}]. \quad (8)$$

В качестве примера примем $\rho = 1000$ кг/м³; $\rho_0 = 1,3$ кг/м³; $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $u_0 = 2$ м/с; $u_1 = 20$ м/с. Тогда при диаметрах капель воды $d_k = 100 \cdot 10^{-6}$ м и

$d_k = 500 \cdot 10^{-6}$ м в результате расчётов по формуле (8) получим $L_1 = 0,25$ м и $L_1 = 2,2$ м соответственно. Таким образом, начальный участок весьма незначительный. Он может быть увеличен за счёт увеличения диаметра капель жидкости, что нежелательно, или за счёт струйного истечения жидкости из форсунок, имеющих диаметр отверстий больший, чем диаметр капель. Так, при струйном истечении из форсунок с диаметром отверстий $d = 0,001$ м длина начального участка согласно уравнению (8) будет равна $L_1 = 5,2$ м.

После распада струй образуются капли жидкости, диаметр которых в основном зависит от относительной скорости истечения и может быть определён для воды по формуле, предложенной в работе [3]:

$$d_k = 4,5 \cdot 10^{-3} / (u_1 - u_0). \quad (9)$$

За начальным участком продольная составляющая скорости движения капель жидкости будет равна скорости вентиляционного потока ($u = u_0$). Поперечная составляющая скорости движения капель жидкости может быть определена из решения второго уравнения системы (5). Так, в предельном случае, приравнявая правую часть нулю, получим

$$v_0 = 15v / d_k - \sqrt{(15v / d_k)^2 + 10\rho g \cos\alpha d_k / 6\rho_0}. \quad (10)$$

Подставляя в формулу (10) $d_k = 100 \cdot 10^{-6}$ м и $d_k = 500 \cdot 10^{-6}$ м, получим соответственно $v_0 = 0,26$ м/с и $v_0 = 2,1$ м/с.

Для чисто ламинарного режима движения капель жидкости из второго уравнения получим

$$v_0 = -\frac{\rho g \cos\alpha}{18\rho_0 v} d_k^2. \quad (11)$$

Эту формулу обычно используют в расчётах. Подставляя в формулу (11) $d_k = 100 \cdot 10^{-6}$ м и $d_k = 500 \cdot 10^{-6}$ м, получим соответственно $v_0 = 0,28$ м/с и $v_0 = 7$ м/с. Сравнивая результаты расчётов, можно прийти к выводу, что для диаметров капель жидкости более $100 \cdot 10^{-6}$ м формула (11) не может быть использована, так как даёт неоправданно завышенные скорости витания капель жидкости.

Таким образом, поле скоростей на втором участке будем считать известным и стационарным. Для определения распределения капель жидкости на втором участке выработки рассмотрим уравнение турбулентного перемешивания мелкодисперсной жидкости вида

$$u_0 \frac{\partial C}{\partial x} + v_0 \frac{\partial C}{\partial y} = \psi \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \gamma C, \quad (12)$$

где C – концентрация мелких капель в потоке воздуха, кг/м³;
 ψ – коэффициент турбулентного перемешивания мелких капель, м²/с;
 γ – коэффициент потерь капель жидкости на стенках выработки, с⁻¹.

Примем, что в конце зоны перемешивания капли жидкости равномерно перемешаны по всей высоте выработки. Поэтому граничное условие для уравнения (12) можно представить в виде

$$C(y,0) = \begin{cases} C_0, & \text{если } 0 < y < H; \\ 0, & \text{если } 0 \geq y, \end{cases} \quad (13)$$

где C_0 – концентрация капель жидкости в зоне перемешивания, кг/с;
 H – высота выработки, м.

Не приводя сложных выкладок, решение уравнения (12) с условием (13) представим в виде

$$C(x, y) = \frac{C_0}{2} \exp[-\gamma x / u_0] \left[\Phi \left(\frac{H + v_0 x / u_0 - y}{2 \sqrt{\psi x / u_0}} \right) - \Phi \left(\frac{v_0 x / u_0 - y}{2 \sqrt{\psi x / u_0}} \right) \right], \quad (14)$$

где Φ – интеграл вероятности.

Для удобства моделирования переноса дисперсной жидкости введём безразмерные параметры: $\bar{C} = C/C_0$ – относительная концентрация воды в потоке воздуха; $\bar{y} = y/H$ – относительная вертикальная координата; $\bar{x} = x/H$ – относительное расстояние от зоны перемешивания; $Pe = u_0 H / \psi$ – число Пекле турбулентного перемешивания; $V = v_0 / w_0$ – относительная скорость поперечного перемещения жидкости; $G = \gamma H / u_0$ – критерий потерь жидкости на стенках выработки.

Используя перечисленные безразмерные переменные, приведём формулу (14) к виду

$$\bar{C}(\bar{x}, \bar{y}) = 0,5 \exp(-G\bar{x}) \left[\Phi \left(\frac{1 + V\bar{x} - \bar{y}}{2 \sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) - \Phi \left(\frac{V\bar{x} - \bar{y}}{2 \sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) \right]. \quad (15)$$

Формула (15) удобна для расчётов, так как позволяет обобщить полученные при моделировании результаты и, находясь в диапазоне значений независимых переменных $1 \leq \bar{y} \leq 1$ и $0 < \bar{x} < \infty$, получать значения функции в узком пределе $0 < \bar{C} \leq 1$, используя при этом всего три критерия подобия: Pe , G

и V . На рис. 2 представлены результаты математического моделирования распределения капель жидкости вдоль выработки соответственно у кровли, посередине и у почвы выработки при следующих критериях подобия: $Re = 500$; $G = 0,01$; $V = -0,05$.

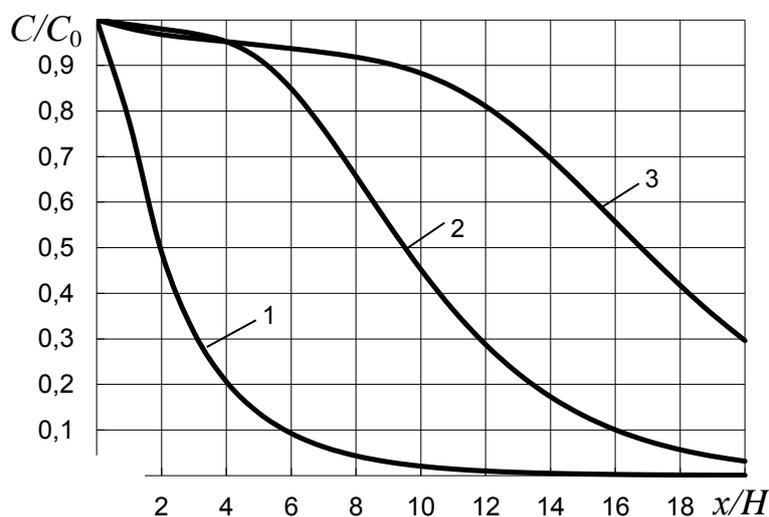


Рис. 2. Распределение капель жидкости вдоль выработки под её кровлей (1), посередине (2) и у почвы (3)

Как показывают аналитические исследования, в верхней части выработки и посередине наблюдается резкое снижение доли капель и на расстояниях $z > 6H$ и $z > 16H$ соответственно она становится менее 10 % от первоначального уровня. В то же время у почвы выработки доля капель воды почти не снижается при заданных критериях подобия на протяжении $z < 10H$ и превышает 90 %.

Целью дальнейших исследований является подтверждение полученных аналитических зависимостей в натуральных условиях и получение эмпирических констант турбулентного перемешивания капель жидкости и их потерь на стенках выработки.

Установление адекватности математической модели натурному объекту позволит разработать метод оценки дальности подачи воды, стратифицированной в потоке воздуха, и эффективность её воздействия на очаг пожара.

Выводы. Получены аналитические зависимости распределения капель воды вдоль выработки и по ее сечению.

Аналитические исследования показали, что уже на участке перемешивания происходит перераспределение капель по сечению: их доля снижается в верхней части. Вероятность успешной ликвидации пожара, возникшего у кровли выработки, уменьшается. Это обстоятельство вызывает необходимость соответствующего перераспределения подачи диспергированной воды в горной выработке при тушении пожара.

На основании разработанной аналитической модели может быть определена дальность подачи равномерно распределенной по сечению выработки диспергированной воды для эффективного тушения очага пожара в проветриваемой горной выработке.

Список литературы / References

1. Ольшанский В.П. Вопросы внешней баллистики огнетушащих веществ / В.П. Ольшанский, О.А. Дубовик. – Харьков: Митець, 2005. – 236 с.

Ol'shanskiy, V.P. and Dubovik, V.P. (2005), *Voprosy vneshney ballistiki ognetushashchikh veshchestv* [Problems of external ballistics of fire-extinguishing substances]. Kharkov, Mytets', 236 p.

2. Ольшанский В.П. О динамике испаряющейся капли как материальной точки переменной массы / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Механика и машиностроение. – 2005. – №1. – С. 6 – 12.

Ol'shanskiy, V.P. and Ol'shanskiy, S.V. (2005). *O dinamike isparayushcheyeya kapli kak material'noy tochki peremennoy massy* [About dynamics of the drop evaporating as a particle of the variable mass]. *Mekhanika i machinostroyeniye*, no. 1, pp. 6 – 12.

3. Балістика крапель розпилених вогнегасних рідин / В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський, О.М. Ларін, Е.М. Фомін. – Біла Церква: Вид. Пшонківський О.В., 2006. – 124 с.

Ol'shans'kyi, V.P., Ol'shans'kyi, S.V., Larin, O.M. and Fomin, Ye.M. (2006), *Balistyka krapel' rozpylenykh vognegasnykh ridyn* [Ballistics of drops of fire-fighting mist sprays]. Bila Tserkva, Pshonkivs'kyi O.V., 124 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 03.08.2015*

Purpose. Mathematical modeling of distribution of water drops dispersed along the mine working for efficient fighting the fire.

Methodology. Analytical investigation of the motion of the two-phase medium under straitened conditions of the mine working.

Results. The analytical dependences of distribution of the water drops along the mine working and across its section were received.

Keywords: dispersed water, two-phase medium, distribution of drops, turbulent mixing, mine working.

УДК 622.822.7:614.842.612 «Завесы»

А.Ю. Коляда, нач. отд. НИИГД «Респиратор», Ю.Н. Ющенко, председатель НПК «Энергия», канд. техн. наук, И.Ф. Дикенштейн, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

A.Yu. Kolyada, head of department (NIIGD “Respirator”), Yu.N. Yushchenko, Cand. Sci. (Tech.), chairman of the «Energiya» Scientific production company, I.F. Dikenshteyn, scientific associate (NIIGD “Respirator”), Donetsk

METHODOLOGY OF CALCULATION OF PARAMETER OF FIRE LOCALIZATION IN MINE WORKINGS

Цель. Разработка методики расчета водяных завес, обеспечивающих эффективную локализацию пожаров в горных выработках угольных шахт.

Методы. Теоретический метод исследования баллистики капель распыленной жидкости, теплообмена пожарных газов с каплями воды и стенками выработки, статистические методы экспериментальных исследований процессов локализации.

Результаты. Создана методика расчета параметров локализации подземных пожаров с использованием водяных завес. Данная методика войдет в новую редакцию Правил пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности.

Выводы. Разработанная методика дает возможность оценить эффективность применяемого противопожарного оборудования для локализации пожаров диспергированной водой в горных выработках или создать новые высокоэффективные средства локализации пожара.

Ключевые слова: пожар, горная выработка, локализация, расход, водяная завеса, тушение, глубина завесы, время, скорость, температура газового потока, установка, давление.

Введение. Тушение пожаров в горных выработках – сложный технологический процесс, основанный на оценке теплофизических параметров пожара, газодинамических явлений горного массива, вентиляционного режима, параметров пожарно-оросительной системы, и, на этой основе, выборе пожаротушащего оборудования и тактики его применения.

Возможность тушения пожара только со стороны свежей струи требует разработки специальных тактических приемов снижения скорости распространения пожара по выработке, которая не должна превышать скорость тушения пожара.

Одним из способов борьбы с подземными пожарами является локализация пожара в определенном объеме выработки и удержание его в этом объеме в процессе активного тушения. Для целей локализации применяют водяные завесы, охлаждающие исходящий из очага пожара поток нагретых газов до безопасных температур.

Преимущества диспергированной воды, используемой в водяных завесах, описаны многими авторами [1, 2, 3]. В соответствии с результатами исследований

нормативные расходы воды зависели только от объемных расходов воздуха и не зависели от параметров пожара и степени распыления воды. До настоящего времени отсутствует корректная модель расчета параметров завесы, используемой для локализации пожаров в горных выработках.

Формулирование цели работы и постановка задач. Цель работы – создание методики расчета водяных завес, обеспечивающих эффективную локализацию пожаров в горных выработках угольных шахт.

Для принятия решений по обеспечению противопожарной защиты той или иной выработки необходимо четко представлять геометрические параметры завесы, ее дисперсность, способ и время подачи воды в защищаемый объем и др.

Методика позволит определить параметры противопожарного оборудования в зависимости от степени пожароопасности защищаемого объекта, возможности системы пожарно-оросительного водоснабжения и на этой основе разработать высокоэффективные средства локализации пожаров диспергированной водой на объектах или оценить эффективность применяемого существующего оборудования.

Задачи работы:

- определение гидравлических и геометрических параметров водяной завесы;
- поиск технических решений получения необходимой дисперсности воды при нормированных гидравлических параметрах систем пожарного водоснабжения угольных шахт;
- обоснование размещения распылителей на защищаемом объекте и глубины водяной завесы, обеспечивающей снижение температуры до безопасных значений.

Результаты исследований. Методика расчета параметров водяной завесы для локализации подземных пожаров войдет в качестве приложения в новую редакцию Правил пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности.

Расчет (рис. 1) необходимо начинать с оценки пожароопасности аварийной горной выработки, т.е. с определения вида и количества пожарной нагрузки. Затем необходимо оценить параметры возможного очага пожара. Такими параметрами являются скорость распространения пожара по выработке и температура газового потока на выходе из зоны горения.

Скорость перемещения пожара вдоль выработки $V_{\text{п}}$, м/с, определяют по формуле [4]

$$V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{в}} S_{\text{в}}}{q_0}, \quad (1)$$

где $V_{\text{в}}$ – скорость вентиляционной струи в выработке, м/с;

$S_{\text{в}}$ – площадь поперечного сечения выработки, м²;

q_0 – объем воздуха, расходуемого на сгорание пожарной нагрузки на 1 м выработки, м³.

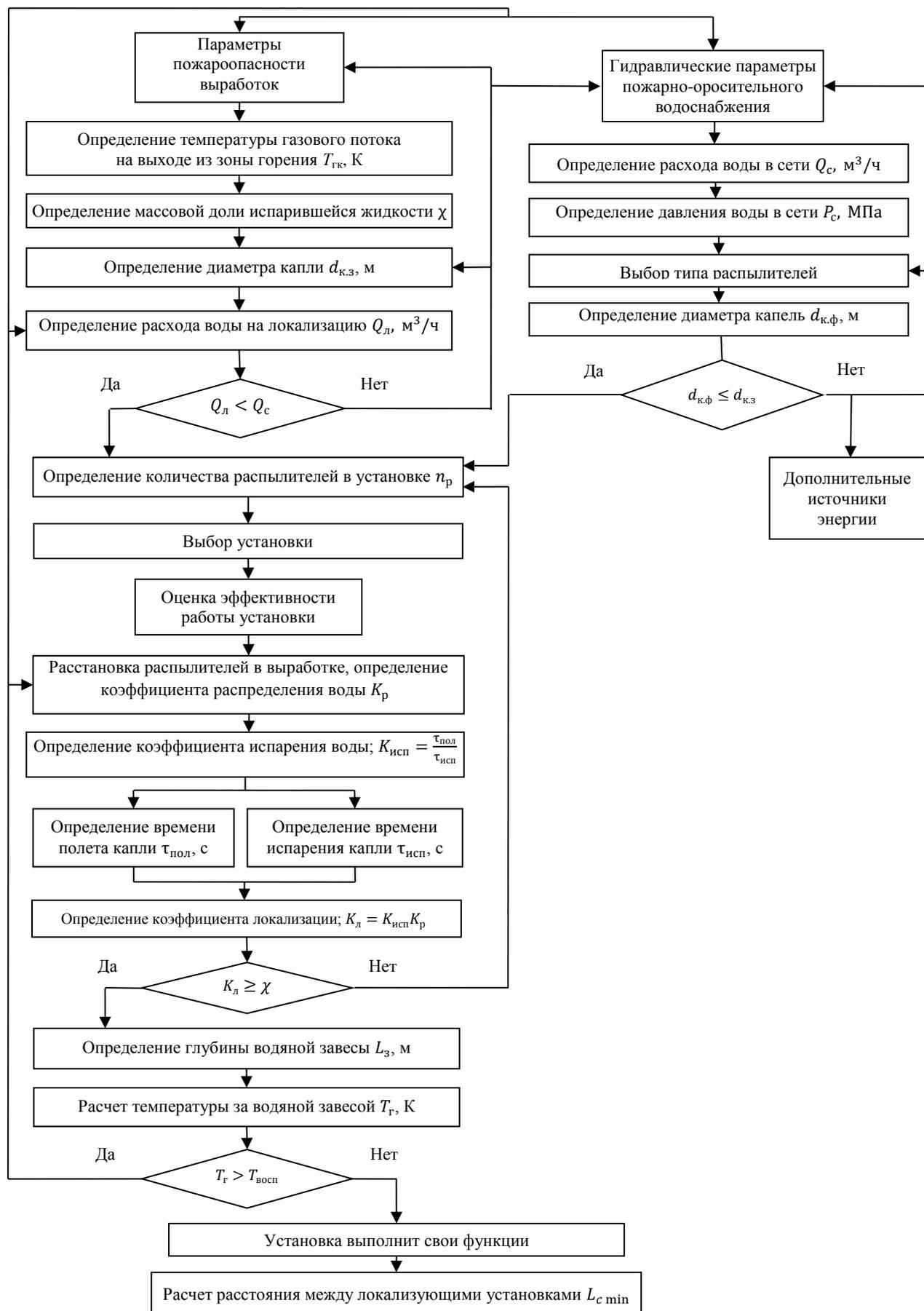


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета параметров водяной завесы для локализации пожаров в шахтах

$$q_0 = \sum_{i=1}^n B_i q_i', \quad (2)$$

где B_i – удельная горючая нагрузка для материала i -го вида, кг/м;

q_i' – удельный расход воздуха на сгорание 1 кг горючего материала i -го вида, м³/кг;

n – количество видов горючих материалов в аварийной выработке (лента, кабель, уголь, древесина).

Температуру пожарных газов на выходе из зоны горения $t_{ГК}$, °С, определяют по формуле [4]

$$t_{ГК} = \frac{V_{П} \sum_i^n B_i (0,8 Q_{Hi} - 586) + 26 G_{Г} + (0,1 + 0,08 V_{В}) F_{СТ}}{k_{Т} F_{СТ} + 1,31 G_{Г}}, \quad (3)$$

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

$k_{Т}$ – коэффициент нестационарного теплообмена между стенками выработки и газовым потоком, кДж/(м²·с·°С), который определяют по формуле [6]

$$k_{Т} = 4,12 \cdot 10^{-3} (1,249 + V_{В}); \quad (4)$$

$F_{СТ}$ – общая площадь поверхности выработки в зоне горения, участвующая в отборе теплоты, м²;

$$F_{СТ} = P_{В} V_{П} \tau_{В}; \quad (5)$$

$P_{В}$ – периметр поперечного сечения выработки, м;

$\tau_{В}$ – время выгорания пожарной нагрузки i -го вида в сечении выработки, с;

$$\tau_{В} = \frac{B_i}{V_{mi}}; \quad (6)$$

V_{mi} – скорость выгорания i -го вида пожарной нагрузки, кг/(с·м²);

$G_{Г}$ – объемный расход газового потока, м³/с.

Удельный расход воды на водяную завесу определяют по формуле [4]

$$z = \frac{4,66(t_{ГК} - t_{ВОСП})}{253 + 2513\chi}, \quad (7)$$

где $t_{ВОСП}$ – температура возгорания горючих материалов, °С;

z – удельный расход воды, необходимый для охлаждения 1 кг/с газового потока и тушения твердых горючих материалов в аварийной выработке;

χ – массовая доля испарившейся жидкости, т.е. та часть воды из общего ее расхода, подаваемого в зону локализации, необходимая для снижения температуры газового потока до безопасного значения;

$$\chi = \exp\left(-\frac{ad_k^2}{t_{гк}}\right), \quad (8)$$

где a – эмпирический коэффициент; $a = 7695 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мм}^2$;

d_k – средний диаметр капли воды в завесе, мм.

Полученные экспериментальным путем значения величины χ в зависимости от заданного диаметра капель d_k и температуры $t_{гк}$ потока пожарных газов перед водяной завесой приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Значение массовой доли испарившейся жидкости χ в завесе

| Температура $t_{гк}, \text{ }^\circ\text{C}$ | Средний диаметр капель d_k в водяной завесе, которые формируются установками локализации, мм | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| | Значения χ | | | | | |
| 400 | 0,823 | 0,463 | 0,177 | 0,046 | 0,082 | 0,001 |
| 600 | 0,880 | 0,600 | 0,315 | 0,128 | 0,041 | 0,010 |
| 800 | 0,908 | 0,680 | 0,420 | 0,215 | 0,090 | 0,031 |
| 1000 | 0,923 | 0,735 | 0,500 | 0,292 | 0,146 | 0,063 |
| 1200 | 0,938 | 0,744 | 0,562 | 0,358 | 0,201 | 0,099 |

Фактический диаметр капли воды определяет техническая характеристика распыляющего устройства.

Расход воды на охлаждение пожарных газов водяной завесой определяют по формуле

$$Q_{л} = zS_{в}V_{в}. \quad (9)$$

Расход воды из сети пожарно-оросительного водоснабжения в точке подключения установки пожаротушения $Q_{с}, \text{ м}^3/\text{ч}$, определяют по формуле [4]

$$Q_{с} = \sqrt{\frac{H_{общ}}{S_{н}}}, \quad (10)$$

где $H_{общ}$ – давление в пожарно-оросительном трубопроводе в точке подключения установки пожаротушения, МПа;

$S_{н}$ – сопротивление сети пожарно-оросительного водоснабжения, $\text{с}^2/\text{м}^5$, согласно прил. 11 Правил [4].

При условии $Q_{л} > Q_{с}$ необходимо изменение гидравлических параметров пожарного водоснабжения в аварийной выработке или увеличение дисперсности распыляемой воды.

При условии $Q_{л} < Q_{с}$ определяем необходимое количество распылителей n_p исходя из площади сечения выработки, необходимого расхода воды и параметров распыленной воды. При большем количестве распылителей увеличивается расход воды на орошение поверхности выработки и снижается коэффициент использования воды. Количество распылителей

$$n_p = S_B / S_{\phi}, \quad (11)$$

где S_{ϕ} – площадь распыления, образуемого одним распылителем;

$$S_{\phi} = \pi L_{\phi}^2 \cos^2 \theta, \quad (12)$$

где L_{ϕ} – длина распыления, образуемого одним распылителем.

На основании закона Срезневского [7] построена математическая модель движения испаряющейся капли в нагретом газовом потоке [8]:

$$\begin{aligned} x(\tau) &= \frac{2|\vec{V}_0| \cos(n,x)}{\gamma} \left(\frac{1-\sqrt{1-\gamma\tau}}{\sqrt{1-\gamma\tau}} \right) + a; \\ y(\tau) &= \frac{2|\vec{V}_0| \cos(n,y)}{\gamma} \left(\frac{1-\sqrt{1-\gamma\tau}}{\sqrt{1-\gamma\tau}} \right) - V_1 \tau + b, \end{aligned} \quad (13)$$

$$z(\tau) = -\frac{g}{5\gamma^2} (1-\gamma\tau)^2 + \frac{2}{\gamma} \left(|\vec{V}_0| \cos(n,z) - \frac{2g}{5\gamma} \right) (1-\gamma\tau)^{-1/2} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{g}{\gamma} - 2|\vec{V}_0| \cos(n,z) \right) + c,$$

где V_0 – начальная скорость вылета капли жидкости из распылителя, м/с;
 $\cos(n, x)$, $\cos(n, y)$, $\cos(n, z)$ – направляющие косинусы единичного вектора, совпадающего по направлению с вектором скорости капли в начальный момент времени \vec{V}_0 ;

k – коэффициент испарения;

τ – время полета капли, с;

a, b, c – координаты размещения распыляющего устройства в системе $OXYZ$, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Система уравнений описывает координаты центра массы капли во времени. Это позволяет определить положение капли в ограниченном поверхностью горной выработки пространстве.

Объем воды, поданной на локализацию пожара в выработке, делится на количество воды, находящейся во взвешенном состоянии и движущейся в свободном пространстве выработки, и воды, осевшей на стенках и почве

выработки. Соотношение этих объемов определяет коэффициент распределения воды в горной выработке K_p в зависимости от типа распылителя, его месторасположения и угла вылета капель θ, \dots° .

Данные расчетов для двух типов распылителей и двух значений угла распыления представлены в табл. 2 и 3, согласно рис. 2.

Таблица 2

Значение коэффициента K_p при $\theta = 45^\circ$

| Месторасположение распылителя, согласно рис. 2 | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $a, \text{ м}$ | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | |
| $c, \text{ м}$ | 1,5 | | 1,5 | | 2,0 | | 2,0 | |
| Тип распылителя | | | | | | | | |
| $V_0, \text{ м/с}^*$ | ЦС** | Ц*** | ЦС | Ц | ЦС | Ц | ЦС | Ц |
| 5 | 0,64 | 0,19 | 0,61 | 0,21 | 0,75 | 0,21 | 0,7 | 0,25 |
| 10 | 0,51 | 0,09 | 0,52 | 0,12 | 0,59 | 0,09 | 0,6 | 0,13 |
| 15 | 0,40 | 0,06 | 0,42 | 0,07 | 0,45 | 0,05 | 0,48 | 0,08 |
| 20 | 0,27 | 0,04 | 0,35 | 0,05 | 0,37 | 0,04 | 0,39 | 0,05 |
| 25 | 0,23 | 0,03 | 0,30 | 0,04 | 0,31 | 0,03 | 0,33 | 0,03 |

Таблица 3

Значение коэффициента K_p при $\theta = 35^\circ$

| Месторасположение распылителя, согласно рис. 2 | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $a, \text{ м}$ | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | |
| $c, \text{ м}$ | 1,5 | | 1,5 | | 2,0 | | 2,0 | |
| Тип распылителя | | | | | | | | |
| $V_0, \text{ м/с}^*$ | ЦС** | Ц*** | ЦС | Ц | ЦС | Ц | ЦС | Ц |
| 5 | 0,65 | 0,19 | 0,62 | 0,21 | 0,77 | 0,21 | 0,71 | 0,25 |
| 10 | 0,56 | 0,09 | 0,58 | 0,12 | 0,70 | 0,09 | 0,67 | 0,13 |
| 15 | 0,46 | 0,06 | 0,51 | 0,07 | 0,58 | 0,05 | 0,59 | 0,08 |
| 20 | 0,38 | 0,04 | 0,44 | 0,05 | 0,48 | 0,04 | 0,50 | 0,05 |
| 25 | 0,33 | 0,03 | 0,38 | 0,04 | 0,41 | 0,03 | 0,43 | 0,03 |

* V_0 – скорость вылета капель из распылителя; **ЦС – центробежно-струйный распылитель; ***Ц – центробежный распылитель

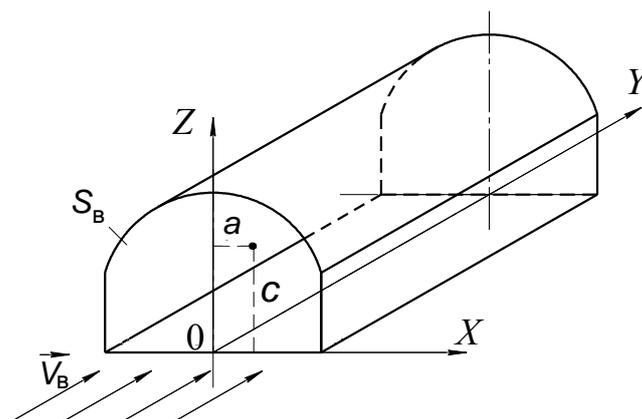


Рис. 2. Схема расположения распыляющего устройства в поперечном сечении горной выработки:

• – место расположения распыляющего устройства

Время испарения капель воды, находящихся во взвешенном состоянии и движущихся в свободном пространстве выработки, $\tau_{\text{исп}}$ должно отвечать следующим условиям:

$$\tau_{\text{исп}} \leq \tau_{\text{пол}},$$

где $\tau_{\text{пол}}$ – среднее время полета капель воды, вылетающих горизонтально из распылителя, с.

В противном случае часть воды будет оседать на почву выработки, не участвуя в процессе охлаждения пожарных газов, что приводит к нерациональному расходу поданной на локализацию воды.

Соотношение времени полета и времени испарения капель воды определяет коэффициент испарения:

$$k_{\text{исп}} = \tau_{\text{пол}} / \tau_{\text{исп}}. \quad (14)$$

Время полета, т.е. продолжительность падения капли воды на поверхность выработки, в зависимости от высоты расположения распылителя H определяют по рис. 3.

На основании исследования механизма теплообмена мелкораспыленной воды и нагретого пожаром газового потока, движущегося по выработке, который заключается в интенсивности парообразования, характеризующей степень охлаждения пожарных газов, получена зависимость, определяющая полное время испарения распыленной жидкости [6]:

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{5,89 \cdot 10^6 d_0^2}{\ln(1 + 0,00037 t_{\text{гк}})}, \quad (15)$$

где d_0 – начальный диаметр капли, мм.

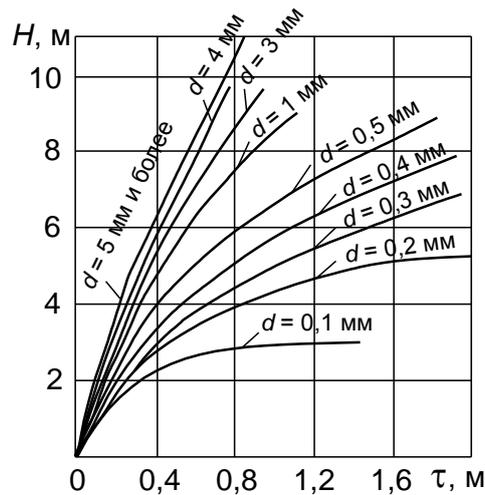


Рис. 3. Продолжительность падения капли воды на поверхность выработки в зависимости от высоты расположения распылителя

Произведение коэффициента испарения воды $K_{\text{исп}}$ на коэффициент распределения воды K_p является коэффициентом локализации K_l , который определяет массовую долю воды, превращающуюся в пар, снижая температуру газового потока:

$$K_l = K_{\text{исп}} K_p. \quad (16)$$

Коэффициент K_l рассчитывают для выбранного оборудования и он характеризует эффективность применения оборудования при локализации пожара на конкретном объекте.

Необходимым условием эффективности работы завесы будет соотношение

$$K_l \geq \chi. \quad (17)$$

Глубину водяной завесы L_3 , м, определяют по формулам

$$L_3 = \begin{cases} V_B \tau_{\text{исп}}, & \text{если } \tau_{\text{исп}} < \tau_{\text{пол}}; \\ \tau_{\text{пол}} (V_0 \cos \theta + V_B), & \text{если } \tau_{\text{исп}} > \tau_{\text{пол}}, \end{cases} \quad (18)$$

где V_0 – скорость вылета каплей из распылителя, м/с; определяют по формуле

$$V_0 = \sqrt{120P_p}, \quad (19)$$

P_p – давление перед распылителем, МПа;
 $\cos \theta$ – косинус угла распыления, рад.

В случае выполнения условия (17) производят расчет температуры за водяной завесой.

Температуру газового потока t_{Γ} , °С, при выходе его из зоны орошения определяют по формуле

$$t_{\Gamma} = t_{\Gamma K} - \frac{3q_p n_p \tau K_l \rho_B r}{S_B L_3 \rho_{\Gamma} c_{\Gamma}}, \quad (20)$$

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

n_p – количество распылителей в зоне орошения;

τ – временной параметр взаимодействия капель с потоком, с;

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\text{исп}}, & \text{если } \tau_{\text{исп}} < \tau_{\text{пол}}; \\ \tau_{\text{пол}}, & \text{если } \tau_{\text{исп}} > \tau_{\text{пол}}; \end{cases}$$

ρ_B – плотность воды, кг/м³;

r – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг;

ρ_{Γ} – плотность газового потока, кг/м³;

c_{Γ} – удельная теплоемкость газового потока, кДж/(кг·К).

Рассмотрено условие

$$t_{\Gamma} \leq t_{\text{восп}}, \quad (21)$$

где $t_{\text{восп}}$ – минимальная температура возгорания пожарной нагрузки, °С.

При данном соотношении установка выполнит свои функции.

При невыполнении условия (21) необходимо повторно рассчитать количество распылителей и их расстановку по сечению выработки.

Минимальное расстояние между локализирующими установками определяют по формуле [4]

$$L_{c \min} = \frac{73,16 G_B}{(1,25 + \frac{G_B}{S_B}) \sqrt{S_B}} \ln \left[\frac{t_{\Gamma} - t_0}{t_{\text{тпс}} - t_0} \right], \quad (22)$$

где G_B – расход воздуха в выработке, м³/с;

t_0 – температура окружающей газовой среды при нормальном режиме работы, К;

$t_{\text{тпс}}$ – температура срабатывания пожарного извещателя, К;

$L_{c \min}$ – расстояние между установками локализации, при котором в зоне размещения следующей установки локализации по ходу вентиляционной струи температура газовой среды не будет превышать температуру срабатывания пожарного извещателя $t_{\text{тпс}}$ установки, то есть будет выполнено условие

$$t_{\text{тпс}} > t_{\Gamma}. \quad (23)$$

Количество установок в пределах выработки N_{yc} :

$$N_{yc} = \left(\frac{L_B}{L_{c \min}} \right) - 1, \quad (24)$$

где L_B – длина выработки, м.

Выводы. Методика разработана на основании теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в НИИГД «Респиратор».

В результате исследований:

1. Обоснованы закономерности движения мелкораспыленной жидкости совместно с потоком нагретых пожарных газов в пространстве, ограниченном горной выработкой, и установлены зависимости количества воды, идущей на охлаждение пожарных газов, от их температуры, гидравлических параметров системы водоснабжения, геометрических параметров распыляющих устройств и мест их расположения в сечении выработки, что позволило обосновать коэффициент локализации, определяющий, какая часть воды из общего объема поданной жидкости идет на локализацию пожара и таким образом оптимизировать размещение распыляющих устройств на защищаемом объекте.

2. Установлено время испарения жидкости в зависимости от ее дисперсности, изменяющейся температуры газового потока, комплексного коэффициента теплопроводности парогазовой смеси, что дало возможность обосновать объемную долю испарившейся воды, которая идет на локализацию пожара.

3. Установлено, что эффективность пожарного оборудования для локализации пожаров в горных выработках водяными завесами зависит от коэффициента локализации, определяемого как произведение коэффициентов испарения и распределения распыленной воды.

4. Установлены закономерности формирования водяной завесы в горной выработке, заключающиеся в обосновании ее оптимальной глубины, обеспечивающей снижение температуры пожарных газов за завесой до безопасного значения, в зависимости от температуры газового потока, дисперсности воды, коэффициента локализации, конструктивных и гидравлических параметров распыляющих устройств.

Методика дает возможность оценить эффективность применяемого противопожарного оборудования для локализации пожаров диспергированной водой в зависимости от степени пожароопасности защищаемого объекта и возможности системы пожарного водоснабжения или же разработать новые высокоэффективные средства.

Методика расчета параметров водяной завесы для локализации подземных пожаров внесена в качестве приложения в разрабатываемые Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности и внедрена на угольных шахтах.

Список литературы / References

1. Ющенко Ю.Н. Нормативный расход воды для локализации подземного пожара / Ю.Н. Ющенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 21 – 26.
Yushchenko, Yu.N. (1999). *Normativnyy raskhod vody dlya lokalizatsii podzemnogo pozhara* [The normative water consumption for localization of an underground fire]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 21 – 26.
2. Ющенко Ю.Н. Эффективность водяных завес при тушении пожаров / Ю.Н. Ющенко, К.И. Поздняков // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1997. – С. 35 – 37.
Yushchenko, Yu.N. and Pozdnyakov, K.I (1997). *Effektivnost vodyanykh zaves pri tushenii pozharov* [Efficiency of water curtains by fighting the fires]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 35 – 37.
3. Дауэнгауэр С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С.А. Дауэнгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13, № 6. – С. 78 – 81.
Dauengauer, S.A. (2004). *Pozharotusheniye tonkoraspylyennoy vodoy: mekhanizmy, osobennosti, perspektivy* [Fighting the fires with fine-air water: mechanisms, peculiarities, prospects]. *Pozharovzryvobesopasnost*, vol. 13, no. 6, pp. 78 – 81.
4. Правила пожежної безпеки для підприємств вугільної промисловості України: НАПБ Б.01.009-2004. – Київ: Мінпаливенерго України, 2005. – 150 с.
Pravyly pozhazhnoi bezpeky dlia pidpriemstv vugil'noi promyslovosti Ukrainy НАПБ Б.01.009-2004 [Fire safety regulations for coal industry enterprises of the Ukraine НАПБ Б.01.009-2004] (2005). Kyiv, Minpalyvenergo Ukrainy, 150 p.
5. Ющенко Ю.Н. Разработка систем и создание технических средств пожарного водоснабжения горных выработок глубоких шахт: дис. ... канд. техн. наук / Ю.Н. Ющенко. – Донецк, 2002. – 184 с.
Yushchenko, Yu.N. (2002). *Razrabotka sistem i sozdaniye tekhnicheskikh sredstv pozharnogo vodosnabzheniya gornykh vyrabotok glubokikh shakht*. Diss. kand. tech. nauk [Development of systems and creation of technical means of fire water supply of mine workings of deep mines. Cand. tech. sci. diss.]. Donetsk, 184 p.
6. Коляда А.Ю. Параметры водяной завесы при локализации подземного пожара / А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 72 – 81.
Kolyada, A.Yu. (2008). *Parametry vodyanoy zavesy pri lokalizatsii podzemnogo pozhara* [Parameters of the water curtain by localization of an underground fire]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 45, pp. 72 – 81.

7. Балістика крапель розпилених вогнегасних рідин / В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський, О.М. Ларін, Є.М. Фомін. – Біла Церква: Пшонківський О.В., 2006. – 124 с.

Ol'shans'kyi, V.P., Ol'shans'kyi, S.V., Larin, O.M. and Fomin, Ye.M. (2006), *Balistyka krapel' rozpylenykh vognegasnykh ridyn* [Ballistics of drops of fire-fighting mist sprays]. Bila Tserkva, Pshonkivskyi O.V., 124 p.

8. Ющенко Ю.Н. Рациональное расположение распыливающих устройств при локализации пожара в горной выработке / Ю.Н. Ющенко, А.Ю. Коляда, Н.В. Бондаренко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 115 – 121.

Yushchenko, Yu.N., Kolyada, A.Yu. and Bondarenko, N.V. (2013). *Ratsionalnoye raspolozheniye raspylivayushchikh ustroystv dlya lokalizatsii pozhara v gornoy vyrabotke* [The rational disposition of sprayer units by localization of a fire in a mine working]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 50, pp. 115 – 121.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.А. Чернышевым.
Дата поступления рукописи 22.04.2015*

Purpose. Working-out the methodology of calculation of water curtains ensuring the effective localization of the fires in the mine workings of coal mines.

Methods. Theoretical method of investigation of ballistics of mist spray drops, heat-mass exchange of fire gases with water drops and mine working walls, statistical methods of experimental investigations of the localization processes.

Results. The methodology of calculation of the parameters of localization of the underground fires with the use of water curtains was created. The methodology given will be part of the new edition of the Fire safety regulations for the enterprises of the coal industry.

Findings. The methodology worked out enables to appreciate the efficiency of the fire-prevention equipment being used to localize the fires with the dispersed water in the mine workings or to create the new high-effective means for localization of the fire.

Keywords: fire, mine working, localization, consumption, water curtain, fighting, depth of curtain, time, velocity, gas flow temperature, installation, pressure.

УДК 622.822.225

И.Г. Старикова, канд. техн. наук, ученый секретарь НИИГД «Респиратор», Донецк

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

I.G. Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

CRITERION OF ESTIMATION OF FIRE HAZARD OF COAL SEAMS

Цель. Определение критерия пожароопасности угольных пластов и установление времени их самовозгорания.

Методика. Физическое и математическое моделирование, адекватные физические эксперименты на стандартном теплофизическом оборудовании с целью установления условий зарождения и развития очагов самовозгорания.

Результаты. Найдена аналитическая зависимость кинетики температурного режима нарушенного угольного пласта, определяющая склонность угольного массива к самонагреванию и самовозгоранию.

Научная новизна. С учетом стандартных теплофизических свойств углей оценено время самонагревания и самовозгорания компактного угольного массива.

Практическая значимость. Разработана методика прогноза времени самонагревания и самовозгорания угольных массивов разной степени нарушенности.

Ключевые слова: угольный пласт, самовозгорание, инкубационный период, пожароопасность, коэффициент теплоотдачи.

Постановка проблемы. Самовозгорание представляют как физико-химический процесс, протекающий в промышленной обстановке. С физической точки зрения самовозгорание – это процесс перехода химической системы в состояние горения из низкотемпературного состояния вследствие образования теплоты внутри самой системы [1].

Анализ последних исследований. Анализ литературных источников показывает, что на пластах, склонных к самовозгоранию, могут возникнуть эндогенные пожары. В первых попытках определения пожароопасности объектов методами математической физики многие исследователи [2–4] использовали различные варианты упрощенного уравнения теплового баланса в скоплении угля без учета массопереноса и некоторых условий теплоотдачи. Решение этих уравнений позволило получить аналитические выражения для определения критических параметров или показателей пожароопасности, имеющих определенный физический смысл.

При решении уравнения теплопроводности с разными начальными условиями в работах [5, 6] предложены критерии оценки пожароопасности. Авторы оперировали в основном такими понятиями, как тепловой эффект реакции кислород-уголь, константа скорости сорбции кислорода углем, а также использовали скорость потока воздуха через угольное скопление (насыпной уголь). В данной работе рассмотрено компактное угольное скопление (пласт).

Таким образом, для установления склонности угольного пласта (целика) к пожароопасности необходимо уточнение перечисленных выше критериев.

Цель исследования. Цель работы – определение критерия пожароопасности угольных пластов и установление времени их самовозгорания.

Материалы и результаты исследования. По результатам исследования, проведенного в работе [7], уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \kappa(T - T_0) + \beta, \quad (1)$$

где T – температура пласта, К;

t – время нагревания (остывания) пласта, с;

x – координата по простиранию пласта, м;

T_0 – начальная температура пласта, К;

$$\kappa = b - \eta; \quad \eta = \frac{q\Pi c E l_1^2}{\lambda}; \quad b = \frac{2l_1^2}{l_2 h}; \quad l_1 = \frac{\lambda}{\alpha_1}; \quad l_2 = \frac{\lambda}{\alpha_2}; \quad \beta = \frac{q\Pi c U_0 l_1^2}{\lambda};$$

q – плотность теплового потока, Дж/м³;

c – объемная доля кислорода, %;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

α_1 – коэффициент теплоотдачи от угля в выработанное пространство, Вт/(м²·К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от угля во вмещающие породы, Вт/(м²·К);

E – температурный коэффициент скорости сорбции кислорода углем, 1/(с·К);

U_0 – константа скорости сорбции кислорода углем, с⁻¹;

h – мощность пласта, м;

Π – пустотность угольного пласта.

Пласт считают столь тонким, что можно пренебречь изменением температуры поперек пласта. Тогда $T(x, t)$ означает среднюю по сечению пласта температуру в данном месте x (рис. 1).

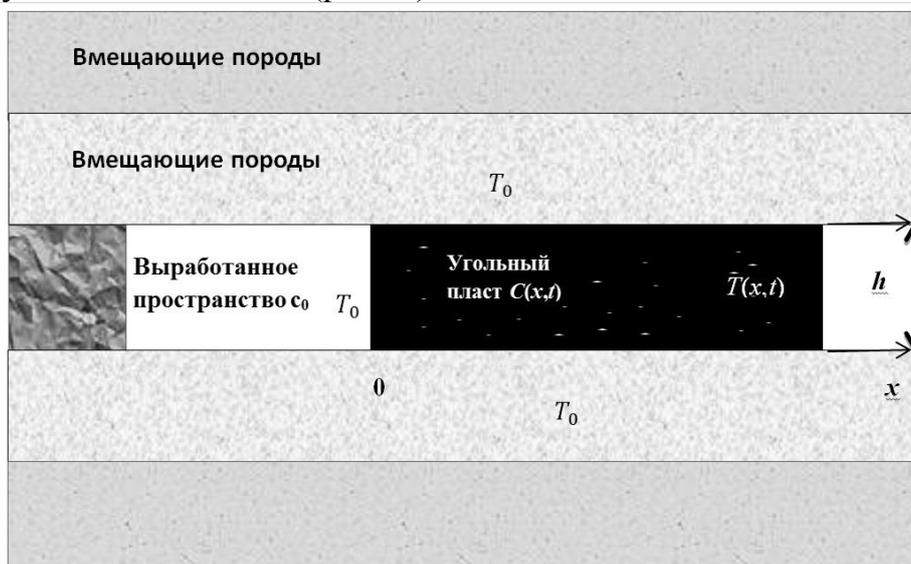


Рис. 1. Пространственно-временное распределение температуры и концентрации краевой части угольного пласта

В начале процесса самонагрева угольного образца (рис. 2) уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial(T-T_0)}{\partial t} = -(b-\eta)(T-T_0) + \beta.$$

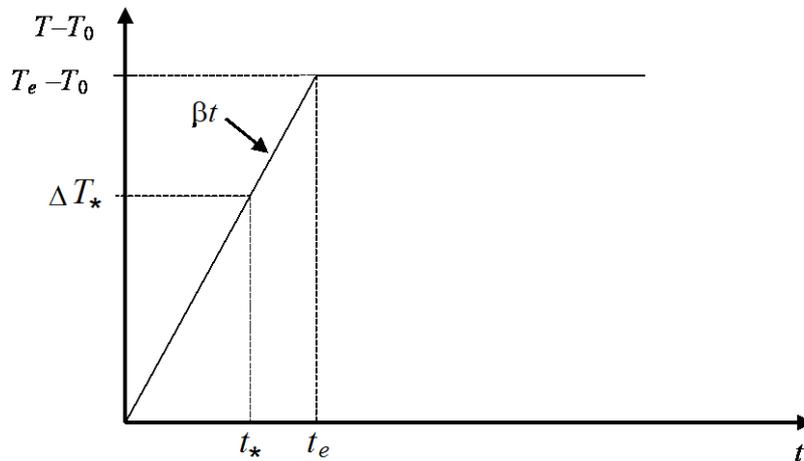


Рис. 2. Зависимость нагревания угольного пласта от времени

На начальном этапе процесса

$$(T-T_0) = \beta t. \quad (2)$$

Во время t_e наступает стабилизация температуры. Стабилизируем температуру на уровне $T_e - T_0 \approx \frac{\beta}{b-\eta}$. Для этого приравняем к нулю правую часть уравнения (1) и находим соответствующее время стабилизации температуры:

$$t_e = \frac{1}{b-\eta} = \frac{hC_V}{2\alpha_2 - q\Pi c E h}. \quad (3)$$

Из рис. 2 видно, что время самовозгорания

$$t_* = \frac{\Delta T_*}{\beta} = \frac{\Delta T_* C_V}{q\Pi c U_0}. \quad (4)$$

В работе [8] доказано, что при ограниченном доступе кислорода в пласт его температура всегда достигает определенного значения, в отличие от ситуации с постоянной концентрацией кислорода, когда может возникнуть режим неограниченного роста температуры. Критерий возникновения такого режима представлен формулой

$$\frac{\beta}{(b - \eta)\Delta T_*} > 1 \text{ или } \frac{U_0}{\Delta T_* E \left(\frac{2\alpha_2}{hq\Pi c E} - 1 \right)} > 1. \quad (5)$$

Определить инкубационный период самовозгорания угольного пласта (табл. 1, 2) можно с учетом критерия самовозгорания по формуле (5) и инкубационного периода по формуле (4) или времени самонагрева углей по формуле (3).

Таблица 1

Исходные данные

| Шахта, пласт, марка угля | Дата аварии | Мощность пласта h , м | Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К) | Коэффициент теплоотдачи α_y , Вт/(м ² ·К) | Теплота реакции $q \cdot 10^6$, Дж/м ³ | Пустотность пласта П | Объемная доля кислорода ϵ , % | Температурный коэффициент скорости сорбции, $E \cdot 10^{-6}$, 1/(с·К) | Константа скорости сорбции $U_0 \cdot 10^{-5}$, с ⁻¹ | Температура ΔT , К |
|--------------------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------------|---|--|----------------------|--|---|--|----------------------------|
| «Самсоновская-Западная», k_2^H , Ж | 11.05.2003 | 1,2 | 1820000 | 0,11 | 12,57 | 0,12 | 20 | 0,6 | 2,5 | 82 |
| «Северная», l_8^1 , К | 21.06.2009 | 1,4 | 1820000 | 0,12 | 12,57 | 0,12 | 20 | 0,56 | 2,5 | 90 |
| «Пионер», m_4^2 , К | 23.09.2010 | 1,02 | 1820000 | 0,1 | 12,57 | 0,12 | 20 | 0,6 | 2,5 | 93 |

Таблица 2

Расчетные параметры пожароопасности

| Шахта, пласт, марка угля | Дата аварии | Критерий пожароопасности | Время самовозгорания, мес. | Фактическое время самовозгорания, мес. |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------|----------------------------|--|
| «Самсоновская-Западная», k_2^H , Ж | 11.05.2003 | 39 | 8,3 | 9 |
| «Северная», l_8^1 , марка К | 21.06.2009 | 34 | 8,4 | 8 |
| «Пионер», m_4^2 , марка К | 23.09.2010 | 5,4 | 8,6 | 10 |

Выводы. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета критерия пожароопасности угольных пластов и времени их самонагрева и самовозгорания. Расчет этих параметров на примере эндогенных пожаров, произошедших в различных условиях, свидетельствует, что полученный критерий позволяет достоверно прогнозировать пожароопасность пласта, а ошибка в определении времени его самовозгорания не превышает 15 %.

Список литературы / References

1. Окисление и самовозгорание твердого топлива / В.И. Саранчук, Д.Д. Русчев, В.К. Семененко и др. – Киев: Наук. думка, 1994. – 264 с.

Saranchuk, V.I., Ruschev, D.D., Semenenko, V.K. etc. (1994). *Okisleniye i samovozgoraniye tverdogo topliva* [Oxidation and spontaneous combustion of the solid fuel]. Kiev, Naukova dumka, 264 p.

2. Склонность углей к самовозгоранию и ее прогноз // Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – С. 348 – 354.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. and Zinchenko, I.N. (2012). *Sklonnost ugley k samovozgoraniyu i yeye prognos* [Liability of coals to spontaneous combustion and its prognosis]. Donetsk, Arpi, pp. 348 – 354.

3. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели / И.Р. Венгеров. – Донецк: Норд-пресс, 2008. – Т. 1. – 632 с.

Vengerov, I.P. (2008). *Teplofizika shakht i rudnikov. Matematicheskiye modeli* [Thermal physics of mines and pits. Mathematical models]. Donetsk, Nord-press, vol. 1, 632 p.

4. Костенко В.К. Влияние на кинетику окисления угля его фракционного состава и концентрации кислорода / В.К. Костенко, Б.И. Кошовский, Е.Л. Завьялова // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 104 – 109.

Kostenko, V.K., Koshovskiy, B.I. and Zavyalova, Ye.L. (1999). *Vliyaniye na kinetiku okisleniya uglya yego fraktsionnogo sostava i kontsentratsii kisloroda* [Influence of fractional composition and oxygen concentration on kinetics of coal oxidation]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. [Donetsk, pp. 104 – 109.

5. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.

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

6. Греков С.П. Комплексный критерий оценки эндогенной пожароопасности угольных пластов в зонах геологических нарушений / С.П. Греков, П. С. Пашковский, И. Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2009. – Вып. 46. – С. 67 – 77.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Zinchenko, I.N. (2009). *Kompleksnyy kriteriy otsenki endogennoy pozharoopasnosti ugolnykh plastov v zonakh geologicheskikh narusheniy* [The complex criterion of the estimation of the fire hazard of coal seams in the zones of geological disturbances]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 46, pp. 67 – 77.

7. Фельдман Э.П. Самонагревание и температурный режим маломощных угольных пластов / Э.П. Фельдман, И.Г. Старикова // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2011. – Вып. 48. – С. 84 – 94.

Feldman, E.P. and Starikova, I.G. (2013). *Samonagrevaniye i temperaturnyy rezhim malomoshchnykh ugolnykh plastov* [Spontaneous heating and temperature conditions of the thin coal seams]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 48, pp. 84 – 94.

8. Фельдман Э.П. Самонагревание угольного пласта в условиях затрудненного доступа кислорода / Э.П. Фельдман, И.Г. Старикова // Химия твердого топлива. – 2013. – № 1. – С. 16 – 23.

Feldman, E.P. and Starikova, I.G. (2013). *Samonagrevaniye ugolnogo plasta v usloviyakh zatrudnyennogo dostupa kisloroda* [Spontaneous heating of a coal seam under conditions of the oxygen access hindered]. *Khimiya tverdogo topliva*, no. 1, pp. 16 – 23.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 08.07.2015*

Purpose. Determination of the criterion of the fire hazard of the coal seams and ascertainment of the time of their spontaneous combustion.

Methodology. Physical and mathematical modeling, adequate physical experiments with the standard thermophysical equipment for the purpose of ascertainment of the conditions of origin and development of places of the spontaneous combustion.

Results. The analytical dependence of kinetics of temperature conditions of the coal seam disrupted determining the liability of the coal massif to spontaneous heating and spontaneous combustion was found.

Scientific novelty. Taking into account the standard thermophysical properties of coals the time of the spontaneous heating and spontaneous combustion of the solid coal massif is estimated.

Practical value. The methodology of prognosis of the time of the spontaneous heating and spontaneous combustion of the coal massifs with the various disturbance degree was worked out.

Keywords: coal seam, spontaneous combustion, incubation period, fire hazard, heat-transfer coefficient.

УДК [622.016.53:614.844.1]-52

*И.Ф. Дикенштейн, науч. сотр., А.А. Диденко, науч. сотр.,
Е.Н. Розанова, инж. НИИГД «Респиратор», Донецк*

ВЗРЫВО- И ПОЖАРООПАСНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗНЫХ ГАРАЖЕЙ

*I.F. Dikenshteyn, scientific associate, Didenko A.A., scientific associate,
Ye.N. Rozanova, engineer (NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

EXPLOSION- AND FIRE SAFETY OF UNDERGROUND ELECTRIC LOCOMOTIVE GARAGES

Цель. Определение массы водорода, поступающего в зарядную камеру шахтного электровозного гаража, расчет избыточного давления взрыва водородно-воздушной смеси и обоснование категории таких камер по взрыво- и пожароопасности.

Методика. Информационно-аналитические исследования, математическая обработка экспериментальных данных других авторов.

Результаты. Получена расчетная зависимость для определения избыточного давления взрыва водородно-воздушной смеси в зарядных камерах, учитывающая конкретные шахтные условия. Дана оценка взрыво- и пожароопасности камер.

Практическая значимость. Обоснована категория взрыво- и пожароопасности электровозных гаражей, предложены меры противопожарной защиты и обосновано применение автоматических систем пожаротушения, ликвидирующих пожар на ранней стадии его возникновения, что приводит к минимизации возможных ущербов.

Ключевые слова: электровозный гараж, зарядная камера, аккумуляторная батарея, водород, водородно-воздушная смесь, категория, автоматическая система пожаротушения.

Постановка проблемы. На угольных шахтах к пожароопасным объектам, помимо прочих, относят электровозные депо (преобразовательные подстанции и зарядные камеры). За рубежом, например в Германии, камеры для зарядки аккумуляторных батарей шахтных электровозов также относят к пожароопасным объектам. Особенности развития пожаров в них, осложняющими ход ведения горноспасательных работ, являются следующие:

- зачастую электровозные гаражи расположены в околоствольных дворах воздухоподающих стволов и возникновение пожаров в них создает угрозу распространения продуктов горения по всем выработкам шахты;
- незначительный объем камер гаража приводит к быстрому нарастанию температуры в них. Это исключает возможность активного тушения пожара первичными огнетушащими средствами;
- наличие электрооборудования, находящегося под напряжением, создает угрозу поражения электротоком людей, тушащих пожар водой или пеной;
- в зарядных камерах создается угроза взрыва водородно-воздушной смеси.

В связи с этим противопожарная защита электровозных депо – актуальная задача.

Категории электровозных гаражей по взрыво- и пожароопасности формируют требования к их противопожарной защите. Правильное определение категории важно, поскольку заранее определяет недостаточность или чрезмерность мероприятий по противопожарной защите.

Анализ последних исследований и публикаций. Специальные работы, посвященные категорированию и противопожарной защите шахтных электровозных гаражей, отсутствуют. В работе [1] дана оценка количества водорода, поступающего в помещение аккумуляторных станций общепромышленного назначения, и обоснование категории таких помещений по взрыво- и пожароопасности.

В работе [2] приведена методика расчета параметров и выбора типоразмера автоматических систем пожаротушения подземных объектов, включая электровозные гаражи.

Цель настоящей работы – расчет массы водорода, поступающего в зарядную камеру при зарядке тяговых электровозных аккумуляторных батарей с учетом шахтных особенностей, расчет избыточного давления взрыва водородно-воздушной смеси, категорирование и разработка мер противопожарной защиты этих объектов.

Изложение основного материала исследований. Основными причинами пожаров в шахтных электровозных гаражах являются:

- взрыв или воспламенение водородно-воздушной смеси в зарядных камерах гаражей;
- неисправность электрооборудования, штепсельных соединений, кабельной сети;
- отсутствие или неисправность средств защиты электрооборудования от токов короткого замыкания и токов утечки;
- неправильная подвеска силовых кабелей;
- использование гибких резиновых кабелей (за исключением отводов от шинных коробок к зарядным столам);
- отсутствие или неисправность заземления металлических оболочек электрооборудования, кабелей, зарядных столов;
- засоренность аккумуляторных батарей отложениями солей, грязи, щелочей, угольной пыли;
- повышение температуры электролита в аккумуляторных батареях свыше 43 °С.

Для питания шахтных аккумуляторных электровозов применяют тяговые никель-железные (никель-кадмиевые) аккумуляторные батареи. Никель-железные (никель-кадмиевые) аккумуляторы, залитые электролитом (раствор NaOH или KOH плотностью 1,18-1,21), при работе и зарядке выделяют водород H_2 и кислород O_2 (электролитический газ).

В соответствии с диаграммой Шапиро-Мафетти дефлаграция (воспламенение) водородно-воздушной смеси возможна, если объемная доля

водорода в помещении C_{H_2} превышает 4 %. Способность водородно-воздушной смеси к воспламенению и взрыву резко возрастает при объемной доле водорода $C_{H_2} > 8 \%$. В среде с объемной долей C_{H_2} более 75 % водородно-воздушная смесь становится инертной [3].

Наибольшее количество водорода выделяется в режиме зарядки аккумуляторов. Так, при полном заряде аккумуляторной батареи, состоящей из 126 никель-железных аккумуляторов емкостью 550 А·ч, выделяется около 15 м³ водорода [4].

При местном нагревании или возникновении искр внутри батарейного ящика может произойти взрыв водородно-воздушной смеси с превращением в пожар. Это особенно актуально для зарядных камер подземных электровозных гаражей. При нарушении проветривания или несоблюдении требований инструкций по зарядке аккумуляторных батарей возможно загазование камеры или мест расположения электрооборудования (зарядных столов). В шахтных условиях невозможно обеспечить герметичность оболочек зарядных устройств, поскольку электрооборудование необходимо вскрывать для осмотра внутренних частей, настройки, регулирования и т.п. Кроме того, зазоры в местах соединения отдельных частей оболочек создают условия для так называемого «дыхания» электрооборудования вследствие теплового режима его работы. При этом при охлаждении электрооборудования внутрь оболочки через щели «засасывается» окружающая воздушная среда. Таким образом, внутрь оболочки зарядных устройств и аккумуляторных батарей может попасть взрывчатая среда с последующим воспламенением ее, например, при искрении на контактах коммуникационных элементов. Возможно проникновение пламени сквозь щели и воспламенение окружающей среды.

Канадские исследователи Е. Дейнти и Г. Браун изучали проникновение водорода в оболочку электрооборудования извне через зазоры фланцев. Обобщая эти экспериментальные данные, время нарастания концентрации водородно-воздушной смеси внутри оболочки можно описать зависимостью [5]

$$\tau = \frac{lV_1}{DLS} \ln \frac{C_0 - C_{i0}}{C_0 - C_i}, \quad (1)$$

где τ – время, с;

l – длина диффузионного пути (ширина фланца), м;

V_1 – объем оболочки, в которую проникает газ, м³;

D – коэффициент диффузии водорода, м²/с;

L – периметр фланцевого соединения, м;

S – зазор между фланцами, м;

C_0 – концентрация водорода во внешней среде, моль/м³;

C_{i0} – концентрация водорода в оболочке в начале эксперимента, моль/м³;

C_i – концентрация водорода внутри оболочки в конце эксперимента, моль/м³.

В соответствии с работой [7] избыточное давление взрыва ΔP , кПа, определяют по формуле

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{mZ100}{V_{\text{св}} \rho_{\text{г}} C_{\text{ст}} K_{\text{Н}}}, \quad (2)$$

где P_{\max} – максимальное давление взрыва стехиометрической газоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа;

P_0 – начальное давление, кПа;

m – масса горючего газа в помещении, кг;

Z – коэффициент участия горючего во взрыве;

$V_{\text{св}}$ – свободный объем помещения, м³;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа; определяют по формуле

$$\rho_{\text{г}} = \frac{M}{V_0(1+0,00367 t_{\text{р}})}, \quad (3)$$

где $V_0 = 22,413 \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ – молярный объем;

$t_{\text{р}}$ – расчетная температура в помещении, °С;

$C_{\text{ст}}$ – стехиометрическая объемная доля горючего газа, %, определяемая по формуле

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1+4,84\beta}, \quad (4)$$

$\beta = n_{\text{C}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2}$ – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания;

$n_{\text{C}}, n_{\text{H}}, n_{\text{X}}, n_{\text{O}}$ – числа атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего;

$K_{\text{Н}}$ – коэффициент негерметичности помещения.

Для водорода ($P_{\max} = 900$ кПа; $P_0 = 101$ кПа; $Z = 1$; $V_{\text{св}} = 0,8 \cdot V_{\text{з.к}}$; $M = 2$ кг/кмоль; $V_0 = 22,413 \text{ м}^3/\text{моль}$; $n_{\text{C}} = 0$; $t_{\text{р}} = 30$ °С; $\rho_{\text{г}} = 0,08 \text{ кг/м}^3$; $n_{\text{H}} = 2$; $n_{\text{X}} = 0$; $n_{\text{O}} = 0$; $\beta = 0,5$; $C_{\text{ст}} = 29,24$ %; $Z = 1,0$; $K_{\text{Н}} = 3$) получаем

$$\Delta P = \frac{14232,07m}{V_{\text{з.к}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{з.к}}$ – объем зарядной камеры, м³.

Массу газа, поступившего в зарядную камеру, определяют по формуле

$$m = V_{\text{ак}} \rho_{\text{г}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{ак}}$ – объем газа (Н₂), выделяющегося при зарядке аккумулятора, м³.

Для учета проветривания массу газа делим на коэффициент K .

$$K = A(T+1), \quad (7)$$

где A – кратность воздухообмена, создаваемого вентиляцией, ч⁻¹;

T – продолжительность зарядки, ч;

1 – время охлаждения аккумулятора после зарядки, в течение которого продолжается выделение H_2 , ч.

$$\Delta P = \frac{1138,6V_{ак}}{V_{з.к}A(T+1)}. \quad (8)$$

Принимая в среднем $V_{ак} = 15N$; $T = 6$ ч, получаем расчетную формулу

$$\Delta P = \frac{2440N}{AV_{з.к}}, \quad (9)$$

где N – количество одновременно заряжаемых аккумуляторных батарей.

Категорирование зарядных камер можно выполнять по следующей схеме (см. рисунок).



Схема категорирования зарядных камер

Рассчитывают избыточное давление при взрыве водородно-воздушной смеси в зарядной камере при следующих предположениях:

- в качестве расчетного варианта принимают наиболее неблагоприятный период – формирование и заряд полностью разряженных батарей с напряжением более 2,3 В на элемент и наибольшим значением зарядного тока;

- происходит зарядка аккумуляторных батарей с максимальной номинальной емкостью. Длительность поступления водорода в камеру соответствует конечному периоду зарядки при максимальном газовыделении.

За расчетный вариант принимали электровозный гараж гор. 480 м шахты «Западно-Донбасская»:

- длина зарядной камеры (12 зарядных столов длиной 2,8 м и с расстоянием между столами 1,7 м) $L_{з.к} = 54$ м;
- площадь поперечного сечения $S_{з.к} = 15,9$ м²;
- объем зарядной камеры $V_{з.к} = 54 \cdot 15,9 = 862$ м³;
- аккумуляторные батареи ТНЖШ-550У5 с номинальной емкостью $C_H = 550$ А·ч и зарядным током $J_{з.к} = 165$ А;
- одновременно заряжают $N = 5$ батарей;
- время зарядки $T = 6$ ч.

При $A = 1 \dots 3$ ч⁻¹ $\Delta P = 14 \dots 4,7$ кПа, то есть камера относится к категории А (взрывоопасная).

При $A = 4 \dots 12$ ч⁻¹ $\Delta P = 3,5 \dots 1,2$ кПа, следовательно, камера категории В – пожароопасная.

Зарядная камера должна быть оборудована автоматическими системами сигнализации (АСП) и порошкового пожаротушения (АСПШ).

Необходимо также соблюдение следующих требований. Для того чтобы избежать разрушения аккумуляторов под воздействием избыточного давления электролитического газа, крышки (пробки) горловин аккумуляторов должны быть в течение всего времени зарядки открытыми, а для исключения образования местного скопления взрывчатой концентрации под крышкой батарейного ящика последняя должна быть полностью снята. В связи с интенсивностью выделения водорода из аккумуляторов при их зарядке она должна производиться только при полностью снятой крышке батарейного ящика. Аккумуляторы и батарейный ящик можно закрывать только после прекращения газовыделения из аккумуляторов, но не раньше чем через час после окончания зарядки, так как только по истечении этого времени происходит остывание электролита и прекращается интенсивное выделение электролитического газа в режиме саморазрядки. Перед выпуском аккумуляторной батареи из зарядной камеры необходимо также измерить ее сопротивление изоляции, которое не должно быть меньше 10 000 Ом, так как снижение сопротивления изоляции ниже указанного значения приводит к опасному увеличению токов утечки, что может привести к искрению, короткому замыканию и пожару в батарее. Измерять сопротивление изоляции необходимо в соответствии с Временными требованиями к сопротивлению изоляции электрооборудования рудничных аккумуляторных электровозов, находящихся в эксплуатации.

Автоматическая система порошкового пожаротушения, разработанная в НИИГД «Респиратор», предназначена для автоматического обнаружения пожара, оповещения о его возникновении с помощью звуковой сигнализации и

автоматического включения порошковых модулей для локального порошкового тушения пожара объемным способом в начальной стадии его развития на зарядных столах зарядной камеры и в преобразовательной подстанции. Эта система состоит из устройства контрольно-пускового УКП-1, датчиков тепловых шахтных ДТШ-1, устройства оповещения УО-1, линий пожарной сигнализации, модулей порошковых, оснащенных распределительными трубопроводами с распылителями, пусковым баллоном с диоксидом углерода, запорно-пусковых устройств, а также блоков пусковых (пневмореле), установленных на баллонах с диоксидом углерода.

АСПШ работает следующим образом. При возникновении пожара срабатывают датчики ДТШ-1, которые посылают электрический сигнал на УКП-1. В свою очередь УКП-1 формирует сигнал на срабатывание пускового устройства ПУ-12, в результате чего открывается клапан запорно-пускового устройства баллона с диоксидом углерода, который по соединительной трубке поступает в резервуар порошковых модулей и псевдооживляет огнетушащий порошок.

При достижении в резервуаре давления $(0,7 \pm 0,1)$ МПа разрушается мембрана в мембранном узле и газопорошковая смесь через мембранный узел, распределительный трубопровод и распылители поступает в очаг пожара.

НИИГД «Респиратор» разработал 40 проектов противопожарной защиты электровозных гаражей угольных шахт. Изготовленные системы внедрены на пяти шахтах: «Комсомолец Донбасса», «Днепровская», им. Героев космоса, им. Н.И. Сташкова, «Степная».

Выводы. Дана оценка взрывопожароопасности зарядных камер шахтных электровозных гаражей. При наличии вентиляции с кратностью воздухообмена более 3 ч^{-1} зарядную камеру можно отнести к категории В – пожароопасная.

Предложены меры противопожарной защиты камер, в том числе их оснащение автоматическими системами пожаротушения АСПШ.

Список литературы / References

1. Ференц А.Н. Категорирование аккумуляторных помещений по взрывопожарной опасности / А.Н. Ференц, Ю.Э. Павлюк [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ubgd.lviv.ua/moodle/pluginfile.php/14592/mod_folder/content/0/fer/5.pdf?forcedownload=1.

Ferenz, A.N. and Pavlyuk, Yu.E. *Kategorirovaniye akkumulyatornykh pomeshcheniy po vzyrvopozharnoy opasnosti* [Fire loading of battery rooms according to explosion-fire hazard]. Available at: http://ubgd.lviv.ua/module/pluginfile.php/14592/mod_folder/content/0/fer/5.pdf?forcedownload=1.

2. Ющенко Ю.Н. Параметры автоматических установок порошкового пожаротушения / Ю.Н. Ющенко, А.А. Король, И.Ф. Дикенштейн // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 139 – 148.

Yushchenko, Yu.N., Korol, A.A. and Dikenshteyn, I.F. (2012). *Parametry avtomaticheskikh ustanovok poroshkovogo pozharotusheniya* [Parameters of automatic dry powder fire-fighting installations]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 49, pp. 139 – 148.

3. Водород. Параметры горения и взрыва. – М.: Физмат ГИЗ, 2008. – 285 с.

FizmatGIZ (2008). *Vodorod. Parametry goreniya i vzryva* [Hydrogen. Combustion and explosion parameters]. Moscow, 285 p.

4. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан, И.Г. Шарнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев; под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Донецк: ООО «Юго-Восток», Лтд, 2001. – Т.2. – 439 с.

Dzyuban, V.S., Sharnin, I.G., Vaneyev, B.N. and Gostishchev, V.M. Vaneyev, B.N. (ed.) (2001). *Spravochnik enetgetika ugolnoy shakhty. V 2 t. Izd. 2-e* [Manual of the power engineering specialist of a coal mine. In 2 vol. 2nd ed.]. Donetsk, ООО Yugo-Vostok Ltd, vol. 2, 439 p.

5. Ткачук С.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С.П. Ткачук, В.П. Колосюк, С.А. Ихно. – Киев: Основа, 2000. – 696 с.

Tkachuk, S.P., Kolosyuk, V.P. and Ikhno, S.A. (2000). *Vzryvopozharobezopasnost gornogo oborudovaniya* [Explosion-fire safety of mining equipment]. Kiev, Osнова, 696 p.

6. Макеев В.И. Определение объема взрывоопасной смеси газов при категорировании производств / В.И. Макеев, В.Т. Монахов, В.Ф. Плешаков // Журн. ВХО им. Д.И. Менделеева. – 1982.-Т. 27, № 1. – С. 81 – 84.

Makeyev, V.I., Monakhov, V.T. and Pleshakov, V.F. (1982). *Opredeleniye ob'yema vzryvoopasnoy smesi gazov pri kategorirovanii proizvodstv* [Determination of volume of the explosion-hazardous mixture of gases by estimation of productions]. *Zhurnal VKhO im. D.I. Mendeleeva*, vol. 27, no. 1, pp. 81 – 84.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Г. Стариковой.
Дата поступления рукописи 30.06.2015

Purpose. Determination of the mass of hydrogen coming into a charging room of the mine electric locomotive garage, calculation of positive pressure of the hydrogen-air mixture explosion and substantiation of the category of such rooms according to the explosion and fire hazard.

Methodology. Information-analytical investigations, mathematical processing of the experimental data of other authors.

Results. The estimated dependence taking into account the concrete mine conditions is received to determine the positive pressure of the hydrogen-air mixture explosion in the charging rooms. The estimation of the explosion and fire hazard is given.

Practical value. The category of the explosion and fire hazard of the electric locomotive garages is substantiated, the fire protection measures are proposed, and the use of the automatic fire-fighting systems eliminating the fire at the early stage of its origin is grounded, what results in minimization of possible damages.

Keywords: electric locomotive garage, charging room, battery energy storage, hydrogen, hydrogen-air mixture, category, automatic fire-fighting installation.

УДК 622.647.2-418.2:614.841.411

А.А. Козлитин, нач. отд., В.В. Лебедева, ст. науч. сотр., И.Н. Непочатых, науч. сотр., О.В. Храпоненко, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

ТРЕБОВАНИЯ К ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ДЛЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

А.А. Kozlitin, head of department, V.V. Lebedeva, senior scientific associate, I.N. Nepochatykh, scientific associate, O.V. Khraponenko, scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

FIRE SAFETY REQUIREMENTS FOR CONVEYOR BELTS FOR COAL MINES

Цель. Изучить требования к показателям пожарной опасности шахтных конвейерных лент для создания безопасных условий их эксплуатации.

Методика. Информационно-аналитические исследования.

Результаты. Установлены требования к методам испытаний конвейерных лент по показателям пожарной опасности с учетом особенностей условий эксплуатации последних на предприятиях угольной промышленности Донбасса.

Научная новизна. В гармонизированных НИИГД «Респиратор» стандартах впервые в отечественной практике установлены классы безопасности конвейерных лент в зависимости от условий их применения и определены дифференцированные требования к показателям пожарной опасности.

Практическая значимость. Использование гармонизированных НИИГД «Респиратор» стандартов обеспечит соответствие методов испытаний конвейерных лент требованиям европейских и международных стандартов. Методы, установленные в новых стандартах, позволят обеспечить более безопасную работу предприятий угольной промышленности, снизить количество пожаров, связанных с конвейерными лентами.

Ключевые слова: конвейерная лента, пожарная опасность, методы испытаний, показатели пожарной опасности, стандарт, требования к показателям пожарной опасности.

Постановка проблемы. Анализ аварий на предприятиях угольной промышленности за период с 2008 по 2013 г. показывает, что в горных выработках шахт произошло 87 подземных пожаров, в том числе экзогенного происхождения 73 случая. Согласно статистическим данным в 2013 г. зафиксировано 9 экзогенных пожаров, что по сравнению с 2008 г. (16 пожаров) меньше на 7 случаев.

Несмотря на наметившуюся тенденцию к снижению, экзогенные пожары продолжают доминировать среди аварий различного рода.

Во всем многообразии применяемых в шахтах веществ, материалов и изделий особое место занимают конвейерные ленты разных типов, представляя реальный источник угрозы при подземных пожарах из-за значительной протяженности и наличия горючих материалов в их составе. Среди причин возникновения пожаров экзогенного характера количество пожаров, связанных с возгоранием конвейерной ленты, невелико. Однако аварии такого вида приводят к немалым экономическим, материальным ущербам, а самое главное,

представляют угрозу жизни и здоровью работников шахты и горноспасателей, так как при горении конвейерной ленты выделяется комплекс токсических веществ.

Например, ущерб от аварий, связанных с трением конвейерной ленты на шахте «Перевальская», равен 1036 тыс. грн, в шахтоуправлении «Суходольское-Восточное» 7653 тыс. грн.

Также типичными примерами крупных аварий, связанных с возгоранием конвейерной ленты в штреке, могут служить пожары на шахтах «Южнодонбасская № 1», где пострадало 38 человек, из них – 32 смертельно, и «Украина», где количество пострадавших 80 человек, из них 35 – со смертельным исходом.

Остается актуальной так называемая «регуляторная политика», связанная с контролем качества шахтных материалов и изделий, в том числе конвейерных лент разных типов, и направленная на снижение количества таких пожаров, повышение пожарной безопасности веществ, материалов и изделий, применяемых при подземных работах.

Анализ последних достижений. Действующие нормативные документы, регламентирующие допуск конвейерных лент к эксплуатации, устанавливают менее жесткие требования к пожаробезопасности конвейерных лент, чем соответствующие международные стандарты.

Цель работы – проведение сравнительного анализа требований к показателям пожарной опасности конвейерных лент для обеспечения безопасных условий их эксплуатации.

Материалы исследования. Шахтные конвейерные ленты не должны воспламеняться от воздействия внешнего высокотемпературного источника зажигания и распространять пламя по поверхности. Эти требования пожарной безопасности отражены в действующих зарубежных и отечественных нормативных документах, однако методы определения показателей пожароопасности и нормы их оценки различны.

За последнее время в НИИГД «Респиратор» гармонизированы стандарты по испытаниям шахтных конвейерных лент в зависимости от условий их эксплуатации, что позволило повысить требования к пожарной безопасности конвейерных лент для угольных шахт.

Метод испытания конвейерных лент с тканевой основой и основой со стальными тросами на воспламеняемость от источника пламени, газовой горелки, в лабораторных условиях установлен в ДСТУ ISO 340:2005 [1].

Метод испытания для определения способности конвейерной ленты к воспламеняемости при трении на барабане описан в ДСТУ EN 1554:2012 [2].

Требования к электрической и пожарной безопасности конвейерных лент, предназначенных для эксплуатации на подземных установках в огнеопасной или огнебезопасной среде, изложены в ДСТУ EN 14973:2012 [3].

Необходимо отметить, что именно в этом нормативном документе впервые в отечественной практике установлены классы безопасности конвейерных лент для подземных установок и определены дифференцированные требования к показателям пожарной опасности в зависимости от условий их применения (табл. 1).

Таблица 1

Перечень классов безопасности конвейерных лент для подземного использования и требования к показателям их пожарной опасности

| Класс * | Сфера применения | Трение на барабане EN 1554:1998, метод В2 | | Воспламеняемость (горючесть в пламени газовой горелки) EN ISO 340 | |
|---------|--|--|---------------------------------------|---|--|
| | | Свечение | Максимальная температура барабана, °С | Сумма времени самостоятельного горения шести испытуемых образцов, с | Максимальное время самостоятельного горения одного из шести испытуемых образцов, с |
| А | Общее применение в местах, где единственной опасностью являются ограничения доступа и средств защиты | Разрешено | Без ограничений | 45 | 15 |
| В1 | Как и для класса А плюс наличие потенциально воспламеняемой среды | Нет | 450 | 45 | 15 |
| В2 | То же | Разрешено | Без ограничений | 45 | 15 |
| С1 | Как и для класса В1 плюс наличие воспламеняемой пыли или транспортируемого материала | Нет | 325 | 18/30** | 10/15** |
| С2 | То же | Разрешено | Без ограничений | 45 | 15 |

* Классы В2 и С2 отличаются от классов В1 и С1 наличием в горных выработках вторичных защитных устройств, таких, как системы пожаротушения, пожарная сигнализация и т.д.
 ** Значения показателя воспламеняемости указаны для испытаний образцов конвейерных лент с обкладками и без обкладок соответственно

Основные физико-механические показатели конвейерных лент и требования к их пожаробезопасности приведены в стандарте ДСТУ 7306:2013 [4].

Этот стандарт распространяется на ленты конвейерные резиноканевые шахтные с резиноканевым каркасом и резиновыми обкладками, предназначенные для комплектации подземных конвейеров угольных шахт, поверхностных комплексов и конвейеров обогатительных фабрик.

Общие нормы и требования, методы определения показателей пожарной опасности веществ, материалов и изделий для угольных шахт, в том числе конвейерных лент, приведены в ГСТУ 12.11.402-97 [5]. Однако требования к показателям пожарной опасности конвейерных лент, изложенные в вышеуказанном отраслевом стандарте, уже не отвечают требованиям современных государственных, европейских и международных стандартов.

В табл. 2 приведена сравнительная характеристика требований к показателям пожарной опасности шахтных трудновоспламеняющихся резиноканевых конвейерных лент и шахтных трудногорючих резиноканевых конвейерных лент, приведенных в разных стандартах.

Таблица 2

Сравнительная характеристика требований к показателям пожарной опасности конвейерных лент

| Показатель | Требования в соответствии с | | | |
|--|--|---------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| | ДСТУ EN 14973 | ДСТУ 7603 | ГСТУ 12.11.402 | РД 03-423-01 [6] |
| Максимальное время горения одного образца из шести после удаления пламени, с, не более: <ul style="list-style-type: none"> • с обкладками • без обкладок | 15 15 | 15 15 | Не устанавливается | 15 Не устанавливается |
| Среднее время горения шести образцов после удаления пламени, с, не более: <ul style="list-style-type: none"> • с обкладками • без обкладок | 7,5 7,5 | 7,5 7,5 | Не устанавливается | 7,5 Не устанавливается |
| Температура поверхности барабана, °С, не более | 450 для лент класса В1*; 325 для лент класса С1** | 450 (для ШТВ); 325 (для ШТГ) | 300 | 500 |

Окончание табл. 2

| Показатель | Требования в соответствии с | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------|
| | ДСТУ EN 14973 | ДСТУ 7603 | ГСТУ 12.11.402 | РД 03-423-01 [6] |
| Кислородный индекс, %, не менее | Не устанавливает | 27 (для ШТВ); 30 (для ШТГ) | 27 | 30 |

В соответствии с документом [3]:

* лента класса В1 предназначена для использования там, где есть ограничение доступа и средств спасения, потенциально взрывоопасная среда и нет вторичных защитных устройств, например индикаторов сдвига, тепловых индикаторов, систем водяного пожаротушения;

** лента класса С1 предназначена для эксплуатации в условиях ограничения доступа и средств спасения, потенциально взрывоопасной среды, где есть другой горючий материал или пыль или они являются потенциальным дополнительным источником воспламенения и где нет вторичных защитных устройств.

Из табл. 2 видно, что в ГСТУ 12.11.402 требования к показателю пожарной опасности конвейерных лент «горючесть (воспламеняемость)» отсутствуют, а в нормативном документе РД 03-423 установлены требования к этому показателю при испытаниях образцов трудновоспламеняющихся конвейерных лент только с обкладками.

В отличие от нормативных документов [5-6], разработанные в НИИГД «Респиратор» государственные стандарты [3-4] устанавливают более полные дифференцированные требования к показателям пожароопасности для разных по категории горючести типов конвейерных лент (ШТВ и ШТГ) и в зависимости от условий их эксплуатации.

Особо стоит указать на гармонизированный НИИГД «Респиратор» стандарт ДСТУ EN 12881-1 «Ленты конвейерные. Испытания на воспламеняемость моделированием пожара. Часть 1. Испытания пропановой горелкой», который будет введен в действие в ближайшее время. В нем приведены три метода определения распространения пламени по поверхности конвейерной ленты. При проведении испытания по методу А берут образец конвейерной ленты длиной 2 м и подают пропан через горелку: $(1,30 \pm 0,05)$ кг в течение 10 мин. При проведении испытания по методу Б (испытание с использованием двойной горелки) берут образец конвейерной ленты длиной 2,5 м и подают пропан через две горелки, которые расположены выше и ниже каркаса испытываемого образца: $(1,30 \pm 0,05)$ кг в течение 10 мин для каждой горелки.

По методу В испытывают образец конвейерной ленты длиной 1,5 м, при этом подают пропан через горелку: (565 ± 10) г в течение 50 мин.

Внедрение методов определения распространения пламени по поверхности образца конвейерной ленты в соответствии с ДСТУ EN 12881-1 позволит исключить более дорогие и затратные испытания согласно

ГСТУ 12.11.402, так как вместо испытаний образца конвейерной ленты длиной 10 м будут использовать образец ленты длиной 1,5...2,5 м.

Методы А и В представлены и в российском РД 03-423 в виде методик:

- испытания конвейерных лент на горючесть мощным рассредоточенным по площади источником теплоты (пропановая решетка);
- испытаний на горючесть конвейерных лент в модельных (лабораторных) штольнях.

Действующие нормативные документы, которые регламентируют допуск конвейерных лент к использованию в угольных шахтах, не содержат метода испытаний в соответствии с ДСТУ EN 12881-1, поэтому гармонизация и внедрение этого стандарта актуальны и своевременны.

Выводы. Использование гармонизированных НИИГД «Респиратор» стандартов при сертификационных испытаниях конвейерных лент позволит обеспечить более безопасную работу предприятий угольной отрасли.

Кроме того, дифференцированные требования к показателям пожарной опасности в зависимости от условий эксплуатации разных типов конвейерных лент дадут потребителям предприятий угольной отрасли возможность выбора между дорогостоящими трудногорючими или более дешевыми трудновоспламеняющимися лентами.

На основании проведенного анализа требований к показателям пожарной опасности конвейерных лент для угольных шахт, изложенных в рассмотренных стандартах, можно рекомендовать использование методов испытаний конвейерных лент, отвечающих более жестким требованиям, в соответствии с ДСТУ EN 14973 и ДСТУ 7306, табл. 2, которые соответствуют европейским и международным нормам. Это даст возможность гарантировать использование в горных выработках более безопасных конвейерных лент и уменьшить количество подземных пожаров, связанных с ними.

Список литературы / References

1. Конвейерные ленты. Характеристики воспламеняемости лабораторные. Технические требования и метод испытаний (ISO 340:2004, IDT): ДСТУ ISO 340:2005.

State Standard of the Ukraine (ISO 340:2004, IDT) : ДСТУ ISO 340:2005. Conveyor belts. Laboratory scale flammability characteristics. Technical requirements and test method. (In Russian).

2. Ленты конвейерные. Испытания трением на барабане (EN 1554:1998, IDT): ДСТУ EN 1554:2012.

State Standard of the Ukraine (EN 1554:1998, IDT) : ДСТУ EN 1554:2012. Conveyor belts. [Drum friction testing](#). (In Russian).

3. Ленты конвейерные для подземных установок. Требования электрической и пожарной безопасности (EN 14973:2006 +A1:2008, IDT): ДСТУ EN 14973:2012.

State Standard of the Ukraine (EN 14973:2006 +A1:2008, IDT): ДСТУ EN 14973:2012. Conveyor belts for use in underground installations. Electrical and flammability safety requirements. (In Russian).

4. Ленты конвейерные резиноканевые шахтные. Общие технические условия: ДСТУ 7306:2013.

State Standard of the Ukraine ДСТУ 7306:2013. Mine rubber-and-canvas conveyor belts. General technical conditions. (In Ukrainian).

5. Вещества, материалы и изделия для угольных шахт. Методы определения пожарной опасности: ГСТУ 12.11.402-97.

State Standard of the Ukraine ДСТУ 12.11.402-97. Substances, materials and goods for coal mines. Methods of determination of the fire hazard. (In Russian).

6. Нормы безопасности на конвейерные ленты для опасных производственных объектов и методы испытаний: РД 03-423-01.

Safety Standards РД 03-423-01. Conveyor belts safety standards for hazardous manufacturing entities and test methods: РД 03-423-01. (In Russian).

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 08.06.2015*

Purpose. To study the requirements for fire hazard characteristics of the mine conveyor belts to create the safe conditions of their operation.

Methodology. Information-analytical investigations.

Results. The requirements for methods of testing the conveyor belts according to the fire hazard characteristics were established taking into account the peculiarities of the operating conditions of the lasts at the enterprises of the coal branch of the Donets Basin.

Scientific novelty. The safety classes of the conveyor belts in dependence on conditions of their use were ascertained for the first time in the practice of our country in the standards harmonized by the NIIGD “Respirator”, and the differentiated requirements for the fire hazard characteristics were determined.

Practical value. The application of the standards harmonized by the NIIGD “Respirator” will guarantee the compliance of the conveyor belt test methods with the requirements of the European and international standards. The methods ascertained in the new standards will allow guaranteeing the safer work of the enterprises of the coal branch, reducing the number of the fires being associated with the conveyor belts.

Keywords: conveyor belt, fire hazard, test methods, characteristics of the fire hazard, standard, requirements for fire hazard characteristics.

УДК [001.891.573:614.841.123.24]:[624.19:621.315.2]

*А.В. Осадчий, замнач. отд., А.Н. Прима, науч. сотр., Д.С. Буряк, науч. сотр.,
А.А. Диденко, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк*

ПРОЦЕСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В КАБЕЛЬНОМ ТУННЕЛЕ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА

*A.V. Osadchiy, deputy head of department, A.N. Prima, scientific associate, D.S. Buryak,
scientific associate, A.A. Didenko, scientific associate (NIIGD "Respirator", Donetsk)*

PROCESS OF PROPAGATION OF THE HEAT FLOW IN THE DUCT BY ORIGIN OF THE FIRE

Цель. Исследование процесса распространения теплоты в кабельном туннеле при пожаре.

Методика. Используются информационно-аналитические исследования. Сравнение их результатов с результатами экспериментов разных авторов.

Результаты. Построена математическая модель конвективно-диффузионного переноса теплоты при пожаре в кабельном туннеле.

Научная новизна. Разработанная математическая модель учитывает аэродинамические характеристики туннеля, соотношение между интенсивностью конвективного и диффузного переноса теплоты; долю теплоты, которая распространяется за счет теплообмена между воздухом и ограждающими конструкциями; теплофизические свойства ограждающих конструкций туннеля; отношение интенсивности конвективного теплообмена к интенсивности рассеивания теплоты в ограждающих конструкциях и динамику теплового источника.

Практическая значимость. Проведенными исследованиями обосновано применение автоматических систем пожаротушения в кабельных туннелях, практическая инерционность которых равна от 1 до 1,5 мин, при этом температура по длине кабельного туннеля – от 80 до 180 °С. Тушение происходит на ранней стадии возникновения пожара, что приводит к минимальному ущербу.

Ключевые слова: пожарная опасность, кабельная прокладка, высокие температуры, горючие газы, распространение горения, тепловая мощность пожара, конвективно-диффузионный перенос теплоты, моделирование температуры, математическая модель.

Постановка проблемы. Анализ статистических данных свидетельствует, что приблизительно 20 % от общего количества пожаров возникает от электротехнических изделий. Наиболее пожароопасной продукцией является кабельная, от которой возникает свыше 70 % общего количества пожаров от электротехнических изделий. Необходимо отметить, что за последние годы количество пожаров этой продукции выросло на 15 %. При этом материальный ущерб от таких пожаров возрос в 2,3 раза.

Высокий уровень пожарной опасности кабельной продукции обусловлен такими факторами:

- значительной пожарной нагрузкой кабельной продукции в связи с использованием в ее конструкции горючих полимерных материалов;
- значительной протяженностью кабелей, что способствует распространению пламени на значительное расстояние от места возникновения пожара;

- выделением дыма и токсичных продуктов во время горения в количестве, опасном для здоровья и жизни людей;
- коррозионной активностью продуктов горения.

Ущерб от возникновения пожаров в кабельных туннелях возрастает там, где нет ни пожарной сигнализации, ни средств пожаротушения. Напротив, при возникновении пожара в кабельном туннеле, который оборудован автоматическими системами пожаротушения, ущерб минимален, поскольку загорание ликвидируется в начальной стадии.

Большую роль в ликвидации пожара в кабельном туннеле, при использовании автоматических установок пожаротушения, играют как правильность расположения пожаротушащей установки и размещение пожарных извещателей, так и параметры самой установки.

Для обоснования параметров автоматической установки пожаротушения необходимо определение динамики распространения теплового потока в кабельных туннелях при возникновении пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. При разогревании участка кабельной прокладки до высоких температур горючие материалы в конструкции кабелей подвергаются пиролизу. Горючие газы, образовавшиеся в процессе пиролиза, сгорают с выделением теплоты, часть которой идет на разогревание и пиролиз близлежащей к источнику зажигания участка кабельной прокладки, которая вызывает дальнейшее распространение горения по длине кабелей.

Предложено процесс горения полимерных материалов, используемых в конструкциях кабелей, рассматривать с учетом перегретой жилы, которая также влияет на скорость реакции горения при развитии пожара. Это существенным образом может повлиять на расход огнетушащих веществ, используемых для тушения пожара.

Исследованы факторы, влияющие на скорость распространения пламени при горении электрического кабеля внутри вентиляционных каналов. Выявлено влияние слоя изоляции на скорость распространения пламени. Экспериментальные данные свидетельствуют о распределении температур внутри вентиляционного канала в зависимости от продолжительности действия газовой горелки, которая имитировала тепловой режим пожара.

В статье [1] дана оценка предельных характеристик пожарной опасности электрокабелей. На основе экспериментального изучения параметров процесса развития пожаров и использования методов математического моделирования процесса горения получены начальные параметры для прогнозирования возможной обстановки во время пожаров в кабельных коммуникациях.

В работе [2] предложена математическая модель, которая описывает тепловое состояние системы «короб-кабель» в условиях стандартного пожара кабельных трасс системы безопасности АЭС. Проведена идентификация параметров модели, позволившая сравнить расчетные значения температурных

полей с экспериментальными зависимостями температуры от времени в разных точках исследуемой системы.

Проведено исследование интенсивности тепловыделения при пожарах в туннелях метрополитена.

Цель работы – исследование процесса распространения теплоты в кабельном туннеле при пожаре.

Изложение основного материала. Для упрощения принимаем, что кабельный туннель (канал) имеет цилиндрическую форму.

Тепловая мощность пожара в кабельном туннеле зависит от пожарной нагрузки (масса и степень горючести оболочек кабелей), размеров туннеля (поперечное сечение и длина) и аэродинамических параметров вентиляционной сети.

Конвективно-диффузионный перенос теплоты моделируется уравнением вида

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + I_{\tau}, \quad (1)$$

где T – температура воздуха, К;

τ – текущее время с момента возникновения пожара, с;

x и r – пространственные координаты, м;

u – скорость воздушного потока (вентиляционной струи), м/с;

a – температуропроводность воздуха, м²/с;

I_{τ} – динамика температуры теплового источника, К/с.

Уравнение (1) дополняется уравнением теплопроводности ограждающих конструкций туннеля

$$\frac{\partial \bar{T}_M}{\partial \tau} = \bar{a}_M \left(\frac{\partial^2 \bar{T}_M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}_M}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}_M}{\partial x^2} \right), \quad (2)$$

где \bar{a}_M , \bar{T}_M – средняя температуропроводность и температура материала ограждающих пород, соответственно м²/с и К.

На стенке кабельного туннеля задаем граничные условия

$$\lambda_{\Pi} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \bar{\lambda}_M \frac{\partial \bar{T}_M}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (3)$$

где λ_{Π} – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$\bar{\lambda}_M$ – коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·К);

$R=2S/\Omega$ – гидравлический радиус потока воздуха, м;

S – площадь сечения туннеля, м²;

Ω – периметр сечения туннеля, м.

Температуру в формуле (1) заменяем средним значением по поперечному сечению $\bar{T} = \frac{2}{R^2} \int rTdr$, К, в результате получаем следующее выражение:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = a \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\lambda_T}{\rho c_p} \frac{2}{R^2} \left(r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) \Big|_0^R + \bar{I}_T, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

\bar{I}_T – среднее по сечению значение I_T , К/с.

Плотность и теплоемкость газовой среды в туннеле в уравнении (4) являются функциями пространственных координат и времени.

Согласно закону теплообмена Ньютона

$$\frac{\lambda_n}{\rho c_p} \frac{2}{R^2} \left(r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) \Big|_0^R = \frac{\alpha}{\rho c_p} \frac{\Omega}{S} \left(\bar{T} \Big|_{r=R} - \bar{T} \right) = \frac{\alpha}{\rho c_p} \frac{\Omega}{S} (T_\Omega - \bar{T}), \quad (5)$$

где $T_\Omega = T(x, R, \tau)$ – температура стенок туннеля, К;

α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м².

В начальный момент времени и при бесконечно больших значениях пространственных переменных температура

$$\bar{T} \Big|_{\tau=0} = T_M \Big|_{\tau=0} = \bar{T} \Big|_{x=\pm\infty} = T_M \Big|_{x=\pm\infty} = T_M \Big|_{r=\infty} = T_0, \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура воздуха, К.

Коэффициент конвективного теплообмена α может быть рассчитан по эмпирической формуле

$$\alpha = 2,9 \varepsilon u^{0,8} D^{-0,2}, \quad (7)$$

где ε – шероховатость стенок канала туннеля, м;

D – диаметр туннеля, м.

Принимаем, что объем очага пожара условно равен объему цилиндра с площадью основания $S_{\text{п}}$, м², равной площади поперечного сечения туннеля, и образующей l , м, которая равна продольному размеру источника, $V = Sl$, м³. Мощность источника теплоты распределена равномерно в этом объеме.

Мощность тепловыделения Θ , Вт, определяют скоростью выгорания горючих материалов m_{Γ} , кг/(м²·с), и расходом воздуха, поступающего в очаг пожара G_0 , кг/с. Для горения оболочек кабелей мощность рассчитывают следующим образом:

$$\Theta = \eta_{\text{М}} \left[1 - \left(1 - \frac{m_{\Gamma} F_{\Gamma}}{G_0} \right) \frac{C_{\text{O}_2 l}}{C_{\text{O}_2 0}} \right] C_{\text{O}_2 0} \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{в}0}} G_0, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{М}}$ – теплота сгорания единицы массы горючих материалов в очаге пожара; ориентировочное значение для сигнальных и силовых кабелей $\eta_{\text{М}} = 29,0$ МДж/кг;

F_{Γ} – площадь поверхности горючих материалов, м²;

$\mu_{\text{в}0}$ и μ_{O_2} – молекулярная масса воздуха, поступающего в очаг, и кислорода соответственно; принимают $\mu_{\text{в}0} = \mu_{\text{ПВ}} = 28,980$ кг/моль, $\mu_{\text{O}_2} = 31,999$ кг/моль;

$C_{\text{O}_2 0}$, $C_{\text{O}_2 l}$ – объемная доля кислорода в воздухе, поступающем в очаг и вытекающем из него (при нормальных условиях $C_{\text{O}_2 0} = 0,2095$).

Выражение $m_{\text{М}} = m_{\Gamma} F_{\Gamma}$, кг/с, – скорость выгорания массы вещества в ячейке пожара. В условиях пожара в кабельном туннеле поверхностью, которая горит, есть оболочки сигнальных и силовых кабелей. На протяжении всех периодов пожара: начальной стадии, стадии развития, стационарного горения и затухания – скорость выгорания материалов непрерывно изменяется в зависимости от множества факторов (теплофизических и химических свойств материалов, которые горят, распределения их массы в пределах ячейки пожара; динамики затраты воздуха и его составных; температуры, влажности и др.). Получить аналитическое выражение этой зависимости невозможно. Поэтому в дальнейших исследованиях для определения $m_{\text{М}}$ могут быть использованы известные эмпирические данные о скорости распространения фронта пламени пожара $\vartheta_{\text{оп}}$, м/с. Скорость выгорания в очаге пожара:

$$m_{\text{М}} = m_{\Gamma} F_{\Gamma} = m_{\text{ПН}} \vartheta_{\text{оп}}, \quad (9)$$

где $m_{\text{ПН}}$ – пожарная нагрузка, кг/м, например, оболочка сигнальных и силовых кабелей $m_{\text{ПН}} \approx 0,017 d_{\text{К}} + 1,07$, кг/м;

$\vartheta_{\text{оп}}$ – скорость распространения фронта пламени пожара, м/с;

$d_{\text{К}}$ – диаметр кабеля, м.

В результате мощность тепловыделения при горении материалов в очаге пожара может быть рассчитана по формуле

$$\Theta = \left[1 - (1 - \kappa_{\Gamma}) \bar{C}_{O_2} \right] \bar{\mu}_o \eta_M C_{O_2} G_0, \quad (10)$$

где $\kappa_{\Gamma} = \frac{m_{\text{шт}} \vartheta_{\text{оп}}}{G_0}$ – коэффициент скорости сгорания материалов в очаге;

$\bar{C}_{O_2} \approx \frac{C_{O_2 l}}{C_{O_2 0}}$ – относительное изменение объемной доли кислорода в очаге;

$\bar{\mu}_{O_2} = \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{B0}}$ – отношение молекулярного веса кислорода к молекулярному весу воздуха, $\bar{\mu}_{O_2} \approx 1,104$.

С учетом (10) среднее значение динамики температуры теплового источника равно:

$$I = \frac{\Theta}{\rho_0 c_p V}. \quad (11)$$

Для каждой из четырех стадий пожара: I – начальная, II – развитие, III – стационарная и IV – затухание, – указаны эмпирические зависимости мощности тепловыделения Θ_i , Вт, в виде кусочно-линейной функции:

$$\Theta = \begin{cases} \Theta_{\min}, & 0 < \tau \leq \tau_1; \\ \Theta_{\min} + (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) \frac{\tau - \tau_1}{\tau_2}, & \tau_1 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2; \\ \Theta_{\max}, & \tau_1 + \tau_2 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3; \\ \Theta_{\max} \left[1 - 0,0161(\tau - \tau_3) \right], & \tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \end{cases} \quad (12)$$

где $\Theta_{\min} = 1,63 \cdot 10^6 + 1,26 \cdot 10^5 G_0$ – тепловая мощность в начальный период, Вт;

$\Theta_{\max} = 2,62 \cdot 10^6 + 1,51 \cdot 10^5 G_0$ – тепловая мощность в стационарной период, Вт;

$$\tau_1 = 93,6 G_0^{-0,77}; \quad \tau_3 = \frac{1}{M_{\text{ср}}};$$

$M_{\text{ср}} = 8,94 G_0$ – средняя скорость выгорания оболочки кабелей в стационарный период пожара, кг/мин.

Время прохождения воздушного потока через очаг пожара τ_0 :

$$\tau_0 \approx \frac{l_{\text{п}}}{u_0}, \quad (13)$$

где τ_0 – время прохождения воздушного потока через очаг пожара, с;

$l_{\text{п}}$ – длина очага пожара, м;

u_0 – скорость воздушного потока, м/с.

Максимальный прирост температуры в очаге пожара $\Delta T_{\text{оп}}$, К, равен

$$\Delta T_{\text{оп}} = T^* - T_0 = \frac{\Theta_{\text{max}} \tau_0}{\rho_0 c_p V}, \quad (14)$$

где T^* – максимальная температура в очаге пожара, К.

Введем безразмерные значения времени

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}; \quad t = \frac{T - T_0}{\Delta T_{\text{оп}}}. \quad (15)$$

Уравнения (2) и (4) с учетом (5) примут вид

$$\frac{\partial t}{\partial \bar{\tau}} + G \frac{\partial t}{\partial \xi} = \frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} + \text{St}(t_{\Omega} - t) + f(\bar{\tau}); \quad (16)$$

$$\frac{\partial t_{\text{М}}}{\partial \bar{\tau}} = \bar{\text{Fu}} \left(\frac{\partial^2 t_{\text{М}}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial t_{\text{М}}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 t_{\text{М}}}{\partial \xi^2} \right). \quad (17)$$

Граничные условия

$$\left. \frac{\partial t_{\text{М}}}{\partial r} \right|_{r=0} = \text{Nu}(t_{\Omega} - t); \quad (18)$$

$$t \Big|_{\bar{\tau}=0} = t_{\text{М}} \Big|_{\bar{\tau}=0} = t \Big|_{\xi=\pm\infty} = t_{\text{М}} \Big|_{\bar{r}=0} = t_{\text{М}} \Big|_{\bar{r}=\pm\infty} = 0, \quad (19)$$

где $\text{Pe} = \frac{\rho_0 u_0 c_p l}{a} = \frac{G_0 c_p l}{\lambda S}$ – безразмерный комплекс, аналог критерия Пекле;

$\text{St} = \frac{\alpha_{\text{т}} \Omega l}{c_{\text{рв}} G_0}$ – безразмерный комплекс, аналог критерия Стантона;

$t_{\Omega} = \frac{T_{\text{ст}} - T_0}{\Delta T_{\text{оп}}}$ – относительное значение температуры стенок туннеля;

$$f(\bar{\tau}) = \frac{\bar{I}_T \tau_0}{T^* - T_0} = \frac{\Theta}{\Theta_{\max}}, \quad (20)$$

где $f(\bar{\tau})$ – функция теплового источника;
 $\bar{t} = (\bar{T} - T_0)/(T^* - T_0)$ – относительная температура массива;
 $\bar{r} = (r - R)/l$ – относительное расстояние от стенок в глубь ограждающих конструкций;
 $\bar{Fr} = \frac{\bar{a}\tau_0}{l^2}$ – безразмерный комплекс, аналог критерия Фурье;
 $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – безразмерный комплекс, аналог числа Нуссельта.

Система уравнений (16) и (17) с граничными условиями (18), (19) представляет собой математическую модель распространения теплоты в пространстве кабельного туннеля и ограждающих конструкций при пожаре.

Средняя тепловая мощность может быть аппроксимирована следующей зависимостью:

$$\bar{\Theta} = a\tau^b e^{c\tau}, \quad (21)$$

где $\bar{\Theta} = \Theta/\Theta_{\max}$ – средняя тепловая мощность пожара, Вт;
 a, b и c – константы, представленные в таблице.

Результаты аппроксимации динамики температуры в очаге пожара функцией $f = a\tau^b e^{c\tau}$

| Длина зоны поражения туннеля, м | Параметр функции | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------|---------|
| | a | b | c |
| 25 | $4,926 \cdot 10^{-7}$ | 5,9670 | -0,1947 |
| 50 | $8,671 \cdot 10^{-5}$ | 3,5120 | -0,0901 |
| 75 | $5,266 \cdot 10^{-4}$ | 2,6440 | -0,0560 |
| 100 | $1,262 \cdot 10^{-3}$ | 2,2213 | -0,0399 |

Проведено численное моделирование с использованием конечно-разностных схем.

Результаты моделирования предоставлены на рис. 1-2. Полученная динамика температуры воздуха соответствует результатам экспериментов: через 3 мин средняя в сечении туннеля температура воздуха достигает 673 К, после 7 мин 1073 К.

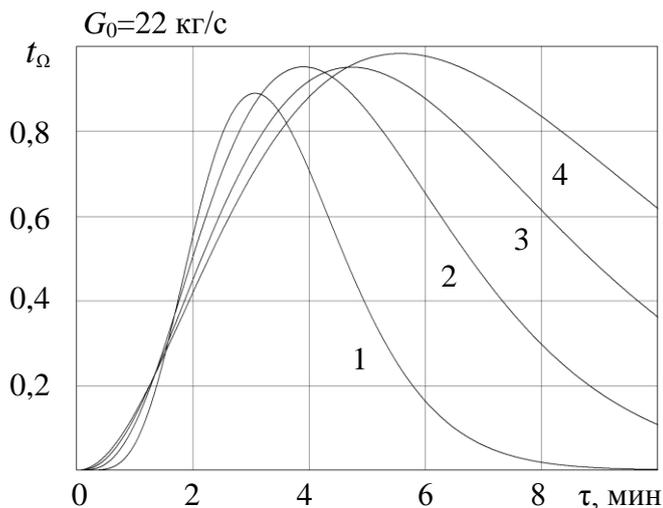


Рис. 1. Динамика относительной температуры в очаге пожара в зависимости от длины зоны поражения:
1 – 25 м; 2 – 50 м; 3 – 75 м; 4 – 100 м

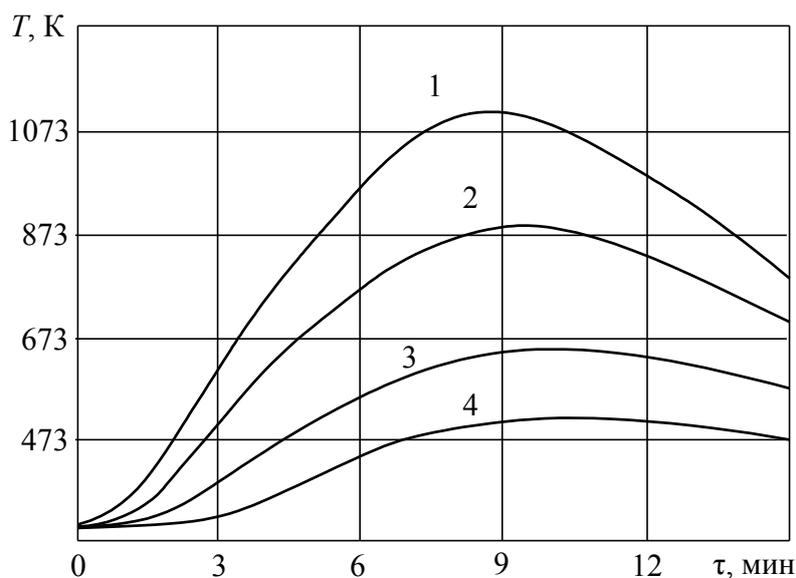


Рис. 2. Динамика температуры воздуха в зависимости от расстояния до очага пожара:
1 – в очаге пожара; 2 – 5 м; 3 – 10 м; 4 – 15 м

Выводы. Построена математическая модель конвективно-диффузионного переноса теплоты и дымовых газов в воздушных потоках кабельных туннелей при пожарах, которая учитывает аэродинамические характеристики туннеля; соотношение между интенсивностью конвективного и диффузного переноса теплоты; долю теплоты, которая распространяется за счет теплообмена между воздухом и ограждающими конструкциями; теплофизические свойства ограждающих конструкций туннеля; отношение интенсивности конвективного теплообмена к интенсивности рассеивания теплоты в ограждающих конструкциях и динамику теплового источника.

Созданная математическая модель позволяет осуществлять прогноз динамики температуры воздушных потоков (пожарных газов), исходящих из очага пожара, что облегчает проектирование автоматической системы пожаротушения в туннеле.

Список литературы / References

1. Тепловой анализ огнестойкости кабельной продукции проходки в условиях пожара / П.Г. Круковский, С.В. Новак, Е.С. Картавова, И.А. Харченко // Промышленная теплотехника. – 1998. – 20, № 5. – С. 5 – 9.

Krukovskiy, P.G., Novak, S.V., Kartavova, Ye.S. and Kharchenko, I.A. (1998). *Teplovoy analiz ognestoykosti kabel'noy produktsii prokhodki v usloviyakh pozhara* [Heat analysis of fire resistance of cable products of the tunneling under conditions of the fire]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, vol. 20, no. 5, pp. 5 – 9.

2. Круковский П.Г. Теплофизический анализ системы «короб-кабель» в условиях стандартного температурного решения по обеспечению их огнестойкости / П.Г. Круковский, А.Б. Рассамакин, А.С. Полубинский // Промышленная теплотехника. – 2004. – 26, № 5. – С.41 – 47.

Krukovskiy, P.G., Rassamakin, A.B., Polubinskiy, A.S. (2004). *Teplofizicheskiy analiz sistemy "korob-kabel'" v usloviyakh standartnogo temperaturnogo resheniya po obespecheniyu ikh ognestoykosti* [Thermalphysic analysis of the system "duct-cable" under conditions of the standard temperature solution to guarantee their fire resistance]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, vol. 26, no. 5, pp. 41 – 47.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.А. Чернышевым.
Дата поступления рукописи 28.04.2015

Purpose. Investigation of the process of propagation of the heat in the duct by the fire.

Methodology. The informational and analytical investigations are used. Comparison of their results with the results of the experiments of various authors.

Results. The mathematical model of the convective and diffusion heat transfer by the fire in the duct was drawn.

Scientific novelty. The mathematical model worked out takes into account aerodynamic characteristics of the tunnel; ratio between intensity of the convective and diffuse heat transfer; quota of the heat that propagates at the expense of heat exchange between air and envelope buildings; thermophysical properties of the envelope buildings of the tunnel; relation of intensity of the convective heat exchange to intensity of heat dissipation in the envelope buildings and dynamics of the heat source.

Practical value. In terms of the investigations carried out the use of the automatic fire-fighting systems in the ducts which practical sluggishness is equal to 1...1.5 min was substantiated; besides, the temperature along the duct is equal to 80... 180 °C. The fighting occurs at the early stage of origin of the fire, what results in minimal damage.

Keywords: fire hazard, duct laying, high temperatures, fire gases, propagation of the burning, heating capacity of the fire, convective and diffuse heat transfer, temperature modeling, mathematical model.

УДК 622.822.7:614.844.5

*А.А. Всякий, ст. науч. сотр., О.П. Пашковский, мл. науч. сотр.,
Д.Ф. Балта, инж.-конструктор 2-й кат. НИИГД «Респиратор», Донецк*

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОДАВЛЯЮЩЕГО ПЕНОГЕНЕРАТОРА

*A.A. Vsyakiy, senior scientific associate, O.P. Pashkovskiy, junior scientific associate,
D.F. Balta, development engineer of second category (NIIGD "Respirator", Donetsk)*

DESIGN PHILOSOPHY OF A HIGH-PRESSURE FOAM GENERATOR

Цель. Совершенствование установки мобильной пеногенераторной высокодавяющей УМПГВ, предназначенной для тушения и локализации пожаров в труднодоступных местах.

Методика. Проведены информационные и теоретические исследования существующей пеногенераторной техники, на основании которых выполнена научно-исследовательская опытно-конструкторская работа.

Результаты. Разработана конструкторская документация на опытный образец УМПГВ, который способен подавать пену на значительные расстояния по трубопроводам (скважинам) с малой площадью сечения.

Научная новизна. Для получения непрерывного потока пены и устранения противодействия в трубопроводе в конструкции пеногенератора применены обтекатель и связанная с ним пеногенераторная сетка, выполненные подвижными. Это обеспечивает орошение всей поверхности сетки, а перемещение обтекателя и перекрытие им проходного сечения горловины обеспечивают регулирование количества подаваемого на сетку газа, что позволяет получить непрерывный поток пены средней кратности из трубопровода (скважины).

Ключевые слова: пожар, пена, пеногенератор, насос с пневмоприводом, установка, опытный образец.

Постановка проблемы. Существующая пеногенераторная техника не всегда позволяет подавать пену на большие расстояния по трубам и скважинам с малой площадью сечения для локализации и тушения очагов пожара, а также заблаговременно проводить профилактические работы по предупреждению эндогенных пожаров в шахтах. Из-за образования пенной пробки в трубопроводах для подачи пены растет противодействие пеногенератору, что приводит к полному нарушению процесса пенообразования.

Цель работы. Создание УМПГВ, предназначенной для получения газомеханической пены и подачи её под давлением по пожарным рукавным линиям, трубопроводам и скважинам с малой площадью сечения на значительные расстояния для тушения и локализации пожаров в труднодоступных местах.

Материал исследований. Для решения данной задачи НИИГД «Респиратор» ранее выполнил информационный поиск и теоретические исследования существующей пеногенераторной техники [1 – 3] и современных мобильных насосов с пневмоприводом массой не более 30 кг, предназначенных для перекачивания водных растворов. На основании исследований разработан новый пеногенератор и выбран оптимальный образец современного мобильного насоса с пневмоприводом Alentec & Orion с соответствующими техническими характеристиками для применения на установке.

Для предотвращения противодействия в пеногенераторе уже известный пеногенератор [3], включающий в себя корпус, пакет пеногенераторных сеток и распылитель, оснастили обтекателем и тягами.

Пеногенератор (рис. 1) состоит из следующих основных частей: цилиндрического разъемного корпуса; распылителя, предназначенного для распыления и подачи на пакет пенообразующих сеток, водного раствора пенообразователя; регулирующего клапана, изменяющего количество подаваемого на пакет сеток сжатого газа в зависимости от сопротивления в нагнетательной сети; пружины; соединительной гайки.

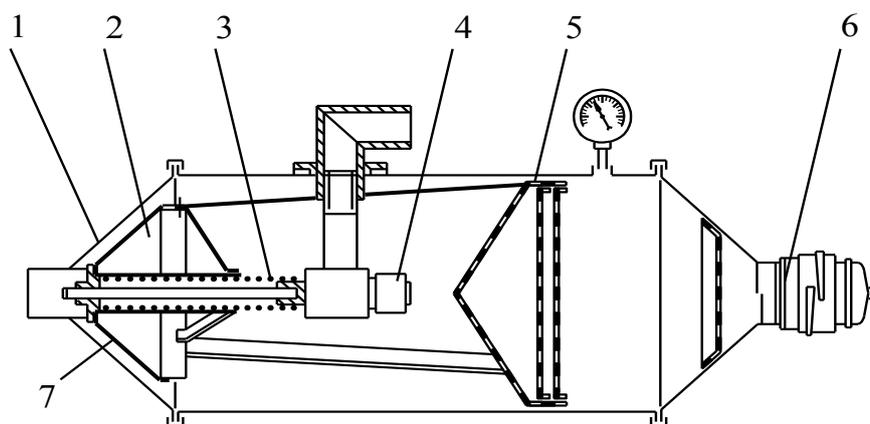


Рис. 1. Пеногенератор:

1 – корпус; 2 – клапан регулирующий; 3 – пружина; 4 – распылитель;
5 – пакет сеток; 6 – гайка соединительная; 7 – обтекатель с тягами

Регулирующий клапан в исходном состоянии находится в крайнем левом положении, закрывая полностью проходное сечение. При подаче сжатого газа в пеногенератор, в результате избыточного давления, создаваемого газовым потоком, регулирующий клапан перемещается, освобождая проходное сечение корпуса и одновременно сжимая пружину. Вследствие подачи сжатого газа и водного раствора пенообразователя на пакет сеток происходит смачивание ячеек сеток и выдувание из них пузырьков (образование пены).

Полученная на первой сетке пена продавливается через последующие сетки, что позволяет увеличить удельную поверхность пузырьков и улучшить качество пенного потока. Процесс продолжается до наступления установившегося режима пенообразования. При нарушении установившегося режима пенообразования, по мере роста длины пенного потока, избыточное давление перед пакетом сеток снижается и пружиной клапан перемещается, перекрывая проходное сечение и ограничивая подачу сжатого газа к пакету сеток.

Благодаря такому техническому решению при изменении противодействия пенного потока в трубопроводе перемещается обтекатель и связанная с ним пеногенераторная сетка. В результате этого за счет приближения или удаления пеногенераторной сетки от распылителя при

изменении угла распыления пенообразующего раствора обеспечивается орошение всей поверхности сетки, а перемещение обтекателя и перекрытие им проходного сечения горловины обеспечивает регулирование количества подаваемого на сетку газа. Все это вместе позволяет получить непрерывный поток пены.

На основании разработанного пеногенератора и выбранного насоса с пневмоприводом НИИГД «Респиратор» создал опытный образец УМПГВ для локализации и тушения пожаров в труднодоступных местах, которая имеет по сравнению с уже существующей пеногенераторной техникой меньшие габариты и массу. Установка позволяет получать газомеханическую (воздушную и инертную) пену средней кратности (от 21 до 50) и подавать её под давлением по пожарным рукавным линиям, трубопроводам и скважинам с малой площадью сечения (50...100 мм). Дальность подачи пены по горизонтали – до 500 м и по вертикали – на высоту до 30 м с расстояния до 250 м.

Установка (рис. 2) работает следующим образом: от пневмосети (компрессорной установки) сжатый воздух через регулируемую задвижку, воздухораспределитель, фильтр, высоконапорный шланг 5, кран, блок подготовки сжатого воздуха, шланг 9 поступает к пневмоприводу насоса.

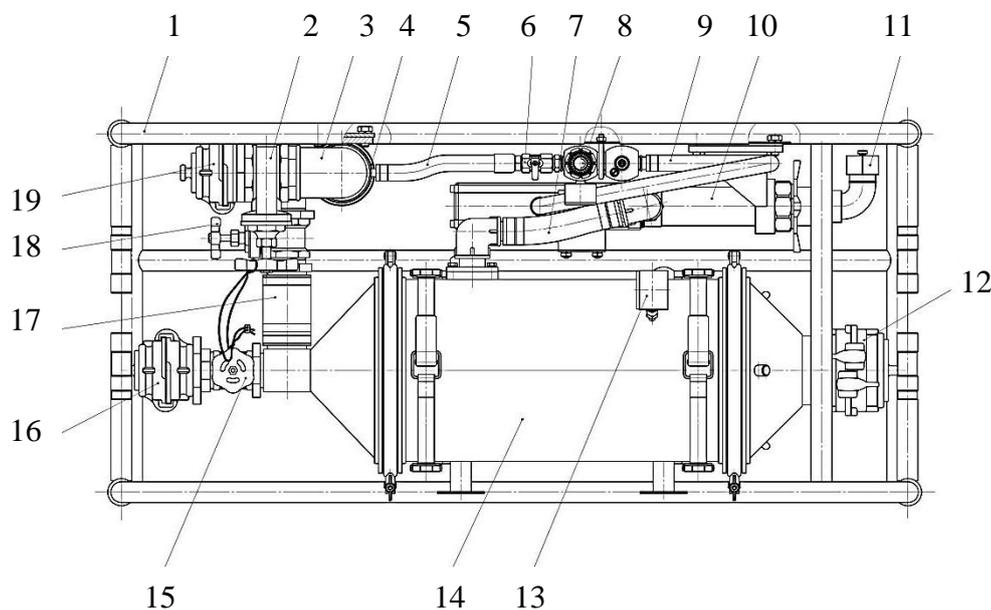


Рис. 2. Схема опытного образца УМПГВ:

- 1 – рама; 2, 15, 18 – регулирующие задвижки, 3 – воздухораспределитель; 4 – фильтр;
 5, 9 – высоконапорные шланги; 6 – кран; 7, 17 – резиновые рукава; 8 – блок для
 подготовки сжатого воздуха; 10 – насос с пневмоприводом; 11 – заглушка;
 12, 16, 19 – соединительные головки; 13 – манометр; 14 – пеногенератор высоконапорный

Пневмонасосом водный раствор пенообразователя по рукаву, предназначенному для всасывания этого раствора, и резиновому рукаву 7 подают к распылителю пеногенератора, через который распыляют на пакет

сеток. Сквозь них продувают воздух, который поступает от воздухораспределителя и фильтра к регулирующей задвижке 18, в резиновый рукав 17 и пеногенератор. Полученную в пеногенераторе воздушно-механическую пену по пожарным рукавным линиям, трубопроводам и скважинам подают к очагу пожара.

Для получения инертной пены на пеногенератор через соединительную гайку 16 подают инертный газ, при этом регулирующая задвижка 18 должна быть закрыта, количество газа регулирует задвижка 15.

Параметры опытного образца УМПГВ

| | |
|--|------------|
| Производительность, м ³ /мин | 0,3...1,05 |
| Расход водного раствора пенообразователя, л/мин | 15...21 |
| Расход сжатого воздуха, м ³ /мин, не менее: | |
| на пеногенератор | 4,0 |
| на пневмопривод | 0,5 |
| Давление, МПа: | |
| сжатого воздуха | 0,55±0,05 |
| сжатого инертного газа | 0,20±0,03 |
| Массовая доля пенообразователя в воде, % | 5±1 |
| Габариты, мм, не более: | |
| длина | 1100 |
| ширина | 550 |
| высота | 450 |
| Масса, кг, не более | 75 |

Установка предназначена для применения:

- на промышленных и гражданских объектах с использованием передвижной компрессорной установки и обеспечением водой для приготовления водного раствора пенообразователя;
- в подземных горных выработках угольных шахт, оборудованных трубопроводами со сжатым воздухом и противопожарным трубопроводом (с возможностью отбора воды).

Выводы. Отличительной особенностью УМПГВ по сравнению с существующей пеногенераторной техникой является способность подавать пену под давлением по трубопроводам (скважинам) с малой площадью сечения на значительное расстояние, а также её небольшие масса и габариты, которые получены за счёт применения современного насоса с пневмоприводом для перекачивания жидкости.

Для устранения противодействия пенного потока в трубопроводе в конструкции пеногенератора обтекатель и связанная с ним пеногенераторная сетка выполнены подвижными. Это обеспечивает орошение всей поверхности сетки, а перемещение обтекателя и перекрытие им проходного сечения

горловины регулируют объем подаваемого на сетку газа, что позволяет получить непрерывный поток пены средней кратности из трубопровода (скважины).

Внедрение установки в подразделениях МЧС будет способствовать повышению эффективности ликвидации пожаров в труднодоступных местах, а на угледобывающих предприятиях применение установки для предупреждения и профилактики самовозгорания угля позволит снизить количество эндогенных пожаров.

Список литературы / References

1. Попов Э.А. Конструктивные особенности пеногенератора высоконапорного трубного / Э.А. Попов, Д.И. Момот // Уголь Украины. – 2010. – № 11. – С. 37 – 39.

Popov, E.A. and Momot, D.I. (2010). *Konstruktivnyye osobennosti penogeneratora vysokonapornogo trubnogo* [Design philosophy of the high-pressure piped foam generator]. *Ugol Ukrainy*, no. 11, pp. 37 – 39.

2. Пеногенераторная высоконапорная установка / В.П. Засевский, С.Я. Мерайс, Л.Д. Вишневецкий, В.И. Нетреба // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1992. – С. 112 – 115.

Zasevskiy, V.P., Merays, S. Ya., Vishnevskiy, L.D. and Netreba, V.I. (1992). *Penogeneratornaya vysokonapornaya ustanovka* [High-pressure foam-generating installation]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 112 – 115.

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

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

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 20.07.2015

Purpose. Improvement of the УМПГВ mobile foam generating high-pressure installation intending to fight and localize the fires in places difficult of access.

Methodology. The information and theoretical investigations of the existing foam generating equipment on which basis the research preproduction work is realized were carried out.

Results. The design documentation for the prototype of the УМПГВ installation capable of piping the foam (or its feeding along the holes) with the small sectional area at considerable distances is worked out.

Scientific novelty. To generate the continuous foam flow and to eliminate the backup pressure in a pipeline a fairing and a foam generating net connected with it are used in the structure of the foam generator, they are performed movable. This guarantees spraying the whole surface of the net, and movement of the fairing and overshooting of the flow section of the mouth with it ensure regulation of the gas amount being fed to the net, what allows generating the continuous flow of the foam with the average expansion ratio from the pipeline (hole).

Keywords: fire, foam, foam generator, pump with air-powered drive, installation, prototype.

УДК 614.845.2

*Д.Ф. Балта, инж.-конструктор 2-й кат. НИИГД «Респиратор», Донецк***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕНОСНОГО ОГNETУШИТЕЛЯ***D.F. Balta, development engineer of second category (NIIGD “Respirator”, Donetsk)***INCREASE OF EFFECTIVENESS OF A PORTABLE FIRE EXTINGUISHER**

Цель. Обоснование выбора конструктивного исполнения переносного огнетушителя с массой заряда огнетушащего вещества 2 кг.

Методика. Испытания опытных образцов огнетушителя.

Результаты. Подтверждено соответствие основных параметров экспериментальных образцов огнетушителя общим техническим требованиям, обеспечен стабильный и эффективный процесс истечения огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя в ходе приведения его в действие и применения независимо от пространственной ориентации.

Научная новизна. Создана универсальная конструкция переносного огнетушителя с массой заряда огнетушащего вещества 2 кг. Такой огнетушитель способен работать во всех пространственных положениях.

Практическая значимость. Применение огнетушителя для тушения пожаров на промышленных и гражданских объектах, в бытовых условиях, в транспортных средствах.

Ключевые слова: огнетушитель, пространственное положение, работоспособность, экспериментальный образец, испытания.

Постановка проблемы. Переносные огнетушители с массой заряда огнетушащего вещества до 3 кг широко используют в качестве универсальных первичных средств пожаротушения. Существующие огнетушители не оснащают гибким шлангом, так как объем их заряда – менее 3 л и работают эти огнетушители лишь в вертикальном положении, когда продольная ось цилиндра совпадает с продольной осью запорно-пусковой головки, при этом во время тушения очага пожара допустимо отклонение до 15° от этого положения (рис. 1) [1]. Дальнейшее увеличение наклона корпуса огнетушителя приводит к увеличению остатка заряда огнетушащего вещества после его выброса.

Таким образом, пространственное положение огнетушителей известных конструкций в ходе приведения их в действие и применения весьма ограничено. В реальных же условиях очаги пожара могут возникнуть в местах, труднодоступных для подачи огнетушащих веществ, доставляемых огнетушителями таких конструкций, поэтому образуются многочисленные «теневые» зоны и борьба с возгоранием ограничивается лишь его локализацией.

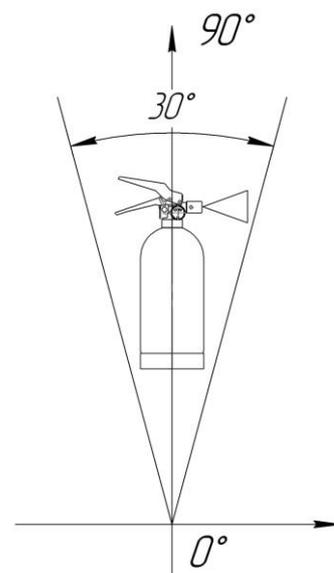


Рис. 1. Рабочее положение серийно выпускаемых огнетушителей

В связи с этим СКБ НИИГД «Респиратор» разработало переносные огнетушители с массой заряда огнетушащего вещества 2 кг в нескольких конструктивных исполнениях, способные выдавать струю огнетушащего вещества из любого пространственного положения.

Цель работы – обоснование выбора конструктивного исполнения переносного огнетушителя с массой заряда огнетушащего вещества 2 кг; анализ результатов испытаний экспериментальных образцов огнетушителей, проверка работоспособности во всех положениях и подтверждение способности огнетушителей сохранять в установленных пределах значения параметров, заданных общими техническими требованиями (табл. 1).

Таблица 1

Общие технические требования, предъявляемые к огнетушителям

| Параметр | Норма |
|--|---|
| Объем заряда огнетушащего вещества, дм ³ | 2 |
| Продолжительность приведения огнетушителя в действие, с, не более | 6 |
| Продолжительность подачи огнетушащего вещества минимальная, с, не менее | 6 |
| Длина струи огнетушащего вещества минимальная, м, не менее | 2 |
| Остаток заряда огнетушителя после его разрядки, % от номинального значения, не более | 10 |
| Рабочее давление в корпусе огнетушителя при температуре 293 К (плюс 20 °С), МПа | 1,5±0,15 |
| Рабочее положение огнетушителя | Вертикальное, угол наклона корпуса – не более 15° |

Изложение материала исследования. Для испытания представлены экспериментальные образцы огнетушителей в трех исполнениях, которые отличаются системой подачи огнетушащего вещества. Огнетушители снаряжены в соответствии с техническими требованиями и готовы к применению [2]. В качестве заряда использован 6 %-й универсальный синтетический пленкообразующий спиртоустойчивый пенообразователь S.F.P.M. фирмы EAU et FEUSA (Франция).

Испытания проводили на открытом воздухе при температуре (20±5) °С и скорости ветра, не превышающей 2 м/с, при отсутствии осадков (рис. 2).

Проведена серия испытаний. Она включала три опыта – каждый из экспериментальных образцов огнетушителя проверяли на работоспособность в трех взаимно перпендикулярных направлениях – вертикальном, горизонтальном и вертикальном с запорно-пусковым устройством, ориентированным вниз.

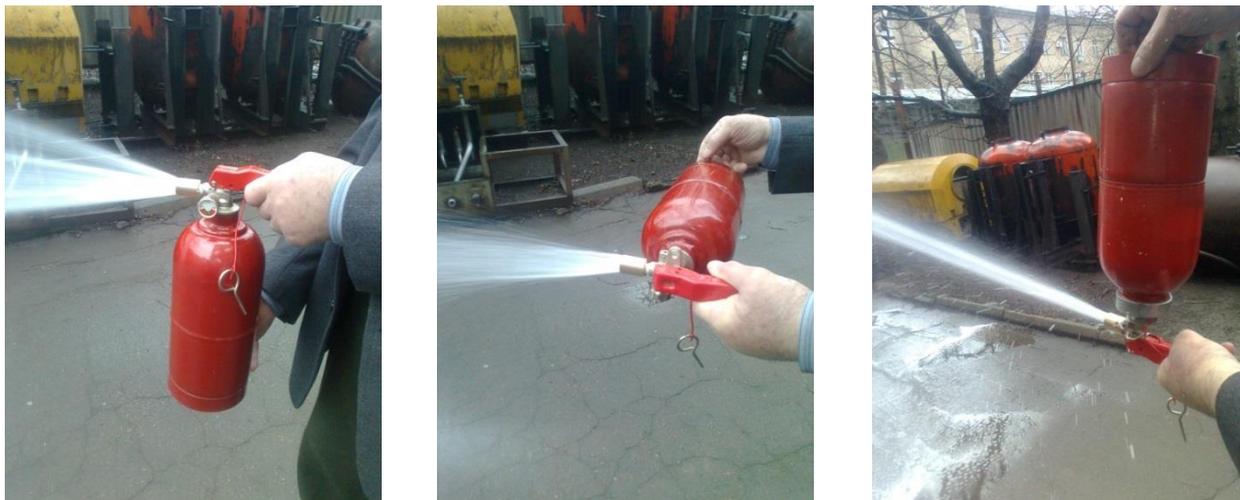


Рис. 2. Работа экспериментальных образцов огнетушителей, ориентированных в трех взаимно перпендикулярных направлениях

Выпуск огнетушащего вещества из корпуса огнетушителя производили непрерывной струей при полностью открытом запорно-пусковом устройстве. Во время испытаний фиксировали продолжительность подачи огнетушащего вещества, длину струи, отмечали характер ее выброса, особенности формы и состояния [3].

На основании данных, полученных в результате серии испытаний (табл. 2), можно сделать следующие выводы:

- все образцы огнетушителей имеют простую конструкцию, позволяющую незамедлительно приступить к тушению очага пожара (3 с) и сократить время, требуемое для быстрого применения. При этом их эксплуатация не требует от оператора определенных навыков и соответствующей квалификации;

- длина струи и продолжительность подачи огнетушащего вещества из насадки-распылителя огнетушителя при непрерывной его работе соответствуют значениям параметров, заданных общими техническими требованиями. При этом показали повышенные значения образцы в исполнении I и III. Характер выброса, особенности формы и состояние струи огнетушащего вещества во всех исполнениях наблюдались однородные, равномерные, монотонно убывающие к периферии, симметричные относительно оси;

- испытания по определению остатка заряда огнетушащего вещества прошли огнетушители в I и III исполнениях. Конструкция в исполнении II показала результат, превышающий допустимое значение на 10 %, и не прошла испытания;

- из трех представленных к испытаниям образцов огнетушители в III исполнении подтвердили свою работоспособность в трех взаимно перпендикулярных положениях, конструкция в исполнении I позволила разрядить огнетушитель лишь в вертикальном и горизонтальном положениях корпуса (рис. 3).

Таблица 2

Результаты, полученные в ходе проведения испытаний огнетушителей

| Контролируемый параметр | Огнетушители | | |
|---|--------------|---------------|----------------|
| | Исполнение I | Исполнение II | Исполнение III |
| Продолжительность подачи огнетушащего вещества минимальная, с, не менее | 17 | 8 | 20 |
| Длина струи огнетушащего вещества минимальная, м, не менее | 7 | 6 | 7 |
| Остаток заряда огнетушителя после его разрядки, % от номинального значения, не более | 3-5 | 20 | 0,5 |
| Рабочее давление в корпусе огнетушителя при температуре 293 К (плюс 20 °С), МПа | 1,5±0,15 | | |
| Рабочее положение огнетушителя: <ul style="list-style-type: none"> • вертикальное • горизонтальное • вертикальное, запорно-пусковым устройством вниз | + + - | + + + | + + + |

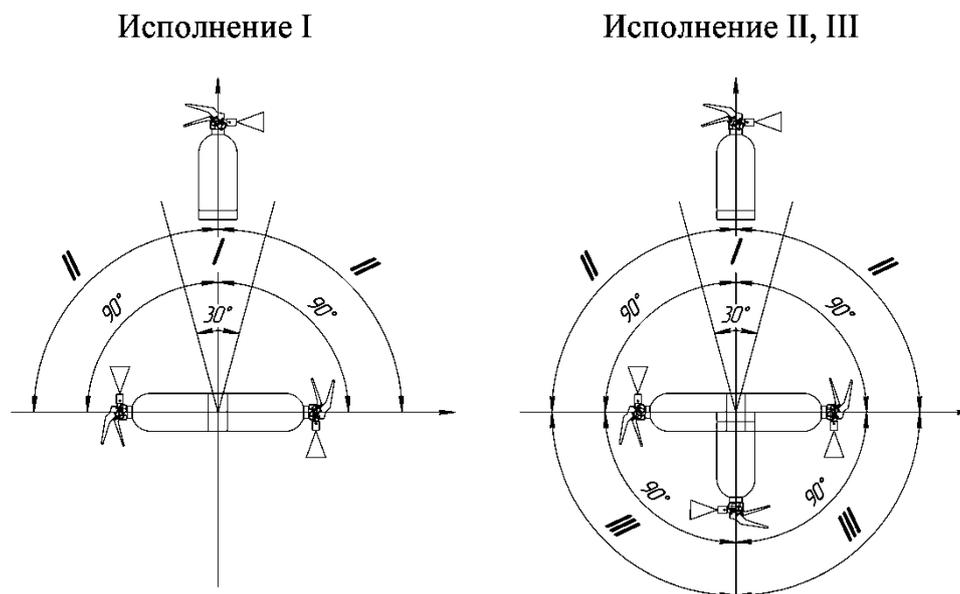


Рис. 3. Диаграмма рабочих положений экспериментальных образцов огнетушителей

Выводы. Результаты испытаний показали, что лучшая конструкция огнетушителя в III исполнении. В нем соответствие основных параметров общим техническим требованиям, а процесс истечения огнетушащего вещества в ходе приведения в действие и применения огнетушителя проходил стабильно

и эффективно независимо от пространственной ориентации корпуса. Огнетушитель во II исполнении, несмотря на способность работать во всех положениях, показал отрицательные результаты и не прошел испытания – продолжительность подачи огнетушащего вещества была минимальной, а остаток заряда после разрядки огнетушителя превышал допустимые значения согласно табл. 1. Экспериментальный образец в I исполнении прошел испытания с положительным результатом, хотя смог обеспечить эффективную работу лишь в двух положениях – вертикальном (с запорно-пусковой головкой вверх) и горизонтальном.

Таким образом, перспективной считается дальнейшая работа с огнетушителем в III исполнении, проведение предварительных испытаний и его серийное изготовление.

Список литературы / References

1. Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации: НПБ 166-97.

Pozharnaya tekhnika. Ognetchushiteli. Trebovaniya k ekspluatatsii: НПБ 166-97 [Fire engineering. Fire extinguishers. Operation requirements: НПБ 166-97].

2. Карпов А.П. Огнетушители. Устройство, испытания, выбор, применение, техническое обслуживание и перезарядка / А.П. Карпов. – М.: ВНИИПО, 2003. – 267с.

Карпов, А.П. (2003). *Ognetchushiteli. Ustroystvo, ispytaniya, vybor, primeneniye, tekhnicheskoye obsluzhivaniye i perezaryadka* [Fire extinguishers. Structure, testing, choice, application, technical maintenance and overcharge]. Moscow, VNIPO, 267 p.

3. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

Pazhi, D.G. and Galustov, V.S. (1984). *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey* [Foundations of the liquids atomization technology]. Moscow, Khimiya, 256 p.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 06.07.2015*

Purpose. Substantiation of choice of embodiment of the portable fire extinguisher with the charge weight of the fire-fighting substance of 2 kg.

Methodology. Testing of prototypes of the fire extinguisher.

Results. The conformity of the principal parameters of the experimental examples of the fire extinguisher with general technical requirements is verified, the stable and effective process of outflow of the fire-fighting substance out of the fire extinguisher body in the course of its putting into effect and use irrespective of the spatial orientation is ensured.

Scientific novelty. The universal construction of the portable fire extinguisher with the charge weight of the fire-fighting substance of 2 kg was worked out. Such fire-extinguisher is capable of operating in all spatial positions.

Practical value. Application of the fire extinguisher to fight the fires at industrial and civil objects, under conditions of life, in transport facilities.

Keywords: fire extinguisher, spatial position, operability, experimental example, determinative tests.

III. Горноспасательное дело

УДК 622.822.225

*П.С. Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по науч. работе,
С.П. Греков, д-р техн. наук, замнач. отд., В.П. Орликова, науч. сотр.,
А.А. Всякий, ст. науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк*

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕЙ

*P.S. Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director for science, S.P. Grekov,
Dr. Sci. (Tech.), deputy head of department, V.P. Orlikova, scientific associate,
A.A. Vsyakiy, senior scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF LOW-TEMPERATURE OXIDATION OF COALS

Цель. Получить зависимости для описания динамики параметров процессов окисления углей, развития температуры в их скоплениях и определить инкубационный период самовозгорания угля.

Методика. Основана на математической модели гетерогенного процесса адсорбции кислорода с реакцией окисления первого порядка и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор».

Результаты. Обобщены данные по определению удельных реакционных поверхностей образцов углей различной степени углефикации и по изучению их пористости, получена зависимость удельной реакционной поверхности от концентрации горючих. Найдена связь удельной реакционной поверхности различных углей от среднеобъемной концентрации в них углерода. Прослежено изменение параметров окисления углей во времени по мере развития процесса их нагревания и теплоотвода от скопления. Показана возможность использования средних значений параметров описания для практических расчетов.

Научная новизна. Теоретически с использованием значительного количества экспериментальных исследований описана динамика параметров низкотемпературного окисления углей.

Практическая значимость. Полученные зависимости подтверждают возможность использования средних значений параметров окисления для расчета инкубационного периода самовозгорания углей.

Ключевые слова: самовозгорание, реакционная поверхность, скорость тепловыделения, температура, окисление, уголь.

Состояние вопроса. Самовозгорание угля – это процесс, связанный с условиями накопления и рассеивания теплоты в его скоплении. В обширной литературе по эндогенному возгоранию материалов, начиная с работ В.С. Веселовского, А.С. Скочинского, В.Ф. Орешко в 60-х годах прошлого столетия, сформулированы условия, приводящие к возрастанию их температуры и самонагреванию. Приведены выражения для определения критической толщины угольного скопления [1], пожароопасной скорости фильтрации воздуха, инкубационного периода самовозгорания [2].

Авторы отмечают сложность математического описания происходящих процессов самонагревания материалов и приводят упрощения, позволяющие получать приемлемые для практики результаты. Каждое новое исследование

в этой области позволяет уточнить и конкретизировать достигнутые результаты и полнее вникнуть в сущность происходящих процессов.

Установлено, что скорость окисления углей в скоплении, приводящая в определенных условиях к его самовозгоранию, зависит от концентрации кислорода в угле [3], скорости тепловыделения [4] и площади реагирующей поверхности [5]. Чем больше эта поверхность, тем выше скорость окисления.

На основании математического описания неизотермической хемосорбции газов микропористыми сорбентами [6] получено решение задачи для определения объемной доли поглощенного углем кислорода, которая соответствует доле поверхности угля, вступившей в реакцию окисления, с учетом процесса выделения метана. Для расчета объемной доли поглощенного углем кислорода использованы данные определения склонности углей к самовозгоранию. По результатам исследования скорости образования поверхностного комплексного соединения во времени найдено, что при $t = 300$ ч параметр достигает минимального значения, после которого начинается постепенное увеличение процесса окисления. Аналогичные результаты получены для всех анализируемых углей. Сделано предположение, что параметр, характеризующий реакцию поверхности угля, зависит от его внутренних свойств: петрографического состава, степени метаморфизма, скорости реакции окисления, энергии активации. Найдены эмпирические зависимости, позволяющие определять константы скорости выделения метана и образования поверхностного комплексного соединения с учетом влияния перечисленных свойств угля.

Проведенные исследования позволили на основании данных об инкубационном периоде самовозгорания углей и средних значений снижения реакционной поверхности за этот период времени получить сведения о константах скорости образования поверхностного комплексного соединения ν и скорости выделения метана μ , а также найти выражения для их вычисления, зависящие от параметров угля. Это позволяет ставить вопрос о расчетах изменения реакционной поверхности во времени и, следовательно, рассчитывать динамику температуры скопления угля.

Цель настоящей работы – установить зависимость для описания динамики параметров процессов окисления угля, развития температуры в его скоплении и определения инкубационного периода самовозгорания на основании ранее проведенных исследований по изучению скоростей образования поверхностного комплексного соединения и выделения из угля метана, а также полученных экспериментальных данных об удельной реакционной поверхности различных образцов углей.

Материалы и результаты исследования. Примем, что изменение температуры скопления угля – это результат тепловыделения, которое зависит от концентрации кислорода в угле a_{O_2} , удельной реакционной поверхности $S_{уд}$, скорости тепловыделения и теплоотвода. Концентрация кислорода в угле является функцией концентрации его в межкусковом пространстве и фильтрационных свойств угля. Реакционная поверхность зависит также от внутренних свойств угля, определяемых его петрографическими характеристиками – плотностью, пористостью, наличием минеральных примесей и др.

Удельная реакционная поверхность углей $S_{уд}$ и ее связь с фракционным составом изучалась автором [5] на углях разной степени углефикации в лабораторных условиях хроматографическим методом. В различных опытах уголь был измельчен до 0,1...3,5 мм и дегазирован. Поэтому найденная автором удельная реакционная поверхность является максимально возможной для процессов окисления.

Вместе с тем при гетерогенных процессах реакционная поверхность подвергается непрерывному изменению в связи с тем, что происходит образование и распад поверхностных соединений при адсорбции кислорода, внутреннее реагирование при проникновении кислорода в глубь частиц угля и образование вблизи поверхности частиц твердых продуктов реакции (золы). На изменение реакционной поверхности влияют также метановыделение и испарение влаги.

Так как удельная реакционная поверхность является частью внешней поверхности угольных частиц и внутренней поверхности пор угля, попытаемся с целью объединения полученных автором [5] результатов связать ее с фильтрационной пористостью углей и степенью их углефикации.

Попытка связать пористость с удельной поверхностью и степенью метаморфизма (табл. 1) в виде зависимости $V_{ф}/S_{уд} = f(V^r)$ представлена на рис. 1.

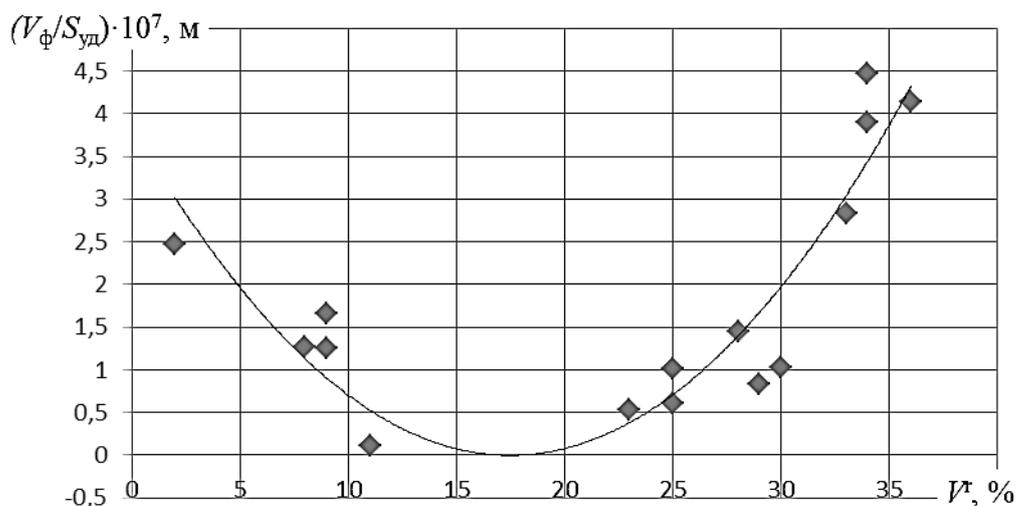


Рис. 1. Зависимость отношения фильтрационной пористости к удельной реакционной поверхности от массовой доли летучих веществ угля

Как следует из анализа полученных результатов, представленных на рис. 1, несмотря на разброс экспериментальных данных, значения отношений фильтрационного объема к удельной реакционной поверхности укладываются в некоторую область, в которой прослеживается четкая их связь с концентрацией горючих. При этом, как и у данных о фильтрационном объеме углей, минимум значений $V_{ф}/S_{уд}$ приходится на угли средней степени углефикации с увеличением в сторону больших и меньших ее значений. Усредненная по всем опытам кривая получена в виде

Таблица 1

Физико-механические и кинетические параметры исследуемых углей

| Шахта | Пласт | Доля летучих веществ V^r , % | Газоносность l_0 , M^3/T | Плотность ρ , KT/M^3 | Концентрация углерода в угле a_{C^*} , моль/ M^3 | Отношение фильтративного объема к удельной площади $(V_{\Phi} / S_{уд}) \cdot 10^7$, M | Температура $T_0 / T_{кр}$, K | Константа скорости окисления $k \cdot 10^8$, $M^3/(с \cdot моль)$ | Энергия активации E , Дж/моль | Константа скорости образования верхнего комплекса $\nu \cdot 10^5$, $ч^{-1}$ | Константа скорости истечения метана $\mu \cdot 10^3$, $ч^{-1}$ | Доля реакционной поверхности ξ |
|--------------------|--------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|---|----------------------------------|--|---------------------------------|---|---|------------------------------------|
| Им. Ю.А. Гагарина | l_1 | 25 | 20 | 1331 | 110917 | 1,02 | 298/358 | 4,418 | 17759 | 6,159 | 7,078 | 0,0041 |
| Им. Ю.А. Гагарина | l_3 | 29 | 8,5 | 1309 | 109083 | 0,83 | 298/358 | 1,283 | 17759 | 6,159 | 3,390 | 0,0025 |
| «Комсомолец» | l_3 | 33 | 15 | 1364 | 113667 | 2,83 | 298/366 | 2,727 | 16378 | 8,284 | 6,609 | 0,0053 |
| «Южная» | l_1 | 28 | 20 | 1323 | 110250 | 1,44 | 298/364 | 4,626 | 16690 | 7,730 | 7,757 | 0,0055 |
| Им. А.Ф. Засядько | l_1 | 34 | 20 | 1312 | 109333 | 4,48 | 298/375 | 2,561 | 15184 | 10,930 | 9,012 | 0,0084 |
| «Куйбышевская» | l_1 | 36 | 20 | 1364 | 113667 | 4,13 | 298/366 | 7,918 | 16378 | 8,284 | 9,403 | 0,0065 |
| «Чайкино» | m_3 | 30 | 20 | 1323 | 110250 | 1,02 | 298/357 | 4,263 | 17959 | 5,912 | 8,190 | 0,0044 |
| Им. К.И. Поченкова | m_3 | 34 | 22,5 | 1318 | 109833 | 3,90 | 298/370 | 3,005 | 15808 | 9,430 | 1,014 | 0,0077 |
| Им. К.И. Поченкова | l_1 | 25 | 20 | 1316 | 109667 | 0,61 | 298/370 | 5,471 | 15808 | 9,430 | 7,078 | 0,0063 |
| Им. В.И. Ленина | l_1 | 23 | 20 | 1320 | 110000 | 0,53 | 297/388 | 1,273 | 13754 | 15,690 | 6,603 | 0,0100 |
| «Александровская» | l_1 | 9 | 15 | 1439 | 119917 | 1,65 | 297/380 | 1,668 | 14464 | 13,050 | 1,986 | 0,0033 |
| «Будлавинская» | l_1 | 8 | 17 | 1478 | 123167 | 1,27 | 308/389 | 1,064 | 15532 | 10,060 | 1,969 | 0,0026 |
| «Полтавская» | l_1 | 9 | 20 | 1374 | 114500 | 1,26 | 300/380 | 2,009 | 15007 | 11,410 | 2,648 | 0,0037 |
| «Угледорская» | m_3 | 11 | 22,5 | 1341 | 111750 | 0,11 | 298/363 | 1,879 | 16854 | 7,459 | 3,703 | 0,0032 |
| «Донецкая» | h_4' | 2 | 15 | 1691 | 140917 | 2,47 | 300/379 | 0,567 | 15117 | 11,110 | 2,375 | 0,0004 |

$$V_{\phi} / S_{\text{уд}} = 7 \cdot 10^{-10} (V^r)^2 - 2,82V^r + 3,64 \cdot 10^{-7}, \quad (1)$$

откуда расчетное значение максимально возможной удельной реакционной поверхности с учетом выражения для V_{ϕ} будет

$$S_{\text{уд}} = \frac{\left[0,0001(V^r)^2 - 0,004V^r + 0,058 \right] \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-10}(V^r)^2 - 2,82 \cdot 10^{-8}V^r + 3,64 \cdot 10^{-7}}, \quad (2)$$

или, после упрощения:

$$S_{\text{уд}} = -0,45(V^r)^2 + 18,4V^r + 44,8. \quad (3)$$

Чтобы найти действительно доступную для реакции окисления угля реакционную поверхность воспользуемся результатами исследования [7]. Согласно этим данным доля реакционной поверхности, связанная с поверхностным комплексным соединением, если пренебречь его распадом при низкотемпературном окислении, может быть записана в виде

$$\xi = 1 - \exp(-vt) + \frac{v}{\mu - v} \left[\exp(-\mu t) - \exp(-vt) \right], \quad (4)$$

где v – константа скорости образования поверхностного комплексного соединения, ч^{-1} ;

μ – константа скорости выделения метана, ч^{-1} ;

t – время, ч.

Значения v и μ найдем по формулам, полученным ранее в виде

$$v = 2,2 \cdot 10^{11} E^{-3,66}; \quad (5)$$

$$\mu = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} J_0}{R^{0,2}} \exp[-2,4 \cdot 10^{-2} (V^r)^{-0,3} t], \quad (6)$$

где E – энергия активации, Дж/моль;

R – радиус частиц угля, м;

J_0 – газоносность пласта, $\text{м}^3/\text{т}$;

t – время, ч; принимают равным 300 ч.

При $t \rightarrow \infty$ величина $\xi \rightarrow 1$, т.е. со временем все частицы угля покроются поверхностным комплексным соединением и в случае отсутствия их распада реакция прекратится.

Чтобы проследить за развитием процесса самовозгорания угля, связанным с поглощением им кислорода и наличием удельной реакционной

поверхности, обратимся к математической модели, полученной в работе [1] и усложненной учетом влияния теплоотвода от скопления угля в окружающую его среду:

$$\ln(T/T_0) = \Gamma_T Fo |_{Vi=0} \exp[-4,9Vi^{0,65}], \quad (7)$$

$$\text{где } \Gamma_T Fo = \frac{1}{\rho c_V} a_{O_2} q \xi a_C^* k \frac{t}{T_0}; \quad (8)$$

Γ_T – тепловой критерий самонагревания;

ρ – плотность угля, кг/м³;

c_V – теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

q – теплота реакции окисления, Дж/моль;

a_{O_2} и a_C^* – концентрации кислорода и углерода, моль/м³;

T_0 и T – начальная и текущая температуры, К;

Vi – безразмерный критерий теплоотдачи от скопления угля в окружающую его среду;

t – время, с;

ξ – доля угля, вступившего в реакцию;

k – константа скорости реакции окисления, м³/(с·моль).

В приведенной модели использованы средние по объему концентрации углерода a_C^* . В действительности в реакцию окисления вступают лишь незначительные его объемы, так как эти реакции происходят на поверхности пор частиц угля, в которые проникает кислород за счет диффузии. Средние за инкубационный период времени доли $\xi_{\text{ср}}$ значений a_C^* , вступающих в реакцию окисления, были найдены по усредненным их зависимостям, предложенным в [7]. Там же дано выражение с целью их определения для любого типа угля.

Найдем вначале, пользуясь этими зависимостями, $\xi_{\text{ср}}$ и приведенные значения концентрации углерода $\bar{a}_C^* = \xi_{\text{ср}} a_C^*$, вступающего в реакцию окисления с кислородом, для углей, представленных в табл. 1.

Из анализа полученных вычислений видно, что средние доли $\xi_{\text{ср}}$ параметра \bar{a}_C^* имеют значения от 0,002 до 0,009 их максимума и отвечают данным, полученным в работе [8] с найденными согласно методике НИИГД «Респиратор» инкубационными периодами самовозгорания углей. Эти доли, как следует из выражений (5), (6), зависят от энергии активации и таких характеристик угля, как газоносность пласта, массовая доля горючих и время от начала процесса, и находятся для каждого угля при лабораторных его испытаниях.

Попытаемся далее найти связь a_C^* с удельной поверхностью углей (рис. 2).

Разброс данных вызван, вероятно, различной влажностью углей и в дальнейшем при его учете возможно будут получены более достоверные данные.

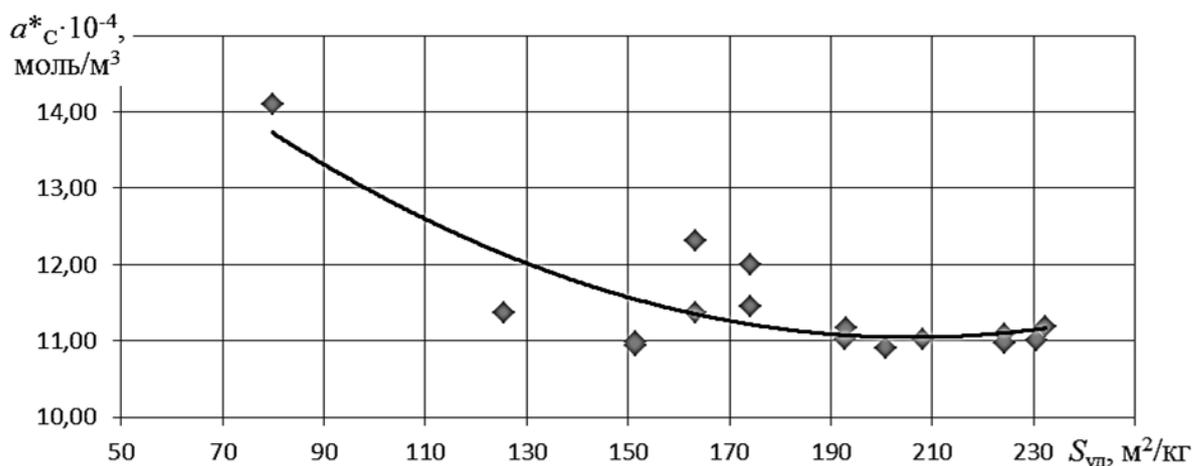


Рис. 2. Зависимость концентрации углерода от удельной поверхности угля

Зависимость a_C^* от $S_{уд}$ найдена в виде

$$a_C^* = -0,0002S_{уд}^2 - 0,0695S_{уд} + 18,203. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции 0,83.

Приведенные значения концентрации углерода и соответствующие им значения $S_{уд}$ могут быть использованы для определения инкубационного периода самовозгорания угля. В то же время с момента начала окисления угля они непрерывно изменяются, что вызвано, как сказано ранее, образованием и распадом поверхностных соединений при адсорбции кислорода. Поэтому для описания динамики процесса низкотемпературного окисления угля и его температуры проследим за изменением концентрации кислорода, скорости тепловыделения и реакционной поверхности во времени, пользуясь формулой (9) и зависимостями (4) – (6).

Для определения концентрации кислорода, принимающего участие в низкотемпературном окислении угля, обратимся к модели хемосорбции кислорода углями [3] и экспериментальным исследованиям [8]. Анализ данных позволяет заключить, что этот процесс не лимитируется скоростью адсорбции и решение для концентраций кислорода в угле a_{O_2} , моль/м³, может быть представлено в виде

$$a_{O_2} = \xi C_{ст} \left[1 - \exp \left(- \frac{\mu_d^2}{1 + \xi} Fo_d \right) \right] / \left(1 + \Gamma_d / \mu_d^2 \right), \quad (10)$$

где ξ – доля поглощенного углем кислорода, вступающего в реакцию окисления;

- $C_{ст}$ – концентрация адсорбата на границе газ-твердое тело, моль/м³;
 μ_d – первый корень характеристического уравнения для уравнения диффузии; для малых значений диффузионного критерия Bi_d принимают $\mu_d^2 = 3$;
 Fo_d – диффузионный критерий Фурье;
 Γ_d – диффузионный критерий скорости химической реакции; определяют из выражения $\Gamma_d = k(R_1)^2/D$;
 k – скорость химической реакции, с⁻¹;
 R_1 – радиус частицы адсорбента, м;
 D – коэффициент внутренней диффузии, м²/с.

Концентрацию кислорода на границе с частицами угля $C_{ст}$ принимают равной концентрации в воздухе, омывающей частицу угля в межкусковом пространстве, и зависит она от времени образования пожароопасного скопления угля и его газоносности; определяют зависимостью [4]

$$C_{ст} = C_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{0,76}{0,83 + J_0 \rho} \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} t \right) \right], \quad (11)$$

- где C_0 – концентрация кислорода в шахтном воздухе, моль/м³;
 J_0 – газоносность пласта, м³/т;
 ρ – плотность угля, т/м³;
 t – время от начала скопления угля, с.

Моделирование процесса адсорбции кислорода углями для различных значений газоносности пласта J_0 и констант скоростей химических реакций k позволило получить зависимости $a_{O_2} = f(J_0, \rho, t)$, представленные на рис. 3.

С использованием этих зависимостей и выражения (4) можно рассчитывать долю кислорода и реакционной поверхности, вступающих в реакции окисления и приводящих к нагреванию угля. Возможно также с использованием предложенного ранее [4] показателя скорости тепловыделения угля v_{O_2} , Дж/(моль·с), вычислить тепловой критерий самонагрева Γ_t , а затем по формулам (7) и (8) рассчитывать динамику температуры скопления угля и, следовательно, ее критическое значение и время инкубационного периода самовозгорания.

При расчете инкубационного периода критерий Bi , входящий в формулу (7), рекомендуют определять следующим образом, предложенным в работе [9]:

- находят коэффициент порозности ε скопления угля

$$\varepsilon = \frac{0,48}{1 + D_p/75}, \quad (12)$$

где D_p – дробимость угля; определяют лабораторным путем;

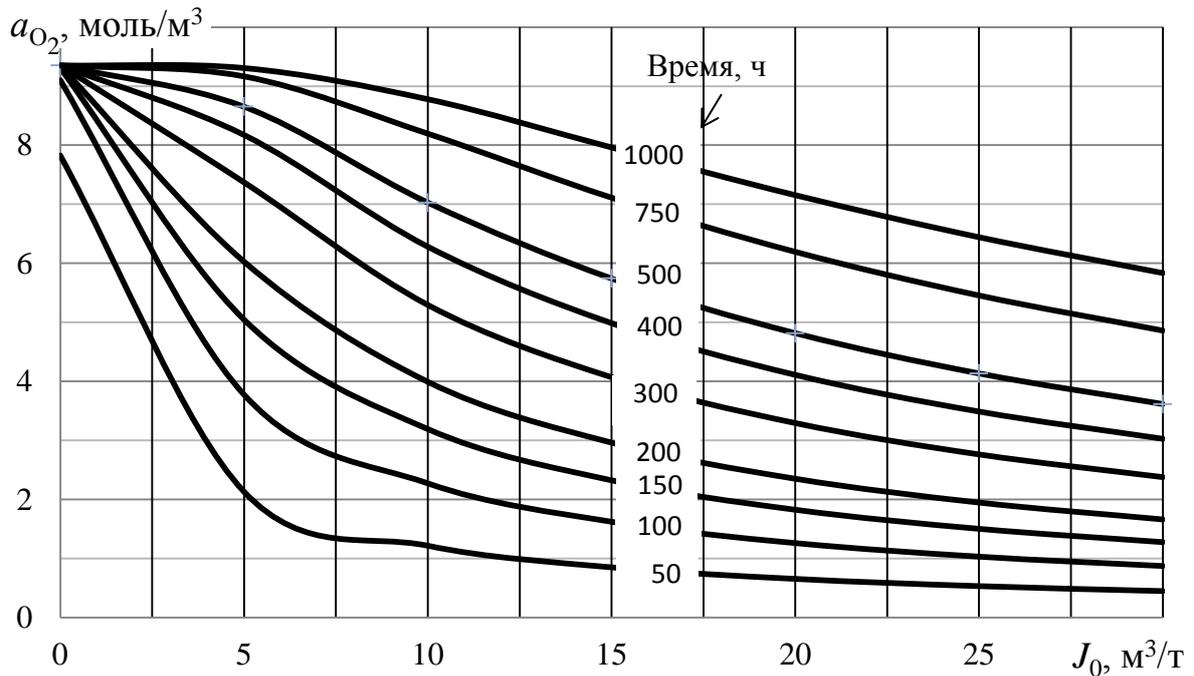


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода в угле в зависимости от газоносности пласта и времени начала низкотемпературного окисления

- вычисляют приведенный коэффициент теплопроводности обрушенных пород $\lambda_{пр}$, Вт/(м·К), с учетом их пустотности

$$\lambda_{пр} = \varepsilon\lambda_{в} + (1 - \varepsilon)\lambda_{п}, \quad (13)$$

где $\lambda_{в}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К), принимают равным 0,026 Вт/(м·К);

$\lambda_{п}$ – коэффициент теплопроводности пород кровли и почвы пласта, Вт/(м·К), принимают по данным шахт;

- определяют коэффициент нестационарного теплообмена K_{τ} , Вт/(м²·К), между углем и окружающими породами

$$K_{\tau} \approx \alpha = \frac{\lambda_{пр}}{m} \left(0,375 + \frac{m}{\sqrt{24\pi a \tau}} \right), \quad (14)$$

где a – коэффициент температуропроводности пород кровли и почвы пласта угля, м²/ч;

m – толщина скопления угля, м;

τ – пороговое время самовозгорания угля, принимают равным 35 сут.

Находят безразмерный критерий Bi теплообмена угля с окружающей средой, выражаемый зависимостью

$$Bi = \alpha m / (2\lambda_{пр}), \quad (15)$$

где α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

Вычислим для примера по приведенной методике параметры низкотемпературного окисления угля для шахты «Комсомолец» (табл. 2).

Таблица 2

Изменение параметров окисления угля шахты «Комсомолец» пласта l_3 по мере развития процесса самонагревания при толщине скопления угля 0,95 м и $Bi = 0,34$

| Параметр | Время, ч | | | | | | |
|---|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 1000 |
| Доля реакционной поверхности ξ_i | 0,0006 | 0,0045 | 0,0139 | 0,0250 | 0,0367 | 0,0484 | 0,0678 |
| Доля удельной площади реакционной поверхности $S_{вд}\xi_i$, м ² /кг | 0,10 | 0,74 | 2,27 | 4,08 | 5,98 | 7,90 | 11,07 |
| Концентрация углерода в угле a_C^* , моль/м ³ | 70 | 514 | 1581 | 2843 | 4166 | 5501 | 7710 |
| Среднеинтегральное значение доли реакционной поверхности $\xi_{ср}$ | 0,0002 | 0,0016 | 0,0053 | 0,0100 | 0,0152 | 0,0207 | 0,0300 |
| Доля усредненной удельной площади реакционной поверхности $S_{вд}\xi_{ср}$, м ² /кг | 0,03 | 0,26 | 0,87 | 1,63 | 2,48 | 3,37 | 4,90 |
| Концентрация кислорода в угле a_{O_2} , моль/м ³ | 0,85 | 2,32 | 4,07 | 5,38 | 6,37 | 7,11 | 7,96 |
| Скорость тепловыделения v_q , Дж/(моль·с) | 1,51 | 11,16 | 34,33 | 61,72 | 90,45 | 119,44 | 167,40 |
| Скорость тепловыделения с учетом концентрации кислорода w_q , Дж/(м ³ ·с) | 1,3 | 25,9 | 139,7 | 332,1 | 576,1 | 849,3 | 1332,8 |

Окончание табл. 2

| Параметр | Время, ч | | | | | | |
|---|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 1000 |
| Тепловой критерий самонагрева $\Gamma_T Fo$ | 0,0004 | 0,0246 | 0,2651 | 0,9456 | 2,1866 | 4,0297 | 8,4317 |
| Температура T , К | 298 | 299 | 305 | 324 | 361 | 425 | 626 |

Из анализа представленных в табл. 2 данных можно заключить, что доли вступающей в реакции окисления реакционной поверхности в начале процесса низкотемпературного окисления значительно ниже тех максимально возможных, которые были найдены автором [5]. К периоду достижения углем критической температуры они равны всего нескольким сотым максимально возможной удельной реакционной поверхности, характерной для данного угля.

Рассчитанные значения критических температур близки к значениям, определенным лабораторным путем (см. табл. 1), и отличаются от них из-за использования усредненных значений удельной реакционной поверхности согласно зависимости (3). В дальнейшем при определении инкубационного периода самовозгорания угля значения $S_{уд}$ для разрабатываемых шахтой пластов необходимо находить расчетным путем по зависимости (3).

Аналогично приведенному примеру по шахте «Комсомолец» вычислены массовые доли ξ_i участвующей в реакции окисления площади удельной реакционной поверхности для всех углей, представленных в табл. 1, а также их средние значения $\xi_{ср}$. Вычислены расчетные значения критической температуры и времени инкубационного периода по усредненным зависимостям для $\xi_i = \xi_{ср}$ и действительным, найденным из данных о динамике параметров окисления угля (табл. 3).

Сравнение этих величин дает возможность судить о пригодности предложенных зависимостей для расчета времени достижения углем критических значений их самонагрева по усредненным значениям параметров окисления для углей других пластов, подготовленных к очистной выемке.

Анализ представленных в табл. 3 данных показывает, что значения инкубационного периода самовозгорания угля, рассчитанные по пороговому времени и найденные в результате исследования развития процесса самонагрева угля, имеют близкие значения. При этом значения, рассчитанные по пороговому времени, как правило, на 10... 20 % завышены. Это свидетельствует о том, что они могут быть использованы для практических расчетов.

Таблица 3

Сравнительные значения параметров окисления самонагрева угля

| Шахта | Пласт | По текущим значениям | | | | | | По средним значениям | | | | | |
|---------------------|-------|----------------------|---|----------------------------------|---------------------|----------------------|------------|---------------------------------------|--|---------------------|----------------------|--|--|
| | | ξ_j | $S_{уд} \cdot \xi_j, \text{ м}^2/\text{кг}$ | $a_C^*, \text{ моль}/\text{м}^3$ | $T_{кр}, \text{ К}$ | $t_{инк}, \text{ ч}$ | $\xi_{ср}$ | $\bar{S}_{уд}, \text{ м}^2/\text{кг}$ | $\bar{a}_C^*, \text{ моль}/\text{м}^3$ | $T_{кр}, \text{ К}$ | $t_{инк}, \text{ ч}$ | | |
| Им. Ю.А. Гагарина | l_1 | 0,0309 | 6,93 | 3427 | 355 | 650 | 0,0286 | 6,42 | 3172 | 358 | 701 | | |
| Им. Ю.А. Гагарина | l_3 | 0,0262 | 5,26 | 2858 | 358 | 700 | 0,0227 | 4,56 | 2453 | 358 | 808 | | |
| «Комсомолец» | l_3 | 0,0367 | 5,98 | 4166 | 361 | 600 | 0,0300 | 4,90 | 3409 | 366 | 732 | | |
| «Южная» | l_1 | 0,0373 | 7,76 | 4110 | 363 | 620 | 0,0364 | 7,59 | 4013 | 364 | 634 | | |
| Им. А.Ф. Засядько | l_1 | 0,0520 | 7,88 | 5689 | 378 | 600 | 0,0524 | 7,95 | 5729 | 375 | 595 | | |
| «Куйбышевская» | l_1 | 0,0401 | 5,03 | 4554 | 370 | 600 | 0,0404 | 5,07 | 4592 | 366 | 595 | | |
| «Чайкино» | m_3 | 0,0307 | 5,93 | 3389 | 355 | 650 | 0,0284 | 5,47 | 3131 | 357 | 704 | | |
| Им. К.И. Пochenкова | m_3 | 0,0506 | 7,67 | 5562 | 377 | 650 | 0,0464 | 7,03 | 5096 | 370 | 709 | | |
| Им. К.И. Пochenкова | l_1 | 0,0424 | 9,52 | 4654 | 372 | 600 | 0,0433 | 9,72 | 4749 | 370 | 588 | | |
| Им. В.И. Ленина | l_1 | 0,0682 | 15,72 | 7497 | 391 | 600 | 0,0694 | 16,0 | 7634 | 388 | 589 | | |
| «Александровская» | l_1 | 0,0406 | 7,07 | 4872 | 376 | 700 | 0,0315 | 5,49 | 3777 | 380 | 902 | | |
| «Булавинская» | l_1 | 0,0388 | 6,33 | 4778 | 391 | 800 | 0,0316 | 5,16 | 3892 | 389 | 983 | | |
| «Полтавская» | l_1 | 0,0422 | 7,35 | 4837 | 376 | 700 | 0,0369 | 6,43 | 4225 | 380 | 801 | | |
| «Углеторская» | m_3 | 0,0362 | 6,99 | 4051 | 362 | 750 | 0,0316 | 6,10 | 3531 | 363 | 860 | | |
| «Донецкая» | h_4 | 0,0475 | 3,79 | 6691 | 381 | 800 | 0,0471 | 3,76 | 6637 | 379 | 807 | | |

Выводы. Изучена динамика параметров неизотермического процесса окисления углей: удельной реакционной поверхности, концентрации кислорода, скоростей окисления угля, температуры. Найдены значения инкубационного периода самовозгорания угля с учетом динамики параметров его окисления и средних их значений. Показана принципиальная возможность использования средних значений параметров окисления для практических расчетов.

Список литературы / References

1. Греков С.П. Математическое моделирование процессов самовозгорания промышленных материалов / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, В.В. Баклан // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т математики. – Киев, 1998. – С. 69 – 70.

Grekov, S.P., Kalyuskiy, A.Ye. and Baklan, V.V. (1998). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov samovozgoraniya promyshlennykh materialov* [The mathematical modeling of the processes of the spontaneous combustion of industrial materials]. *Fiziko-tekhnicheskiye i tekhnologicheskiye prilozheniya matematicheskogo modelirovaniya: sb. nauch. tr.* [Proc. of the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of the Ukraine “Physicotechnical and technological applications of the mathematical modeling”]. Kiev, pp. 69 – 70.

2. Кошовский Б.И. Определение инкубационного периода самовозгорания угля / Б.И. Кошовский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2000. – С. 104 – 108.

Koshovskiy, B.I., Grekov, S.P. and Cygankiewicz, Ya. (2000). *Opredeleniye inkubatsionnogo perioda samovozgoraniya uglya* [Determination of the incubation period of the spontaneous combustion of coal]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD “Respirator”* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, pp. 104 – 108.

3. Греков С.П. Неизотермическая кинетика гетерогенного окисления ископаемых углей кислородом воздуха и их самонагревание / С.П. Греков, А.А. Березовский, Я. Цыганкевич // ХТТ. – 2001. – № 1. – С. 27 – 37.

Grekov, S.P., Berezovskiy, A.A. and Cygankiewicz, Ya. (2001). *Neizotermicheskaya kinetika geterogennogo okisleniya iskopayemykh ugley kislorodom vozdukha i ikh samonagrevaniye* [Nonisothermal kinetics of the heterogeneous oxidation of fossil coals with air oxygen and their spontaneous heating]. *XTT*, no. 1, pp. 27 – 37.

4. Греков С.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 11. – С. 46 – 50.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Orlikova, V.P. (2014). *Teplovoy effect okisleniya ugley i endogennaya pozharoопасnost* [Thermal effect of oxidation of coals and endogenous fire hazard]. *Ugol Ukrainy*, no. 11, pp. 46 – 50.

5. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.

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

6. Греков С.П. Неизотермическая кинетика хемосорбции газов микропористыми сорбентами / С.П. Греков, А.Е. Калюсский, В.В. Баклан // ЭНФХ. – 1996. – Т. 70, № 8. – С. 1496 – 1498.

Grekov, S.P., Kalyusskiy, A.Ye. and Baklan, V.V. *Neizotermicheskaya kinetika khemosorbtsii gazov mikroporistymi sorbentami* [Nonisothermic kinetics of chemisorption of gases with microporous sorbing agents] (1996). *ENFKh*, 1996, vol. 70, no. 8, pp. 1496 – 1498.

7. Пашковский П.С. Сорбционные процессы в газонасыщенных угольных скоплениях / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Сб. Херсонского нац. ун-та. – Херсон, 2007. – Вып. 2(28). – С. 247 – 251.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. and Zinchenko, I.N. (2007). *Sorbtsionnyye protsessy v gazonasyshchennykh ugolnykh skopleniyakh* [Sorption processes in gas-saturated coal accumulations]. *Sb. Khersonskogo nats. techn. univ.* [Proc. of the Kherson nat. techn. univ.]. Kherson, issue 2 (28), pp. 247 – 251.

8. Греков С.П. Моделирование хемосорбционных процессов кислорода углями разных степеней метаморфизма при температурах 30...100 °С / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 34 – 44.

Grekov, S.P., Koshovskiy, B.I. and Zinchenko, I.N. (2008). *Modelirovaniye khemosorbtsionnykh protsessov kisloroda uglyami raznykh stepeney metamorfizma pri temperaturakh 30...100 °С* [The modeling of the oxygen chemisorption processes with coals of various metamorphism degrees at the temperatures of 30...100 °С]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 45, pp. 34 – 44.

9. Греков С.П., Инженерный метод определения инкубационного периода самовозгорания угля / С.П. Греков, П.С. Пашковский, А.А. Всякий // Уголь Украины. – 2015. – № 3 – 4. – С. 44 – 47.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Vsyakiy, A.A. (2014). *Inzhenernyy metod opredeleniya inkubatsionnogo perioda samovozgoraniya uglya* [Engineering method of determination of the incubation period of spontaneous combustion of coal]. *Ugol Ukrainy*, no. 3 - 4, pp. 44 – 47.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 26.02.2015*

Purpose. To receive the dependences to describe dynamics of parameters of the processes of oxidation of coals, of temperature development in their accumulations and to determine the incubation period of the spontaneous combustion of coal.

Methodology. The methodology is based on a mathematical model of the heterogeneous process of oxygen adsorption with the first-order oxidation reaction and on experimental data of the NIIGD “Respirator”.

Results. The data to determine the specific reactionary surfaces of the samples of coals with the various coal rank and the data to study their porosity were generalized, the dependence of the specific reactionary surface on the concentration of combustibles was received. The connection of the specific reactionary surface of various coals on the average volume concentration of carbon in them was found. The change of the parameters of oxidation of coals temporally to the extent of development of the process of their heating and heat removal from the accumulation was traced back. The possibility of the use of average values of the description for practical calculations was shown.

Scientific novelty. Dynamics of the parameters of the low-temperature oxidation of coals is described theoretically with the use of the considerable quantity of the experimental investigations.

Practical value. The dependences received confirm the possibility of the use of the average values of oxidation parameters for calculation of the incubation period of the spontaneous combustion of coals.

Keywords: spontaneous combustion, reactionary surface, heat release rate, temperature, oxidation, coal.

УДК 622.831.325:[552.57:547.211]:544.723.3]

Г.П. Стариков, д-р техн. наук, директор, Я.В. Шажко, канд. техн. наук, замдиректора, Н.В. Хащеватская, аспирант, О.В. Шажко, соискатель ГУ «Институт физики горных процессов», Донецк

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДЕСОРБЦИОННЫХ ПАСПОРТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДАВЛЕНИЯ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ И ИХ ГАЗОНОСНОСТИ

G.P. Starikov, Dr. Sci. (Tech.), director, Ya.V. Shazhko, Cand. Sci. (Tech.), deputy director, N.V. Khashchevatskaya, postgraduate student, O.V. Shazhko, postgraduate student (Government institution "Institute of Physics of Mining Processes", Donetsk)

METHOD OF CONSTRUCTION OF THE DESORPTION CERTIFICATES FOR EXAMINATION OF THE METHANE PRESSURE IN COAL SEAMS AND THEIR GAS CONTENT

Цель. Научное обоснование метода составления десорбционных паспортов, используемых при измерении шахтным десорбметром давления и объема метана в угольных пластах.

Методика. Определение давления десорбирующегося метана из фракций угля в накопительный сосуд известного объема после предварительного насыщения их метаном при давлениях, кратных давлению метана в угольном массиве.

Результаты. Установлены зависимости давления метана, формирующегося при его десорбции из угля в закрытые емкости, от объема сорбированного метана в тех же пробах при различных давлениях насыщения.

Новизна. Найденными зависимостями в виде алгоритма программируют шахтный десорбметр, измеряющий давление и газоносность в месте отбора угольных проб в течение 15...30 мин.

Практическая значимость. Разработка позволяет диагностировать параметры массопереноса (давление, газоносность, коэффициент эффективной диффузии) метана в угле, необходимые для безопасной работы очистных забоев, в особенности при отработке выбросоопасных пластов.

Ключевые слова: угольный пласт, давление, объем метана, десорбционный паспорт, газоносность.

Актуальность темы. Существующие методы и средства [1] прогноза характера и интенсивности газовыделения в шахтах из-за невысокой достоверности и низкой надежности данную проблему не решают. Обусловлено это в первую очередь недостаточной степенью изученности процессов массопереноса метана в трещиновато-пористой структуре угля.

Ввиду отсутствия физически достоверной модели десорбции метана из угольного вещества не разработаны надежные экспресс-методы и технические средства для определения давления и метаноносности непосредственно в призабойной зоне угольных пластов.

Цель работы – научное обоснование метода составления десорбционных паспортов, используемых при измерении шахтным десорбметром давления и объема метана в угольных пластах.

Суть способа диагностики давления и газоносности угольных пластов состоит в сравнении данных шахтных измерений десорбции метана из угля

в постоянный объём камеры с данными предварительного тестирования пласта (десорбционным паспортом), которые заложены в электронный блок памяти десорбметра [2, 3].

Способ базируется на предположении, что кинетика десорбции газа образцами угля при измерениях в шахте и измерениях в лаборатории идентичны. Это предположение обосновано тем, что

- в обоих случаях используют штыб, который образуется во время бурения шпуров в угольном пласте;
- используют образцы одинаковой (естественной) влажности, температуры, массы и в гранулах, размер которых не только одинаков, но и повторяется от образца к образцу;
- в шахтных условиях и в лаборатории десорбция метана осуществляется в накопительные сосуды одинакового объёма, которые в исходном состоянии заполнены воздухом.

Десорбционный паспорт угольного пласта — это экспериментально установленная информация (в цифровом или графическом виде) о корреляции между интенсивностью эмиссии метана из угля, пластовым давлением метана и его объёмом в угле.

Для составления паспорта проводят лабораторные исследования интенсивности выделения метана в зависимости от его концентрации в замкнутом объёме в предварительно насыщенных образцах угля при различном давлении (рис. 1, 2).

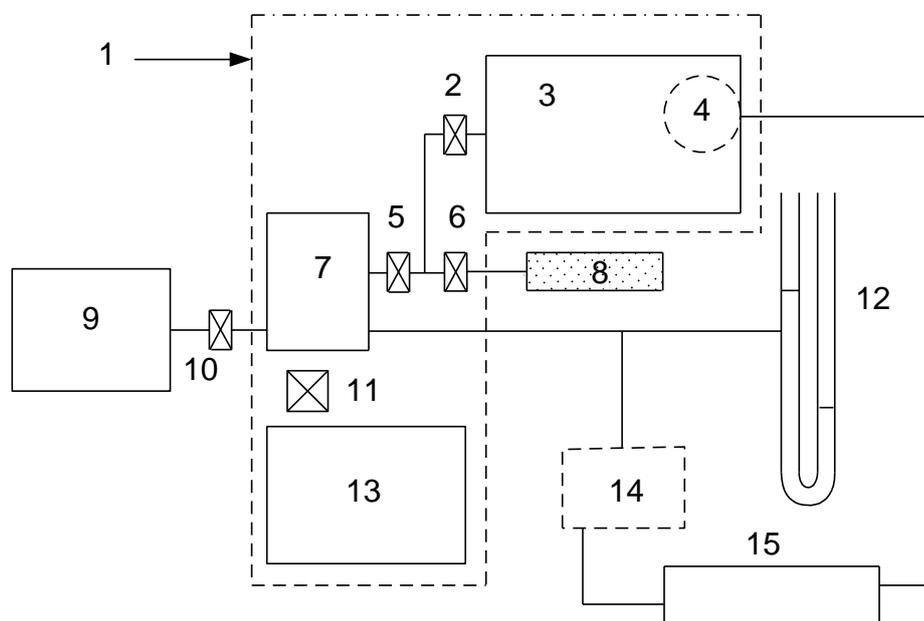


Рис. 1. Схема установки, которую используют для определения параметров, необходимых при создании десорбционного паспорта угля:

1 – термокамера; 2, 5, 6, 10 и 11 – вентили (или зажимы); 3, 7, 13 – накопительные сосуды известного объёма V_1 , V_2 и V_3 ; 4 и 15 – электронные датчики давления; 8 – контейнер с углём, содержащим газ; 9 – форвакуумный насос; 12 – ртутный манометр; 14 – компьютер

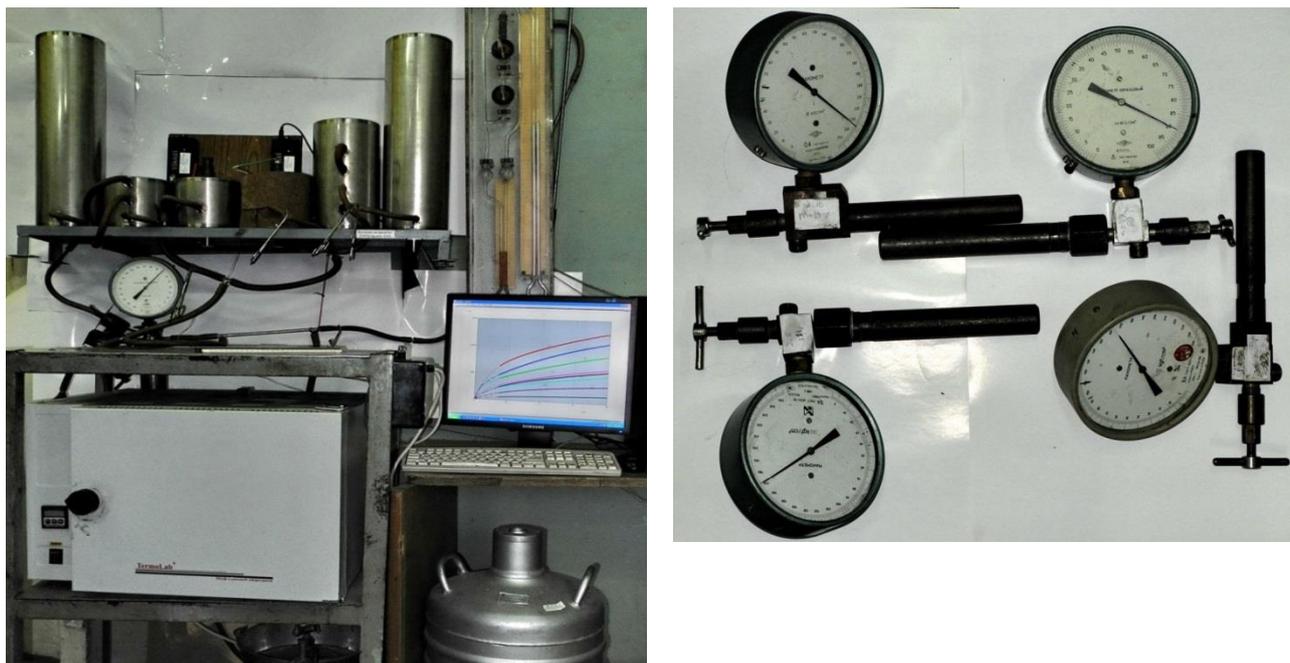


Рис. 2. Вид лабораторной установки для проведения экспериментов по десорбции газов из угля и камеры для насыщения образцов метаном

Десорбционный паспорт состоит из двух фрагментов. *Первый* – устанавливает вид зависимости между ростом давления $\Delta P^{\text{дес}}/\Delta t$ в накопительном сосуде при десорбции (т.е. интенсивностью десорбции метана) и равновесным давлением газа в угле. Экспериментальной базой, необходимой для составления первого фрагмента паспорта, являются данные лабораторных исследований десорбции метана, а также измерения объема газа в нескольких образцах угля, которые предварительно были насыщены метаном при различных значениях давления (рис. 3).

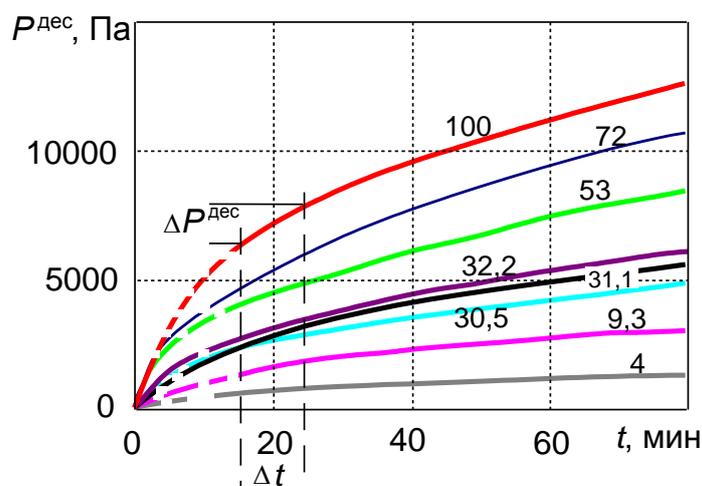


Рис. 3. Характер изменения давления газа в накопительном сосуде в ходе десорбции метана из образцов угля после их насыщения метаном при различном давлении

На базе полученной информации выявляется зависимость $\Delta P^{\text{дес}}$ от $P_{\text{нас}}$ в любом интервале времени. Так, например, ниже показан прирост давления $\Delta P^{\text{дес}}$ в накопительном сосуде в десятиминутном интервале десорбции (время десорбции между 15 и 25 минутами) в зависимости от того, под каким давлением метана $P_{\text{нас}}$ насыщался уголь.

Набор цифровых значений функции $\Delta P^{\text{дес}} = f(P_{\text{нас}})$ составляет содержание первого фрагмента ДП. Искусственно введённая задержка информации (здесь на 15 мин) принципиально важна, так как в случае шахтных измерений первые 10...15 мин обычно теряют на бурение, просеивание угля на ситах и другие операции.

Таким образом, измеряя $\Delta P^{\text{дес}}$ в шахтных условиях и соотнеся его с данными первого фрагмента паспорта, можно определить давление метана в угольном пласте в точке отбора пробы.

Второй фрагмент ДП устанавливает зависимость объёма метана в пробе угля от пластового давления (или давления насыщения). Набор цифровых значений функции $Q = f(P)$ составляет содержание второго фрагмента ДП.

Цифровые значения фрагментов десорбционного паспорта, введенные в электронный блок памяти, – это информационная база, необходимая для работы десорбтометра. Сравнение результатов десорбтометрических измерений, выполнение которых занимает 10 мин, с данными информационной базы позволяет в автоматическом режиме определять давление метана в пласте и его количество в угле в месте отбора пробы.

Данные десорбционного паспорта периодически обновляются после прохождения 200 м шахтной выработки и действительны они только для данного шахтопласта.

ГУ «Институт физики горных процессов» разработан десорбтометр, практически реализующий методику экспресс-анализа углеметановой системы. Конструктивное исполнение измерительного прибора позволяет использовать его в подземных выработках шахт, опасных по газу и угольной пыли, и во взрывоопасных зонах внутри помещений на поверхности. Прибор (рис. 4) имеет автономное питание и обеспечивает одновременное измерение в трёх кюветах.

Встроенный электронный блок, система коммуникаций и управления операциями позволяет определять давление и объем метана в пласте, сохранять результаты измерений в долговременной памяти и передавать их на поверхность по системе УТАС в режиме реального времени.



Рис. 4. Шахтный измеритель массопереноса метана ШИММ (ДС-03)

Основные технические характеристики десорбметра ДС-03:

- диапазон измеряемых давлений метана в пласте 0...10 МПа;
- погрешность измерения давления без калибровки датчика давления $\pm 5\%$;
- максимальное давление в измерительной кювете 50 кПа;
- температурный диапазон $-40...+50^{\circ}\text{C}$;
- максимальная скорость передачи информации по USB-соединению 250 кбит/с;
- время состояния прибора в режиме «подготовка» – макс. 900 с;
- время состояния прибора в режиме «измерение» – макс. 1800 с.

Блок памяти может содержать цифровую информацию о десорбционных паспортах нескольких шахтопластов, включая конкретное для каждого паспорта время «подготовки» и «измерения».

Выводы

1. Впервые установлены закономерности массопереноса метана из предварительно насыщенных им угольных фракций в накопительный сосуд известного объема.

2. Обоснованы параметры десорбционных паспортов, используемых в шахтных десорбметрах для диагностики давления и газоносности угольных пластов.

Список литературы / References

1. Правила безпеки у вугільних шахтах: ДНАОП 1.1.30-1.01-00. – Київ, 2001. – 495 с.

ДНАОП 1.1.30-1.01-00. *Pravyla bezpeky u vugilnykh shakhtakh* [Safety regulations in coal mines] (2001). Kyiv, 495 p.

2. Пат. України № 89740, МПК E21F 7/00. Спосіб визначення тиску й метаносності вугільного пласта / А.Д. Алексєєв, В.О. Васильковський, Г.П. Старіков, В.З. Брюм. – Опубл. 25.02.2012. Бюл. № 14.

Alekseyev, A.D., Vasilkovskiy, V.A., Starikov, G.P. and Bryum, V.Z. (2012). *Sposib vyznachennia tysku y metanonosnosti vugil'nogo plasta* [Method of determination of the pressure and methane content of the coal seam]. Patent Ukrainy no. 89740, IPC E21F 7/00 (In Ukrainian).

3. Пат. України № 105584, МПК E21F 7/00. Пристрій для виміру ефективної дифузії газу в вугіллі / В.Г. Грін'єв, Г.П. Старіков, В.В. Завражин. – Опубл. 10.09.2015. Бюл. № 17.

Grinyev, V.G., Starikov, G.P., Zavrazhin, V.V. (2015). *Prystrii dlia vymiru efektyvnoi dyfuzii gazu v vugilli* [Device for measurement of the efficient gas diffusion in coal]. Patent Ukrainy no. 105584, IPC E21F 7/00 (In Ukrainian).

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 13.08.2015*

Purpose. Scientific substantiation of the method of making the desorption certificates being used by measurement of methane pressure and volume in the coal seams with a mine desorbometer.

Methodology. Determination of the pressure of methane desorbing from coal fractions into an accumulator flask of the volume known after their presaturation with methane by the pressures that are multiple to the methane pressure in the coal massif.

Results. Dependences of the pressure of methane forming by its desorption from coal into the capacities closed on the volume of the methane sorbed in the same samples by various saturation pressures.

Novelty. The mine desorbometer metering the pressure and gas content in the coal sampling points within 15...30 min is programmed by means of the dependences ascertained in the form of an algorithm.

Practical value. The product permits to examine the mass transfer parameters (pressure, gas content, coefficient of effective diffusion) of methane in coal necessary for the safe operation of mining faces, especially by mining the seams subjected to outbursts.

Keywords: coal seam, pressure, methane volume, desorption certificate, gas content.

УДК 681.121

*Г.И. Пештибай, нач. отд., В.А. Чернышев, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Э.Г. Чайковская, ведущий инж. НИИГД «Респиратор», Донецк*

ВЫБОР ТИПА РАСХОДОМЕРА ВОДЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СМЕСИТЕЛЬНО-НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

*G.I. Peshtibay, head of department, V.A. Chernyshev, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate,
E.G. Chaykovskaya, leading engineer (NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

CHOICE OF THE WATER METER TYPE FOR THE USE IN FORCE MIXING PLANTS

Цель. Определение типа расходомера, наиболее эффективного при перекачивании быстротвердеющих растворов.

Методика. Информационные исследования приборов измерений расхода воды для применения в смесительно-нагнетательной установке при приготовлении и перекачивании растворов на основе гипсовых вяжущих и анализ их технических параметров.

Результаты. Определены основные типы приборов контроля расходов воды и их параметры, наиболее пригодные для дозированной подачи воды в смесительно-нагнетательную установку при различных условиях применения.

Практическая значимость. Использование расходомера для непрерывного дозирования подачи воды в смеситель обеспечивает соблюдение требуемых технологических параметров, что позволяет вывести на нормальный режим работы смесительно-нагнетательную установку для перекачивания быстротвердеющих растворов.

Ключевые слова: шахта, изоляция, гидромеханический способ, оборудование, контроль расхода воды.

Постановка проблемы. На протяжении нескольких десятилетий НИИГД «Респиратор» разрабатывал технические средства для дистанционного возведения монолитных перемычек гидромеханическим способом, проводил экспериментальные исследования физико-механических свойств гипсовых вяжущих, режимов приготовления и перекачивания гипсового раствора, конструкций агрегатов и устройств. В результате анализа существующих способов и средств изоляции подземных пожаров были разработаны технические требования к оборудованию для дистанционного возведения монолитных перемычек [1, 2].

При приготовлении раствора из гипсовых вяжущих важным фактором обеспечения нормального режима работы смесительно-нагнетательной установки и перекачивания гипсового раствора является непрерывное дозирование подачи гипса и воды в смеситель. Дозирование гипса осуществляется непосредственно приемным устройством смесительно-нагнетательной установки. В существующем оборудовании контроль расхода воды осуществляется по показаниям приборов в гидравлическом пульте, что не всегда гарантирует строгое соблюдение технологических параметров. Для непрерывного дозирования воды, идущей на

приготовление быстротвердеющих растворов, необходимо использовать более эффективное средство дозирования, например прибор измерения расхода воды.

Цель работы. Исследования приборов измерения расхода воды (расходомеров) и их технических параметров для определения наиболее эффективных при использовании в смесительно-нагнетательных установках.

Материал исследования. В результате проведения исследований были рассмотрены такие типы расходомеров: переменного перепада давления, постоянного перепада давления (ротаметры, поплавковые и поршневые расходомеры), тахометрические, вихревые, кориолисовы, ультразвуковые, электромагнитные, тепловые, меточные, ионизационные, оптические, ядерно-магнитные.

Одним из наиболее распространенных средств измерений расхода жидкостей являются **расходомеры переменного перепада давления** (рис. 1), состоящие из сужающего устройства, дифманометра, приборов для измерения параметров среды и соединительных линий. В качестве сужающего устройства чаще всего применяют стандартную диафрагму, реже сопла и трубу Вентури. Поток среды в трубопроводе встречает препятствие, и на этом препятствии измеряется разница давлений до устройства и после него. В диафрагменном расходомере поток ограничивается формой отверстия в диафрагме, ось которой совпадает с осью трубопровода.

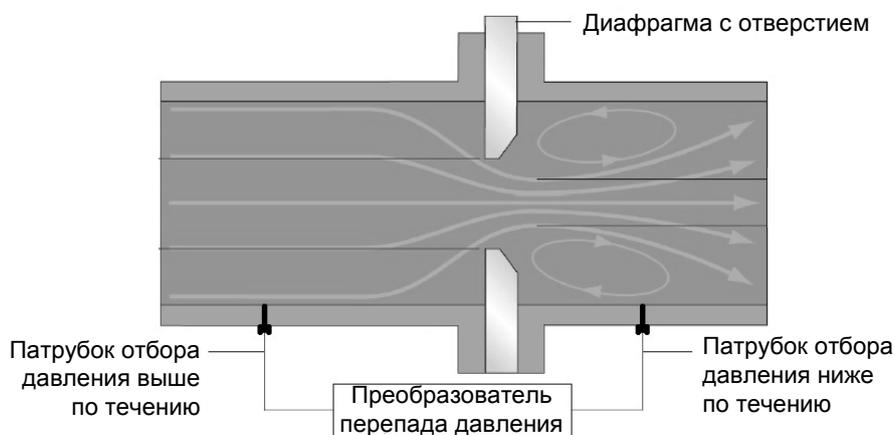


Рис. 1. Расходомер переменного перепада давления

Достоинства: простота и невосприимчивость к внешним воздействиям; точность; дешевизна.

Недостатки: малый срок службы, большая остаточная потеря давления (40...60 %), динамический диапазон ограничен значением 4:1 или 5:1.

Принцип действия **тахометрических расходомеров** (крыльчатых, турбинных, винтовых) основан на преобразовании поступательного движения потока жидкости во вращательное движение измерительной части.

Достоинства: максимальный динамический диапазон до 10:1; точность ($\pm 0,5\%$ от фактического значения).

Недостатки: при пульсациях расхода расходомер выдает погрешность из-за запаздывания; существует возможность повреждения лопастей турбины; при малых расходах результаты получить нельзя, так как энергии потока недостаточно, чтобы вращать ротор турбины.

Расходомеры постоянного перепада давления делятся на ротаметры, поплавковые и поршневые.

Ротаметры применяют для измерения расходов однородных потоков чистых и слабозагрязненных жидкостей, протекающих по трубопроводам и не подверженных значительным колебаниям [3].

Ротаметр (рис. 2) состоит из вертикальной конусовидной трубки, установленной узким концом вниз, и поплавка, который свободно плавает в текучей среде.

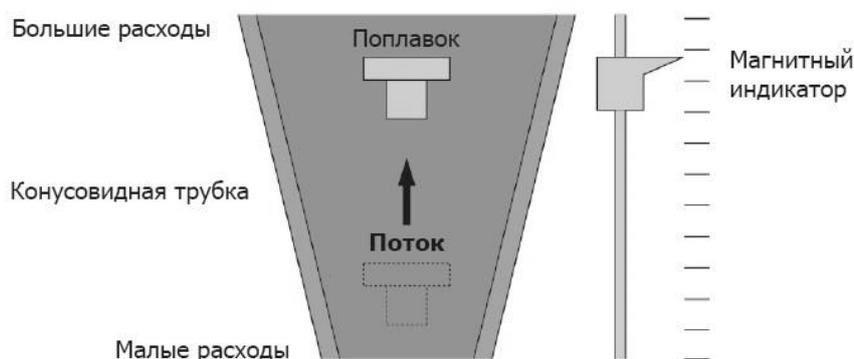


Рис. 2. Ротаметр

При прохождении среды через трубку положение поплавка находится в равновесии с направленной вверх силой действия среды; направленной вниз силой, обусловленной весом поплавка. Положение поплавка – показатель значения расхода.

Поплавок чаще всего изготавливают из нержавеющей стали, однако в некоторых системах используют поплавки из других материалов.

Конусовидную трубку изготавливают из стекла или пластмассы. Однако если повреждение трубки может привести к опасной ситуации, тогда вокруг стекла устанавливают защитный кожух или вместо стеклянной трубки используют металлическую.

Если трубка прозрачная, то можно наблюдать за поплавком и сравнивать его положение со шкалой. В некоторых системах материал трубки может быть непрозрачным и тогда для индикации положения поплавка используют магнитное устройство.

Поскольку при увеличении расхода проходное сечение также увеличивается, дифференциальное давление остается почти постоянным.

Достоинства: динамический диапазон составляет приблизительно 10:1; простота конструкции и невосприимчивость к внешним воздействиям; падение давления на расходомере минимально и почти постоянно; относительно

небольшая погрешность измерения расхода 1,5...2,5 %; безотказность в процессе эксплуатации.

Недостатки: трубка должна располагаться только вертикально; использование прозрачных конусовидных трубок ограничено давлением и температурой среды; возможно возникновение пульсаций поплавка под воздействием сил инерции и сил упругости.

Поплавковые и поршневые расходомеры. Поплавковый расходомер постоянного перепада давления состоит из поплавка и конического седла, расположенных в корпусе прибора.

В поршневом расходомере роль поплавка выполняет перемещающийся во втулке поршень. Измеряемое вещество поступает в расходомер, приподнимает поршень и выходит через прорезь или окно во втулке. Поршень поднимается в зависимости от расхода вещества, открывая во втулке все большую часть окна. При этом перепад давления на поршне остается постоянным.

Достоинства: относительная простота конструкции.

Недостатки: невысокое рабочее давление (до 6,27 МПа), большая погрешность измерения (2,5...3 % от верхнего предела измерения).

Принцип действия **вихревого расходомера** основан на определении частоты вихрей, образующихся в потоке измеряемой среды при обтекании тела специальной формы, установленного в проточной части преобразователя расхода. Частота вихрей пропорциональна объемному расходу, определяется при помощи двух пьезодатчиков, которые фиксируют пульсации давления в зоне вихреобразования.

Достоинства: простота и надежность преобразователя расхода, отсутствие подвижных частей, большой диапазон измерений, линейный измерительный сигнал, достаточно высокая точность измерения, независимость показаний от давления и температуры.

Недостатки: невозможно использовать при малых скоростях потока (трудно измерять сигналы с маленькой частотой колебаний), значительная потеря давления (может достигнуть 30...50 кПа).

Кориолисов расходомер состоит из датчика расхода (сенсора) и преобразователя. Сенсор напрямую измеряет расход, плотность среды и температуру сенсорных трубок. Преобразователь конвертирует полученную с сенсора информацию в стандартный выходной сигнал.

При движении измеряемой среды через сенсор проявляется физическое явление, известное как эффект Кориолиса. Поступательное движение среды во вращательном движении сенсорной трубки приводит к возникновению кориолисового ускорения, которое, в свою очередь, приводит к появлению кориолисовой силы. Сила Кориолиса и, следовательно, изгиб сенсорной трубки прямо пропорциональны массовому расходу жидкости.

Достоинства: высокая точность (менее 0,1 %), широкий динамический диапазон, возможность измерения массы потока.

Недостатки: сложная конструкция, дрейф нуля, высокая стоимость.

Ультразвуковыми расходомерами называют расходомеры, принцип действия которых заключается в измерении какого-либо эффекта (в зависимости от расхода), создающегося при прохождении акустических колебаний сквозь поток жидкости [4].

Ультразвуковые расходомеры подразделяют на работающие по принципу перемещения акустических колебаний движущейся средой и по принципу эффекта Доплера. В устройствах первого типа использовано свойство звуковых волн изменять скорость своего распространения в подвижной среде. При использовании для измерения локальной скорости потока эффекта Доплера исходный сигнал, а также сигнал с приёмника отправляются на смеситель. Частота ультразвука, которую фиксирует приёмник, изменяется в зависимости от скорости потока, исходная частота остаётся неизменной. Частота сигнала на выходе из смесителя – разность частот исходного и принятого сигнала, по ней можно однозначно судить о локальной скорости вещества в потоке.

Преимущества: высокая точность, возможность измерения расхода жидкостей и газов, широкий диапазон измерений (1:500), низкая стоимость, возможность измерения расхода без врезки в трубопровод.

Недостатки: зависимость показаний от профиля скорости потока и скорости звука, зависимость показаний от наличия в потоке частиц, погрешности показаний из-за неточного учета воздействия профиля скорости, асимметрии электронно-акустических каналов, варьирующей скорости ультразвука в веществе, паразитных акустических сигналов.

Работа **электромагнитных измерителей** расхода жидкости основана на принципе взаимодействия протекающей через расходомер жидкости с магнитным полем. В основе процесса лежит закон электромагнитной индукции. Следовательно, измеряемая жидкость должна быть электропроводящей.

В проводнике, пересекающем силовые линии поля, индуцируется эдс, пропорциональная скорости движения проводника. При этом направление тока, возникающего в проводнике, перпендикулярно к направлению движения проводника и направлению магнитного поля. Если заменить проводник потоком проводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерять эдс жидкости, можно получить принципиальную схему электромагнитного расходомера, предложенную ещё Фарадеем (рис. 3).

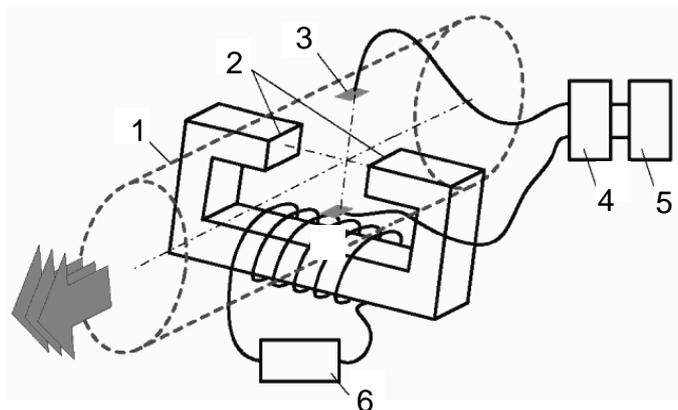


Рис. 3. Схема и принцип действия электромагнитного расходомера:

- 1 – трубопровод;
- 2 – полюса магнита;
- 3 – электроды для съема эдс;
- 4 – электронный усилитель;
- 5 – отсчетная система;
- 6 – источник питания магнита

Преимущества: линейная статическая характеристика, малая погрешность (0,2 %), надежность, независимость показаний от плотности и температуры среды, широкий динамический диапазон измерений (1:1000), возможность измерения расхода дисперсных и агрессивных сред, отсутствие дополнительного гидравлического сопротивления.

Недостатки: возможность измерения расхода только электропроводных жидких сред, слабый выходной сигнал преобразователя расхода.

Принцип действия **теплового расходомера** основан на измерении эффекта теплового воздействия на поток, зависящего от расхода. Если локально изменять свойства вещества в потоке (например, температуру) и регистрировать эти изменения на некотором удалении от места воздействия, можно определить среднюю скорость перемещения вещества в потоке. Анализ данных датчиков позволяет однозначно судить о скорости перемещения вещества в потоке.

Преимущества: высокая чувствительность, быстрое действие, простота конструкции.

Недостатки: достоверная работа возможна только в чистых потоках с неизменными теплофизическими характеристиками и необходимость очищения элемента от загрязнений.

Меточными называют расходомеры, основанные на измерении времени перемещения какой-либо характерной части (метки) потока на контрольном участке пути. Метку в потоке создают, как правило, искусственным путем. Метки могут быть самыми разнообразными: ионизационными, радиоактивными, физико-химическими, тепловыми, оптическими, ядерно-магнитными и др. Соответственно различными будут устройства для создания метки и ее детектирования при прохождении меткой контрольного участка пути. Меточные расходомеры чаще всего применяют для различных лабораторных и исследовательских работ, и в частности при градуировке и поверке других расходомеров.

Ионизационными расходомерами называются приборы, основанные на измерении того или иного зависящего от расхода эффекта, возникающего в результате непрерывной или периодической ионизации потока газа или жидкости. Они разделяются на расходомеры с зависящим от расхода измеряемым ионизационным током между электродами и расходомеры с зависящим от расхода измеряемым временем перемещения ионизационных меток на определенном участке пути. Применяют в основном для измерения расхода газов.

Оптические расходомеры – это расходомеры, основанные на зависимости от расхода вещества того или иного оптического эффекта в потоке. Часто называют лазерными, так как развитие их основных разновидностей стало возможным после создания мощных оптических квантовых генераторов.

Ядерно-магнитные расходомеры основаны на зависимости ядерно-магнитного резонанса от расхода потока. В свою очередь ядерно-магнитный резонанс – это резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с нулевым спином во внешнем магнитном поле, которое обусловлено переориентацией магнитных моментов ядер.

Разновидности ядерно-магнитных расходомеров – амплитудные, частотные, нутационные и меточные, причем последние подразделяют на временные, амплитудно-частотные и фазово-частотные. Кроме того, имеются и некоторые другие промежуточные схемы приборов.

Требования к расходомеру. Прибор для контроля расхода воды при приготовлении и подаче гипсового раствора смесительно-нагнетательной установкой должен соответствовать следующим требованиям: точность измерения; малое сопротивление потоку (небольшая остаточная потеря давления); высокая надежность (безотказность и долговечность); быстродействие прибора (малое запаздывание при пульсациях давления); широкий диапазон расходов, подлежащих измерению; простота конструкции и невосприимчивость к внешним воздействиям; возможность использования во взрывоопасной среде; дешевизна.

Среди рассмотренных типов вышеприведенным требованиям больше всего соответствуют ротаметрические и электромагнитные расходомеры.

Отдельные недостатки ротаметрических расходомеров (ненадежность стеклянной трубки, запотевание смотрового окна, пульсации при скачках давления) в современных конструкциях компенсируют использованием магнитных устройств, глицериновым наполнением.

При всех достоинствах электромагнитных расходомеров следует отметить, что для применения в шахтных условиях они нуждаются в дополнительной взрыво- и помехозащите.

Вывод. Исследования показали, что наиболее подходящими для применения в смесительно-нагнетательной установке являются электромагнитные и ротаметрические расходомеры благодаря их точности измерения, малому сопротивлению потоку, высокой надежности и быстродействию, широкому диапазону измеряемых расходов жидкости и простоте конструкции, а также невосприимчивости к внешним воздействиям.

Использование расходомера для непрерывного дозирования подачи воды в смеситель обеспечит соблюдение технологических параметров и нормальный режим работы смесительно-нагнетательной установки при приготовлении и перекачивании гипсового раствора, что позволит более эффективно и качественно выполнять работы по изоляции пожарных участков при ведении аварийно-спасательных работ в подземных условиях.

Список литературы / References

1. Агеев В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В.Г. Агеев.– Донецк: Арпи, 2014.–338 с.
Ageyev, V.G. (2014). *Vzryvozashchita pri izolyatsii pozharov v ugolnykh shakhtakh* [Explosion protection by isolation of fires in coal mines]. Donetsk, Arpi, 338 p.
2. Агеев В.Г. Пути совершенствования оборудования для изоляции участков при пожарах в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пейтибай // Научный вестник УкрНИИПБ. –2012. – № 1 (25). – С. 60 – 67.
Ageyev, V.G. and Peftibay, G.I. (2012). *Puti sovershenstvovaniya oborudovaniya dlya izolyatsii uchastkov pri pozharakh v shakhtakh* [Ways of improvement of equipment for isolation of districts by fires in mines], *Nauchnyy vestnik UkrNIIPB*, no. 1 (25), pp. 60 – 67.
3. Расходомеры пара, жидкости и газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: http://eclicon.ru/?page_id=1392.
Raskhodometry para, zhidkosti i gaza [Steam, liquid and gas meters] Available at: http://eclicon.ru/?page_id=1392.
4. Виды, устройство и принцип действия расходомеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: <http://www.devicesearch.ru/article/rashodomeri>.
Vidy, ustroystvo i printsip deystviya raskhodomerov [Types, structure and operating principle of flow meters] Available at: <http://www.devicesearch.ru/article/rashodomeri>.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 27.04.2015

Purpose. Determination of the water meter type that is the most efficient by pumping the rapid-hardening mortars.

Methods. Information investigations of devices for measurements of water consumption for the use in the force mixing plant by preparation and pumping of the mortars on the basis of gypsum binding materials and analysis of their technical parameters.

Results. The main types of water consumption control devices and their parameters that are most efficient for the metered water supply into the force mixing plant by various conditions of the use were determined.

Practical value. The application of the flow meter for continuous metering the water supply into the mixer guarantees compliance with technological parameters necessary, what allows achievement of the normal operation conditions of the force mixing plant for the pumping of the rapid-hardening mortars.

Keywords: mine, isolation, hydromechanical method, equipment, control of water consumption.

УДК 622.822:622.411.33

*В.И. Лебедев, канд. техн. наук, Ю.В. Лебедева, ст. науч. сотр.
НИИГД «Респиратор», Донецк*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ГАЗОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВЫЕМОЧНОМ УЧАСТКЕ

*V. I. Lebedev, Cand. Sci. (Tech.), Yu. V. Lebedeva, Senior Research Associate
(NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

EXPERIMENTAL METHOD OF ESTIMATION OF GAS CONDITIONS IN A MINING DISTRICT

Цель. Разработать метод оценки газовой обстановки во время аварийного отключения или выхода из строя систем отвода метана из горных выработок (дегазации и газоотсоса) в ходе тушения подземных пожаров.

Методика. Информационно-аналитические и экспериментальные исследования.

Результаты. Разработан экспериментальный метод оценки газовой обстановки на выемочном участке после отключения системы дегазации или газоотсоса.

Научная новизна. Метод учитывает особенности выемочного участка, обладает более высокой достоверностью по сравнению с существующими методами.

Практическая значимость. Экспериментальный метод позволяет более надежно по сравнению с существующими аналитическими методами прогнозировать газовую обстановку в выемочных участках после отключения систем дегазации и газоотсоса.

Ключевые слова: пожар, дегазация, выемочный участок, метан, эксперимент, оценка, загазованность.

Постановка проблемы. В выемочных участках, где невозможно методами вентиляции обеспечить концентрацию метана в границах установленных норм, применяют системы дегазации и газоотсоса. В случае возникновения в них пожара возможна ситуация, когда указанные системы могут выйти из строя или их могут отключить из-за угрозы взрыва [1]. Согласно Правилам безопасности в угольных шахтах должны быть заранее разработаны методы управления этими системами в случае пожара.

Анализ последних публикаций. Существует расчетный метод оценки газовой обстановки на выемочных участках после отключения систем дегазации и газоотсоса [2], когда влияние горно-технических факторов (система разработки, способ охраны выработок, глубина их залегания и др.) учитывают, используя среднестатистические коэффициенты. Применение указанного метода на практике показало, что в ряде случаев он дает недопустимо большую погрешность.

Цель работы. Возникает необходимость в разработке более надежного способа оценки газовой обстановки на выемочном участке после отключения системы дегазации или газоотсоса, что позволит принимать заранее меры по предотвращению взрывоопасных ситуаций и травмирования людей.

Материалы и результаты исследований. После остановки системы дегазации или газоотсоса аэродинамические параметры горных выработок существенно изменяются: больше поступает метана в вентиляционные выработки и выработанное пространство, изменяется расход воздуха в выработках, увеличивается концентрация метана в них и возможность образования слоевых скоплений метана [1, 3].

Основные положения нового метода заключаются в следующем.

1. В угольных шахтах проверку влияния отключения систем дегазации и газоотсоса осуществляют после изменения режимов их работы или изменения режима вентиляции не реже чем раз в полгода.

2. Для того чтобы оценить влияние отключения дегазации (газоотсоса) на газовую обстановку выемочного участка необходимо определить:

- объем метана, выделяющегося на выемочном участке после прекращения всех работ, связанных с выемкой угля;
- дополнительный объем метана, поступающего в действующие выработки после отключения систем дегазации и газоотсоса;
- длительность переходного процесса;
- наличие слоевых скоплений метана.

3. Измерения концентраций метана и скорости движения воздуха осуществляют в следующих пунктах выемочного участка:

- в вентиляционной выработке (на расстоянии 20...30 м от лавы);
- в конце вентиляционной выработки (по ходу вентиляционной струи).

Измерения начинают не раньше чем через 1 ч после прекращения всех работ, связанных с выемкой угля, и производят в нормальном режиме работы дегазации. После отключения дегазации измерения осуществляют с интервалом 30...40 мин. При необходимости, можно ввести дополнительные измерительные станции.

4. Наличие слоевых скоплений метана обнаруживают путем измерения концентрации метана под кровлей вентиляционной выработки согласно «Инструкции по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану» (Киев, 2004).

5. Отключение системы дегазации и газоотсоса приводит к переходному процессу, длительность которого обычно равна 1,5...2 ч. Если за это время концентрация метана не стабилизировалась, то его увеличивают.

6. По окончании измерений вычисляют значения параметров, указанных в п. 2, по следующим формулам.

Расход метана в пунктах наблюдения вычисляют по формуле

$$I_i = 0,6Sv_iC_i,$$

где I_i – расход метана в пунктах измерения, м³/мин;

S – площадь поперечного сечения выработки в пункте измерения, м²;

v_i – скорость движения воздуха в выработке, м/с;

C_i – объемная доля метана, %.

Дополнительный расход метана в пункте измерения после отключения систем дегазации и газоотсоса вычисляют по формуле

$$\Delta I_i = I_{\max} - I_n,$$

где ΔI_i – дополнительный расход метана в пункте измерения после отключения систем дегазации и газоотсоса, м³/мин;

I_{\max} – максимальное зафиксированное значение расхода метана в пункте измерения, м³/мин;

I_n – среднее значение расхода метана в пункте измерения в нормальных условиях, м³/мин.

7. Если во время проведения измерений объемная доля метана в действующих выработках достигнет 2 %, то эксперимент прекращают и возобновляют нормальную работу системы дегазации и газоотсоса. После этого разрабатывают мероприятия по увеличению подачи свежего воздуха на выемочный участок.

8. Мероприятия по увеличению расхода воздуха на выемочном участке разрабатывают с использованием средств вычислительной техники и материалов депрессионной съемки. При этом принимают, что необходимый расход воздуха равен

$$Q_d = \frac{100(I_b + I_c)}{C_d},$$

где Q_d – необходимый расход воздуха на выемочном участке после отключения системы дегазации и газоотсоса, м³/мин;

I_b – расход метана, который отводят из выемочного участка вентиляцией после прекращения выемочных работ и при нормальной работе системы дегазации и газоотсоса, м³/мин;

I_c – расход метана, который отводят из выемочного участка системы дегазации и газоотсоса, м³/мин;

C_d – допустимая объемная доля метана; принимают 2 %.

9. Эффективность мероприятий по увеличению подачи воздуха на выемочный участок проверяют путем их внедрения и измерений расхода воздуха в вентиляционных выработках выемочного участка. В дальнейшем выполняют работу согласно пп. 1–4.

10. По результатам проверки составляют акт проверки аварийных вентиляционных режимов, в котором приводятся данные, указанные в п. 2. Акт подписывают в установленном порядке и хранят вместе с планом ликвидации аварии.

Выводы. Практическое опробование разработанного экспериментального метода оценки газовой обстановки на выемочном участке после отключения системы дегазации или газоотсоса на нескольких шахтах Донбасса показало, что этот метод позволяет получить более достоверную информацию об аэрогазовых процессах, происходящих после отключения вышеуказанных систем, по сравнению с существующим расчетным методом. Это предоставляет возможность заранее разрабатывать и принимать, при необходимости, меры по предотвращению взрывоопасных ситуаций в ходе тушения подземных пожаров горноспасателями.

Список литературы / References

1. Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных аварий методами вентиляционного воздействия / С.Н. Смоланов. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 272 с.

Smolanov, S.N. (2002). *Likvidatsiya slozhnykh podzemnykh avariy metodami ventilyatsionnogo vozdeystviya* [Elimination of the complicated underground accidents by means of the ventilation influence methods]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye, Ukraine, 272 p.

2. Устав ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ. – Киев, 1997. – 223 с.

Ustav GVGSS po organizatsii i vedeniyu gornospasatelnykh robot [Regulation of the State Para-military Mine-rescue Service on organization and carrying-out the mine-rescue operations] (1997). Kiev, 223 p.

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

Pashkovskiy, P.S. and Lebedev, V.I. (2012). *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines by underground fires]. Donetsk, Arpi, 448 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 24.07.2015

Purpose. To develop the method of estimation of the gas conditions during emergency shutoff or failure of the systems of methane withdrawal from mine workings (degassing and gas-suction) in the course of fighting the underground fires.

Methodology. Information-analytical and experimental investigations.

Results. The experimental method of estimation of the gas conditions in the mining district after disconnection of the degassing system or gas-suction was developed.

Scientific novelty. The method takes into account peculiarities of the mining district, possesses the higher trustworthiness in comparison with the existing methods.

Practical value. The experimental method permit us to predict the gas conditions in the mining districts after disconnection of the degassing system or gas-suction more reliably in comparison with the existing analytical methods.

Keywords: fire, degassing, mining district, methane, experiment, estimation, gas content.

УДК [622.489:621.391.3]:622.867

Г.И. Пефтибай, нач. отд., А.В. Чапкович, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОВОДНОЙ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЙ СВЯЗИ

*G.I. Peftibay, head of department, A.V. Chapkovich, scientific associate
(NIIGD “Respirator”, Donetsk)*

MODERNIZATION OF THE WIRE MINE-RESCUE COMMUNICATION

Цель. Определение путей и способов модернизации существующей аппаратуры проводной горноспасательной связи.

Методы. Информационные исследования разработок аппаратуры проводной связи для горноспасателей.

Результаты. Предложены пути модернизации средств проводной горноспасательной связи.

Практическая значимость. Улучшение эксплуатационных характеристик аппаратуры проводной горноспасательной связи.

Ключевые слова: линия связи, полоса пропускания, помехоустойчивость, коэффициент усиления, горноспасатели.

Введение. Горноспасательная связь предназначена для оперативного управления работами по спасению людей и ликвидации аварии. Средства горноспасательной связи, проводной и индуктивной (высокочастотной), применяют в случае невозможности использования стационарной шахтной связи, вышедшей из строя вследствие аварии.

Проводную горноспасательную связь устанавливают между подземной базой, организуемой вблизи места аварии, и абонентскими аппаратами подразделений Государственной военизированной горноспасательной службы (ГВГСС). Данный вид связи применяют ввиду высокой помехоустойчивости и стабильности работы вне зависимости от степени разрушения инфраструктуры и инженерных коммуникаций горных выработок, таких, как телефонные и силовые кабели, контактные провода и пр. Ее применение целесообразно при проведении разведки, так же при выполнении работ по ликвидации аварий, имеющих затяжной характер. При установившихся горноспасательных работах в зонах задымления возвращение отделения на базу происходит с ориентированием по проложенному проводу, что значительно ускоряет передвижение.

Состояние вопроса. В настоящее время для организации горноспасательной связи в подразделениях ГВГСС применяют разработанную НИИГД «Респиратор» аппаратуру проводной громкоговорящей связи «Уголек», обеспечивающую двустороннюю симплексную громкоговорящую связь между базой и отделением с возможностью одновременного прослушивания производственных шумов и связь между аппаратом базы и аппаратом отделения в горных выработках на расстоянии до 5 км.

В качестве линии связи для данной аппаратуры используют провод катушки горноспасательной связи КСГ, также могут быть использованы провода в изоляции с сечением жил 0,35; 0,50 мм² с суммарным активным сопротивлением не более 1500 Ом.

Передача сообщения складывается из формирования сигнала, передачи сигнала по линии связи, приема и преобразования сигнала. Линия связи имеет определенные ограничения, обусловленные первичными параметрами, влияющими на такие важные характеристики, как дальность связи, полоса пропускания, нелинейные искажения при передаче речевой информации, время непрерывной работы автономного источника электропитания аппаратуры.

К первичным параметрам следует отнести электрические (см. таблицу) и физические параметры линии связи. Электрические параметры определены опытным путем на стадии экспериментальных исследований посредством измерений с помощью Q -метра и измерителя частотных характеристик.

Физические параметры определены расчетным путем исходя из условий развертывания и прокладки проводов линии связи [1].

Электрические параметры линии связи

| Марка провода | Активное сопротивление R , Ом/км | Емкость $C \cdot 10^{-6}$, пФ/км | Индуктивность $L \cdot 10^{-4}$, Гн/км | Проводимость $G \cdot 10^{-6}$, См/км |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| ГСП 2×0,35 | 540 | 23 | 2 | 5 |
| ГСП 2×0,5 | 160 | 18 | 3 | 4 |

Наиболее приемлемый способ прокладывания линии связи – подвешивание проводов на крепь. Однако в реальных условиях ведения аварийно-спасательных работ горноспасатели прокладывают кабельную линию связи по почве горных выработок.

Физические параметры передачи двухпроводных линий определяют из выражений [2, 3]

$$\dot{\gamma} = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}; \quad (1)$$

$$\dot{Z}_B = \sqrt{(R + i\omega L)/(G + i\omega C)}, \quad (2)$$

где $\dot{\gamma}$ – коэффициент распространения;

α – погонный коэффициент затухания линии связи, мНп/км;

β – коэффициент фазы, ...°/с;

R – погонное активное сопротивление линии связи, Ом/км;

L – погонная индуктивность линии связи, мГн/км;

- G – погонная проводимость изоляции линии связи, мкСм/км;
 C – погонная емкость линии связи, нФ/км;
 Z_B – волновое сопротивление линии связи, Ом.

Затухание в проводной линии связи α , дБ/км, определяют по формуле [3]

$$\alpha = 20 \lg (U_{\text{вх}}/U_{\text{вых}}), \quad (3)$$

где $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ – входное и выходное напряжения линии, имеющей волновое сопротивление $Z_0 = 118$ Ом, В.

Для приближенного расчета затухания сигнала в зависимости от частоты для провода ГСП 2×0,35 получена зависимость

$$\alpha = 18,3 + 0,09f. \quad (4)$$

На момент разработок существующей аппаратуры проводной горноспасательной связи протяженность линии в шахтах была принята равной 5 км.

С целью передачи максимума активной мощности от источника к приемнику сигнала со стороны АБ использовали трансформатор.

Передаточную характеристику линии связи $\dot{K}(\omega)$ определяют согласно выражению [2, 3]

$$\dot{K}(\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (5)$$

Модуль передаточной функции $K(\omega)$ определяют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент $\varphi(\omega)$ – фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

Искажения импульсных сигналов в цепях различных типов линий связи в основном обусловлены неравномерностью АЧХ.

Вследствие более сильного затухания высокочастотных гармонических составляющих сигналов в линии связи (см. рисунок, кривая 3) наиболее сильные искажения претерпевают фронты импульсов.

В результате на выходе линии происходит сглаживание фронтов, т.е. увеличение длительности импульсов.

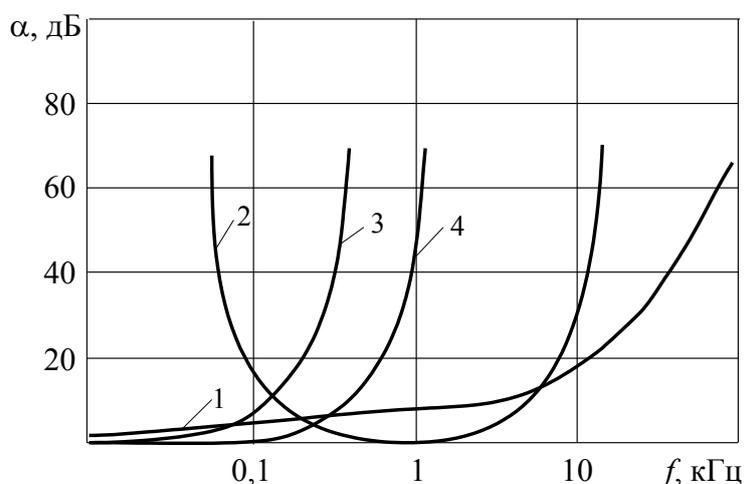
Условие неискаженной передачи импульсных сигналов по линии определяет требование сохранения его формы, при этом допустимо лишь изменение масштаба и сдвиг во времени. В ходе экспериментальных исследований установлено, что при длине линии связи 5 км и использовании провода ГСП 2х0,35 реальный импульс минимальной длительности равен 0,05 мс.

Также были проведены испытания с целью определения возможности передачи речи в звуковом диапазоне частот с помощью широтно-импульсной

модуляции, т.е. усилителей класса D (см. рисунок, кривая 2). Преимущества усилителей класса D – в высоком КПД и возможности передачи сигнала в высокочастотном диапазоне [4].

Однако практика выявила существенный недостаток использования усилителей класса D для передачи сигнала по двухпроводной линии. При отсутствии информации происходит потребление энергии за счет емкостной нагрузки, которую представляют собой провода линии связи.

Передаточные характеристики канала проводной связи, рассчитанные по приведенной выше методике и подтвержденные экспериментально, представлены на рисунке.



Распределение спектра частот канала связи аппаратуры «Уголек»:
 1 – частотное затухание линии связи, равное 1 км; 2 – частотная характеристика звукового усилителя; 3 – спектр частот цифровой передачи информации;
 4 – спектр частот при максимальной длительности импульса

В дальнейшем аппаратура «Уголек» послужила прототипом для создания семейства более поздних модификаций комбинированной аппаратуры проводной связи, совместивших в себе, помимо функции горноспасательной связи, расширенные функциональные возможности ряда аппаратных средств. К таким видам аппаратуры следует отнести «Уголек-Т» и «Шахтофон-Т».

Аппаратура «Уголек-Т» конструктивно и схемотехнически совмещает функции устройства проводной связи с дальностью до 5 км, электронного таймера и дистанционного измерителя температуры в пределах от 20 до 55 °С и объемом таймера 999 мин. Для измерения температуры в труднодоступных местах в диапазоне 20...100 °С в состав аппаратуры включены два выносных преобразователя температуры с длиной соединительных проводов 10 м.

В аппаратуре «Шахтофон-Т» совмещены функции горноспасательной связи (характеристики аналогичны характеристикам аппаратуры «Уголек») с измерением температуры в месте проведения горноспасательных работ, а также учет интегрального времени пребывания горноспасателей в условиях высоких температур (от 27 до 50 °С). Данные о допустимой и предельной

продолжительности работ горноспасателя в условиях повышенной температуры содержатся в работе [5] в виде таблиц. Принцип измерения интегрального времени в функции температуры окружающей среды заимствован у таймер-термосигнализатора, в основу работы которого положен генератор, управляемый напряжением (ГУН). ГУН генерирует прямоугольные импульсы с частотой, увеличивающейся в функции повышения температуры, измеряемой измерительным каналом прибора. В результате преобразования и пересчета накопленных прямоугольных импульсов аппаратно вычисляется значение ресурса времени, отработанного горноспасателем в зоне повышенной температуры, а также оставшегося ресурса времени. Т.е. чем выше температура окружающей среды в зоне проведения горноспасательных работ, тем меньше предельно допустимое время нахождения горноспасателя в данной зоне.

Следует отметить, что проведение горных работ в современных условиях постоянно усложняется. Увеличение глубины разработки, протяженности горных выработок современных угольных предприятий, сложность залегания угольных пластов приводят к увеличению вероятности возникновения аварий и их масштабов, увеличивают риск для жизни и здоровья горноспасателей. Это в свою очередь заставляет менять тактику ведения горноспасательных работ и предъявляет новые требования к оснащению подразделений ГВГСС, в том числе и средствами связи. Таким образом, в настоящее время становится актуальным вопрос поиска путей модернизации существующей аппаратуры проводной горноспасательной связи для приведения ее в соответствие с современными условиями ведения горноспасательных работ. Модернизацию аппаратуры проводной горноспасательной связи следует осуществлять в двух параллельных направлениях – физическую и эргономическую. Целью модернизации является улучшение эксплуатационных характеристик аппаратуры горноспасательной связи, таких, как увеличение дальности связи, минимизация габаритов и массы приборов, входящих в комплект аппаратуры, увеличение времени автономной работы источника электропитания, оптимизация существующих функций, улучшение удобства использования.

Выводы. Модернизация средств связи может быть осуществлена за счет применения современной элементной базы электронных компонентов более высокой степени интеграции без изменения функциональной топологии устройства или улучшения эксплуатационных характеристик посредством усовершенствований функциональной топологии, таких, как улучшение характеристик звукового тракта усилителя, дооснащение аппаратуры элементами hands free – проводная (беспроводная) гарнитура, применение современных обрабатываемых аккумуляторных источников электропитания большей емкости, чем используемые в базовых образцах.

Список литературы / References

1. Проводная горноспасательная связь в среде с горючими газами / В.П. Выскубенко, А.Л. Костоманов, Л.В. Красюк, Е.П. Сапунов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С.123 – 128.

Vyskubenko, V.P., Kostomanov, A.L., Krasnyuk, L.V. and Sapunov, Ye.P. (2008). *Provodnaya gornospasatel'naya svyaz' v srede s goryuchimi gazami* [The mine-rescue wire communication in the environment with fire gases]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue Work"]. Donetsk, issue 45, pp. 123 – 128.

2. Теория электрической связи / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржин, М.В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.

Zyuko, A.G., Klovskiy, D.D., Korzhin, V.I. and Nazarov, M.V. (1999). *Teoriya elektricheskoy svyazi* [The theory of the electric coupling]. Moscow, Radio i svyaz', 432 p.

3. Кунегин С.В. Системы передачи информации / С.В. Кунегин. – М.: В/ч 33965, 1997. – 317 с.

Kunegin, S.V. (1997). *Sistemy peredachi informatsii* [Data communication systems]. Moscow, V/ch 33965, 317 p.

4. Транзисторные усилители низкой частоты / сост. О.А. Морозов. – Нижний Новгород: Нижегородский ун-т, 2010. – 30 с.

Morozov, O.A. (2010). *Tranzistornyye usiliteli nizkoy chastoty* [Low frequency transistor amplifiers]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskiy Univ., 30 p.

5. Нормирование безопасной продолжительности работы горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях / Н.С. Диденко, В.В. Карпекин, А.П. Юрьев, В.И. Костюкова // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1995. – С. 84 – 89.

Didenko, N.S., Karpekin, V.V., Yuryev, A.P. and Kostyukova, V.I. (1995). *Normirovaniye bezopasnoy prodolzhitel'nosti raboty gornospasateley v ekstremalnykh mikroklimaticheskikh usloviyakh* [Rate setting of the safe active time of mine rescuers under extreme microclimatic conditions]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 84 – 89.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.Г. Богатырёвым.
Дата поступления рукописи 20.05.2015

Purpose. Determination of ways and methods of modernization of the existing mine-rescue wire communication equipment.

Methods. Information investigations of products of the mine-rescue wire communication equipment for the mine-rescuers.

Results. The ways of modernization of the wire mine-rescue communication means were proposed.

Practical value. Improvement of the operating characteristics of the mine-rescue wire communication equipment.

Keywords: communication line, pass-band, noise stability, amplification coefficient, mine rescuers.

УДК [622.867.322:621.56-032.24]:001.891.573

В.М. Медгаус, нач. отд., А.А. Клычков, науч. сотр., О.В. Папазова, ст. науч. сотр., Н.Н. Попов, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ ВОДЯНОГО ЛЬДА В ХОЛОДИЛЬНИКЕ РЕСПИРАТОРА

V.M. Medgaus, head of department, A.A. Klychkov, scientific associate, O.V. Papazova, senior scientific associate, N.N. Popov, scientific associate (NIIGD “Respirator”, Donetsk)

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF THE WATER ICE HEATING IN A COOLER OF A BREATHING APPARATUS

Цель. Прогнозирование динамики температуры водяного льда и определение возможности применения других веществ в холодильнике изолирующего регенеративного респиратора.

Методика. Построение математической модели в виде системы дифференциальных уравнений и совокупности граничных условий процесса нагревания водяного льда в холодильнике изолирующего регенеративного респиратора.

Результаты. Исследован процесс нагревания водяного льда в холодильнике изолирующего регенеративного респиратора на основе принятой расчетной схемы. Разработана математическая модель данного процесса, учитывающая влияние температуры окружающей среды, внутреннего пространства респиратора, его геометрических, теплофизических параметров и массы.

Научная новизна. Разработанная математическая модель позволяет определить эффективность хладагентов и материалов с улучшенными теплофизическими характеристиками и геометрическими параметрами для снижения скорости градиента температуры холодильника и увеличить время его использования.

Практическая значимость. Результаты исследования дают возможность вычислять эффективное время работы холодильника регенеративного респиратора при различных условиях внешней среды и конструкции респиратора.

Ключевые слова: изолирующий регенеративный респиратор, холодильник респиратора, фазовые превращения, теплопроводность, математическая модель.

Постановка проблемы. Как следует из проведенных ранее исследований, некоторые химические вещества, обладающие свойством фазовых превращений, могут быть использованы в респираторах для охлаждения вдыхаемого воздуха. Естественным преимуществом таких веществ является удельная теплота фазового превращения одного агрегатного состояния в другое.

Наибольшее распространение для использования в холодильниках респираторов получил водяной лед.

Исследования показали, что в респираторе Р-30 с применением холодильника на основе водяного льда при температуре окружающей среды плюс 40 °С температура вдыхаемого воздуха может быть снижена максимум на плюс 8 °С и в среднем за два часа на плюс 6 °С. То есть при использовании водяного льда в качестве хладагента в респираторе Р-30 удалось в течение

100 мин поддерживать температурный режим вдыхаемого воздуха на уровне его применения при температуре окружающей среды, равной плюс 25 °С.

Основная техническая характеристика – время использования респиратора с водоледающим холодильником – получена ранее на основании экспериментальных исследований без учета влияния изменения температуры окружающей среды, внутреннего пространства респиратора, его геометрических и теплофизических параметров и массы, возможности использования теплоизолирующей оболочки [1, 2] для снижения скорости градиента температуры холодильника.

Цель исследования – прогнозирование динамики температуры водяного льда и определение возможности применения других веществ в холодильнике изолирующего регенеративного респиратора.

Изложение основного материала. Проведем исследования процесса нагревания и таяния льда на основании принятой впервые расчетной схемы и разработанной математической модели, которые приведены ниже.

Так как холодильник имеет цилиндрическую форму (рис. 1), то динамику температуры в нем опишем системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial \tau} = a_{\text{п}}^2 \frac{\partial^2 T_{\text{п}}}{\partial r^2}; & r \in (-\delta_0; 0) \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} = \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2}; & r \in (0; x) \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \bar{a}^2 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2}; & r \in (x; R), \end{cases} \quad (1)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура в корпусе респиратора, К;

τ – период нагревания льда, с;

$a_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности корпуса респиратора, м²/с;

$a_{\text{п}}^2 \approx 1,87 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

r – координата, отсчитываемая от поверхности холодильника, по нормали к нему, к его центру, м;

δ_0 – толщина оболочки холодильника, м;

\tilde{T} – температура воды, К;

\tilde{a} – коэффициент теплопроводности воды, м²/с; $\tilde{a}^2 \approx 1,30 \cdot 10^{-7}$ м²/с;

x – значение координаты на границе фазового превращения льда в воду, м;

\bar{T} – температура льда, К;

\bar{a} – коэффициент теплопроводности льда, м²/с; $\bar{a}^2 \approx 1,23 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

R – радиус основания холодильника, м.

Считаем, что координата фронта фазового превращения является функцией времени: $x = x(t)$.

Принимаем следующие начальные условия:

$$T_{\text{п}}(r,0) = T_0; \quad \bar{T}(r,0) = T_0 - \Delta_0; \quad x(0) = 0, \quad (2)$$

где T_0 – нормальная (стандартная) температура, К; $T_0 = 293$ К;

Δ_0 – разность между нормальной температурой и начальной температурой льда, К.

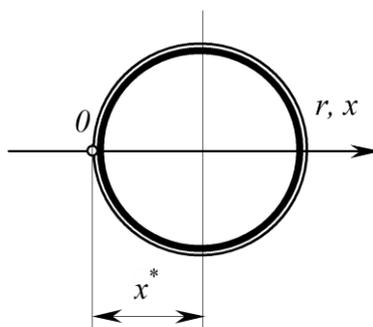


Рис. 1. Расчетная схема холодильника:
 $x^* = R$ – предельная глубина фронта плавления льда, м

Фактически температура в корпусе респиратора с течением времени отличается от нормальной. Однако предполагаем, что температура холодильника, как и температура его оболочки, будет меняться в малые дискретные моменты времени, в пределах которых температуру в корпусе респиратора можно считать постоянной.

На поверхности холодильника зададим граничные условия третьего рода:

$$\alpha_3 (T_{\text{п}} \Big|_{r=-\Delta r} - \bar{T} \Big|_{r=0}) = -\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (3)$$

где α_3 – коэффициент теплообмена между корпусом респиратора и холодильником, Вт/(м²·К);

Δr – элементарное (бесконечно малое) расстояние от поверхности холодильника, м;

$\tilde{\lambda}$ – теплопроводность воды, Вт/(м·К); $\tilde{\lambda} \approx 0,544$ Вт/(м·К).

На границе фазового превращения температура воды и льда равна температуре плавления льда $\dot{T} = 273$ К = 0 °С:

$$\tilde{T} \Big|_{r=x} = \bar{T} \Big|_{r=x} = \dot{T}, \quad (4)$$

а разность тепловых потоков пропорциональна скорости продвижения границы фазовых превращений:

$$\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} - \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \eta \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где $\eta \approx 3,06 \cdot 10^8$ Дж/м³ – удельная теплота фазового превращения.

Так как

$$\alpha_3 \left(T_{\Pi} \Big|_{r=-\Delta r} - \tilde{T} \Big|_{r=0} \right) = \alpha_3 \Delta r \frac{T_{\Pi} \Big|_{r=-\Delta r} - \tilde{T} \Big|_{r=0}}{\Delta r} = -\lambda_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (6)$$

где λ_{Π} – теплопроводность корпуса респиратора; $\lambda_{\Pi} \approx 0,024$ Вт/(м·К), то после подстановки формулы (6) в (3) для поверхности холодильника получим граничное условие четвёртого рода

$$\lambda_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=0} = \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \Big|_{r=0}, \quad (7)$$

которое следует дополнить условием непрерывности температурного поля

$$T_{\Pi}(0, \tau) = \tilde{T}(0, \tau). \quad (8)$$

Тогда общее решение уравнений (1) представим в виде

$$T_{\Pi} = A_{\Pi} + B_{\Pi} \psi(z_{\Pi}); \quad \tilde{T} = \tilde{A} + \tilde{B} \psi(\tilde{z}); \quad \bar{T} = \bar{A} + \bar{B} \psi(\bar{z}), \quad (9)$$

где $A_{\Pi}, B_{\Pi}, \tilde{A}, \tilde{B}, \bar{A}, \bar{B}$ – определяют из краевых условий;

$\psi(z) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$ – интегральная функция или так называемая функция ошибок $erf(z)$;

$z_{\Pi} = \frac{r}{2a_{\Pi} \sqrt{\tau}}$; $\tilde{z} = \frac{r}{2\tilde{a} \sqrt{\tau}}$ и $\bar{z} = \frac{r}{2\bar{a} \sqrt{\tau}}$ – значения безразмерной пространственной координаты в пределах корпуса респиратора, жидкой и твёрдой фаз холодильника соответственно.

Из граничного условия (4) с учётом (9) следует, что

$$\tilde{A} + \tilde{B} \psi\left(\frac{x}{2\tilde{a} \sqrt{\tau}}\right) = \bar{A} + \bar{B} \psi\left(\frac{x}{2\bar{a} \sqrt{\tau}}\right) = \dot{T}. \quad (10)$$

Поскольку в правой части выражения (10) константа \dot{T} отсутствует – левая часть уравнения не должна зависеть от координаты и времени, а это возможно при условии

$$x = 2\dot{a}\sqrt{\tau}, \quad (11)$$

где $\dot{a} = \text{const}$ – коэффициент пропорциональности, м/ $\sqrt{\text{с}}$; то на основании (5), в соответствии с уравнениями (10) и (11) для определения \dot{a} получаем следующее уравнение:

$$\frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \tilde{B} e^{-\frac{\dot{a}^2}{\tilde{a}^2}} - \frac{\bar{\lambda}}{\bar{a}} \bar{B} e^{-\frac{\dot{a}^2}{\bar{a}^2}} = \sqrt{\pi\eta\dot{a}}. \quad (12)$$

Решение этого уравнения может быть получено только численными (итерационными) методами. Коэффициенты решения уравнения (9) определяем в следующем порядке.

Из первого начального условия (2), с учётом, что при $r \leq 0$ и $\tau \rightarrow 0$: $\psi \rightarrow -1$, следует

$$A_{\Pi} = T_0 + B_{\Pi}, \quad (13)$$

далее, на основании (7):

$$\frac{\lambda_{\Pi}}{a_{\Pi}} B_{\Pi} = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \tilde{B}, \text{ тогда } B_{\Pi} = \tilde{b} \tilde{B}, \quad (14)$$

где обозначено $\tilde{b} = (\tilde{\lambda} a_{\Pi}) / (\lambda_{\Pi} \tilde{a})$.

Равенство температуры корпуса респиратора и холодильника у поверхности (7) для решения (8) будет выполняться, если

$$\tilde{A} = A_{\Pi}, \quad (15)$$

откуда после подстановки выражения (14) в (13), а затем (13) в (15) получим

$$\tilde{A} = T_0 - B_{\Pi} = T_0 - \tilde{b} \tilde{B}. \quad (16)$$

Связь между \bar{A} и \bar{B} определяем из второго начального условия (2):

$$\bar{A} = T_0 - \Delta_0 - \bar{B}. \quad (17)$$

С учётом (16) и (17) на основании (10) для определения \tilde{B} и \bar{B} получаем систему уравнений

$$\begin{cases} T_0 - \tilde{b}\tilde{B} + \psi(\dot{a}/\tilde{a}) = \dot{T}; \\ (T_0 - \Delta_0 - \bar{B}) + \bar{B} + \psi(\dot{a}/\bar{a}) = \dot{T}, \end{cases} \quad (18)$$

из которой следует:

$$\tilde{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})}; \quad \bar{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})}. \quad (19)$$

В результате уравнение (12) для определения \dot{a} преобразуем к следующему виду:

$$\dot{a} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\eta\sqrt{\pi}} \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \left[\frac{1}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})} e^{-\dot{a}^2/\tilde{a}} - \bar{b} \frac{1 - \bar{\Delta}_0}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})} e^{-\dot{a}^2/\bar{a}} \right], \quad (20)$$

где

$$\bar{b} = \frac{\tilde{\lambda}\tilde{a}}{\tilde{\lambda}\bar{a}}; \quad \bar{\Delta}_0 = \frac{\Delta_0}{T_0 - \dot{T}}. \quad (21)$$

Таким образом, для проведения расчётов температуры холодильника по формулам (9) необходимо вначале определить параметр \dot{a} фронта фазовых превращений из уравнения (21), затем рассчитать \bar{B} , \tilde{B} , $B_{\text{п}}$ по формулам (19), (14) и \bar{A} , \tilde{A} , $A_{\text{п}}$ – по выражениям (17), (16), (15). Моделирование динамики температурного поля по глубине холодильника необходимо начинать с определения положения границы фазовых превращений по формуле (11) в заданный момент времени. Расчёты производим до момента, когда начнется таяние льда в холодильнике.

Результаты расчета динамики температуры холодильника t на расстоянии h от его поверхности, в частности, при максимальной температуре в корпусе респиратора, равной 48 °С; $R = 120$ мм, $\delta_0 = 1,2$ мм (материал оболочки – алюминий); масса льда 1,0 кг; при влажности воздуха, равной 100 %, приведены на рис. 2.

При этом получено значение $\dot{a} \approx 8,5 \cdot 10^{-5}$ м·с^{1/2} и период таяния

$$\tau^* = \frac{x^{*2}}{4\dot{a}^2}, \quad (22)$$

равен от 95 до 100 мин. Погрешность расчёта – отношение абсолютного значения разницы между левой и правой частями уравнения (20) к значению функции правой части – соответственно составила 1,7 и 1,2 %.

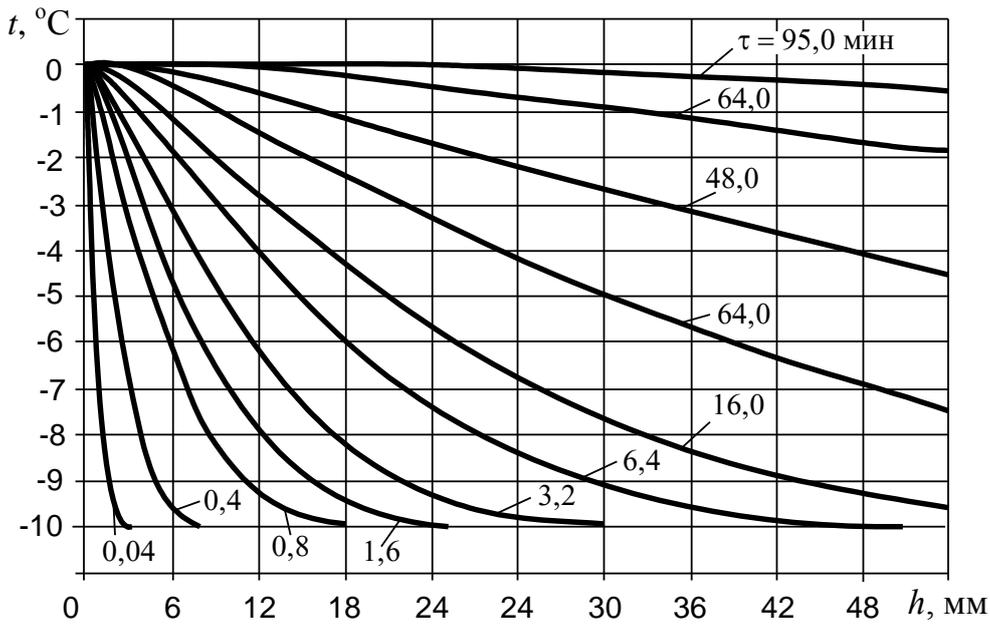


Рис. 2. Динамика температуры холодильника при $T_0 = 48\text{ }^\circ\text{C}$

Для исследования динамики температуры воды в холодильнике после таяния льда ($\tau \geq \tau^*$) используем второе уравнение системы (1) в виде

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{\tau}} = \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{r}^2}, \quad (23)$$

где $\tilde{\tau} = \tau - \tau^*$ – время с момента завершения периода таяния льда, с;

$\tilde{r} = R - r$ – координата, отсчитываемая от оси холодильника в радиальном направлении к его поверхности, м, с начальным условием

$$T(\tilde{r}, 0) = \dot{T} \quad (24)$$

и граничными условиями

$$-\tilde{\lambda}_3 \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = \tilde{\alpha}_3 \left(\left. \tilde{T} \right|_{\tilde{r}=0} - T_{\text{п}} \right); \quad \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=R} = 0, \quad (25)$$

где $\tilde{\lambda}_3 \neq \lambda_3$ и $\tilde{\alpha}_3 \neq \alpha_3$ – коэффициенты теплопроводности холодильника и теплообмена между корпусом респиратора и холодильником после завершения периода нагревания льда.

Решение этого уравнения с представленными краевыми условиями имеет вид

$$\tilde{T}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = \dot{T} + (T_{\text{п}} - \dot{T}) \left[1 - \frac{1}{4} \left(1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \dot{A} e^{-\dot{A} \tilde{Fo}} \right], \quad (26)$$

где $\tilde{Fo} = \frac{a^2 \tilde{\tau}}{R^2}$ – относительное значение времени (число Фурье);

$\tilde{\xi} = \frac{\tilde{r}}{R}$ – относительная пространственная координата;

$\tilde{Bi} = \frac{\tilde{\alpha}_3}{\tilde{\lambda}_3}$ – число Био;

$$\dot{A} = \frac{6\tilde{Bi}(\tilde{Bi} + 4)}{\tilde{Bi}^2 + 6\tilde{Bi} + 12}. \quad (27)$$

Результаты одного из вариантов расчётов безразмерной (избыточной) температуры воды при $\tilde{Bi} = 1,0$ в диапазоне $\tilde{Fo} = 0,1 \dots 3,0$ приведены на рис. 3, где

$$\tilde{t}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = 1 - \frac{1}{4} \left(1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \dot{A} e^{-\dot{A} \tilde{Fo}}. \quad (28)$$

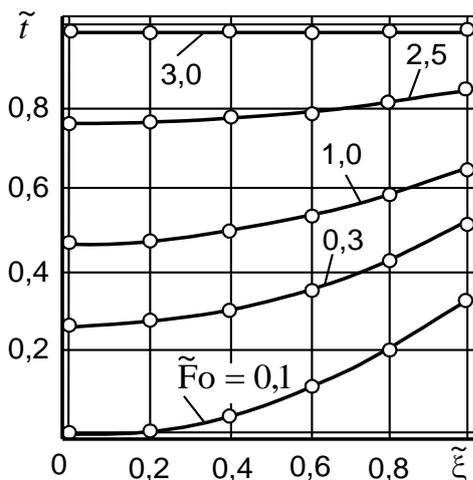


Рис. 3. Динамика температуры нагревания воды в холодильнике:
 $\tilde{Bi} = 1; \tilde{Fo} = 0,1 \dots 3,0$

Получено, что при вышеуказанных исходных данных, время нагревания воды до температуры 25 °С, при которой происходит охлаждение органов дыхания горноспасателей, равно 10 мин. Следовательно, общее время охлаждающего действия – от 105 до 110 мин, что подтверждает ранее полученные экспериментальные данные о времени применения холодильника респиратора.

Выводы

1. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать динамику температуры холодильника в процессе нагревания льда и после его завершения (нагревание воды в нем).

2. На основе разработанной математической модели можно учесть возможность применения других химических веществ и материалов с улучшенными теплофизическими характеристиками и геометрическими параметрами для снижения скорости градиента температуры холодильника, что может позволить увеличить время его использования.

Список литературы / References

1. Землянский И.Я. Костюмы с криогенной системой охлаждения / И.Я. Землянский, В.И. Землянский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 181 – 190.

Zemlyanskiy, I.Ya. and Zemlyanskiy, V.I. (2000). *Kostyumu s kriogennoy sistemoy okhlazhdeniya* [Suits with cryogenic cooling]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 181 – 190.

2. Индивидуальная противогазотепловая защита / Ю.Ф. Булгаков, С.В. Борщевский, И.Ф. Марийчук и др. – Донецк, 2015. – 386 с.

Bulgakov, Yu.F., Borshchevskiy, S.V., Mariychuk, I.Ph., etc. (2015). *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita* [Individual gas and heat protection]. Donetsk, 386 p.

Рекомендовано к публикации канд. хим. наук А.В. Кибальным.
Дата поступления рукописи 03.06.2015

Purpose. Prognostication of dynamics of the water ice temperature and determination of possibility of the use of other substances in the cooler of the self-contained regenerative breathing apparatus.

Methodology. Construction of the mathematical model in the form of the differential equation system and the whole set of boundary conditions of the process of the water ice heating in the cooler of the regenerative breathing apparatus.

Results. The process of the water ice heating in the cooler of the self-contained regenerative breathing apparatus was investigated on the basis of a design diagram adopted. The mathematical model of the process given was worked out taking into account influence of environmental temperature, internal space of the breathing apparatus, its geometrical, thermalphysic parameters and mass.

Scientific novelty. The mathematical model worked out permits to determine the efficiency of cooling agents and materials with improved thermalphysic characteristics and geometric parameters to decrease the velocity of the temperature gradient of the cooler and to increase the time of its use.

Practical value. The results of the investigation enable to calculate the effective operation time of the cooler of the regenerative breathing apparatus under various environmental conditions and by different design of the breathing apparatus.

Keywords: self-contained regenerative breathing apparatus, cooler of the breathing apparatus, phase transformations, thermal conductivity, mathematical model.

УДК 622.822.2:614.844.5

Д.И. Момот, науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ

D.I. Momot, scientific associate (NIIGD "Respirator", Donetsk)

DEVICE FOR GENERATION OF GAS MECHANICAL FOAM

Цель. Получение газомеханической пены в сеточных пеногенераторных установках и устройствах для профилактики и тушения эндогенных пожаров в шахтах.

Методика. Базирована на принципе получения газомеханической пены при прохождении раствора пенообразователя через сетку.

Результаты. Создано принципиально новое устройство для получения газомеханической пены.

Новизна. Приведен пример получения газомеханической пены при подаче на сетку раствора пенообразователя и газа с различных сторон.

Практическая значимость. Рассмотренное устройство позволяет изменять кратность получаемой пены непосредственно во время работы, исключено засорение пеногенерирующей сетки.

Ключевые слова: газомеханическая пена, эндогенный пожар, пеногенераторная установка, пеногенерирующая сетка, кратность пены.

Постановка проблемы. Для предупреждения и тушения эндогенных пожаров, особенно в выработанном пространстве угольных пластов, имеющих склонность к самовозгоранию, используют газомеханическую пену [4]. Подача пены под давлением по трубопроводам и скважинам в труднодоступные места осуществляется при помощи специально разработанных для этих целей установок и устройств. По принципу действия установки подразделяют на такие, в которых получение пены осуществляется на сетках, и бессеточные.

В сеточных пеногенераторных установках образование газомеханической пены происходит при набрызгивании на сетку раствора пенообразователя и одновременном продувании через сетку газа. Однако в этих установках зачастую происходит срыв процесса генерирования пены ввиду нарушения некоторых условий:

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

В существующих сеточных пеногенераторных установках и устройствах (УЛЭП-2, «Экран», ВГПУ-12, УПГВ) потоки водного раствора пенообразователя и сжатого газа поступают вместе с одной стороны на пеногенерирующую сетку. Для улучшения качества пены в водный раствор пенообразователя подмешивают стабилизирующие добавки. В силу технических причин не всегда возможно использование шахтного пожарно-оросительного трубопровода для подачи воды. Проблему водоснабжения для получения раствора пенообразователя в ряде случаев можно решить, используя шахтные сточные воды. Однако, когда

такой раствор подают через распылитель (форсунку) на пеногенерирующую сетку, то, во-первых, загрязняется распылитель, во-вторых, стабилизирующие примеси и твердые частицы, содержащиеся в воде, налипают на сетку. Сжатый воздух, который поступает в направлении потока водного раствора пенообразователя, способствует прижатию этих частиц к пеногенерирующей сетке и не в состоянии протолкнуть их через сетку. В связи с этим сетка загрязняется, уменьшается сечение ее ячеек и процесс генерирования пены прекращается. После чего загрязненную сетку вынимают из кассеты, очищают от мусора и грязи, затем устанавливают на место в устройство и работа по получению газомеханической пены продолжается.

Чистка сетки и распылителя – операция сложная, трудоёмкая и требующая значительных затрат времени.

Цель исследования. Разработать высоконапорную самоочищающуюся пеногенераторную установку.

Материалы и результаты исследований. Для устранения вышеперечисленных ограничений процесса пеногенерации в существующих пеногенераторных установках было разработано устройство для получения газомеханической пены ПВТ. В отличие от существующих сеточных пеногенераторных установок и устройств ПВТ является регулируемым, самоочищающимся, высоконапорным пеногенераторным устройством, что позволило не только увеличить эффективность и безопасность тушения подземных пожаров, но и значительно расширить область применения пеногенераторов.

В этом устройстве поток раствора пенообразователя со стабилизирующими добавками поступает в разделитель потоков и с помощью распылителя равномерно набрызгивается на внутреннюю поверхность пенообразующей сетки. Количество подаваемого раствора пенообразователя определяет регулировка зазора между клапаном и разделителем потока за счет продольного перемещения его при вращении рукоятки. Одновременно сжатый газ попадает в полость корпуса и далее на внешнюю поверхность сетки. В результате чего создается газомеханическая пена, которую по пенопроводу транспортируют к очагу подземного пожара. Наличие разделителя потоков водного раствора пенообразователя и сжатого газа позволяет подавать раствор и сжатый газ по разные стороны пеногенерирующей сетки. Вследствие этого стабилизирующие добавки пенообразователя и твердые частицы, содержащиеся в неочищенной шахтной воде, попадающие на сетку, сдуваются потоком сжатого газа, поступающего с противоположной стороны сетки, чем предотвращается залипание и загрязнение сетки [5].

Такое конструктивное решение устройства для получения газомеханической пены повышает надежность его работы, упрощается обслуживание и удобство использования.

На протяжении длительного времени промышленного использования устройства для ликвидации подземных пожаров было замечено, что для тушения подземных пожаров нужна газомеханическая пена с необходимой

кратностью. На устройство подавали нужное количество пенообразующего раствора и сжатого газа, отношение которых является кратностью пены:

$$K_{\Pi} = Q_{\Gamma} / Q_{\text{р}},$$

где Q_{Γ} – расход подаваемого в устройство газа, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{р}}$ – расход пенообразующего раствора, $\text{м}^3/\text{с}$.

Однако определенные полученные экспериментальным путем значения кратности пены отличались от расчетных в сторону их увеличения. Такое явление негативно влияет на процесс тушения, так как возникает необходимость в дополнительном расходе пенообразующего раствора для получения пены с расчетной кратностью.

Для определения причины данного негативного явления, возникающего в устройстве при получении пены, проведены экспериментальные исследования процесса генерирования пены данным устройством. На лабораторном стенде был установлен пеногенератор с присоединенным к нему пенопроводом и системой подачи строго дозированного количества сжатого газа и раствора пенообразователя. В процессе работы пеногенератора при постоянном расходе сжатого газа на него подавали расчетное количество раствора пенообразователя, необходимого для получения пены с расчетной кратностью. Однако при заданных параметрах количества пенообразующего раствора и сжатого газа кратность полученной пены была выше расчетной.

Так, на графиках (рис. 1) показаны зависимости кратности пены от расхода пенообразующего раствора при постоянной подаче газа компрессорной установкой, равной $V_{\Gamma} = 0,0418; 0,083; 0,125$ и $0,166 \text{ м}^3/\text{с}$. На графиках сплошной линией показана теоретическая, а пунктирной линией – экспериментальная зависимости.

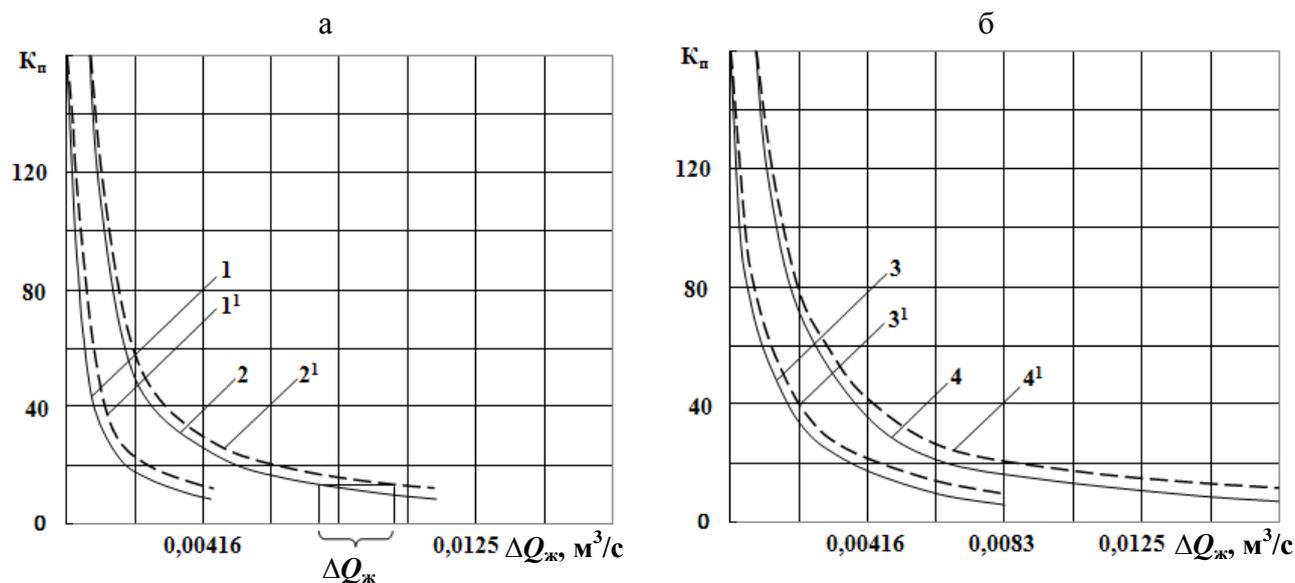


Рис. 1. Зависимости кратности пены от расхода подаваемого в устройство раствора пенообразователя:

а – $V_{\Gamma} = 0,0418$ и $0,083 \text{ м}^3/\text{с}$; б – $V_{\Gamma} = 0,125$ и $0,166 \text{ м}^3/\text{с}$;

— — теоретическая зависимость; - - - - экспериментальные данные

Анализируя полученные зависимости, видим, что при получении пены с кратностью, равной 10, необходимое количество пенообразующего раствора соответствует значению A на теоретической кривой 2. Однако полученная экспериментальным путем кратность пены выше и соответствует значению $A1$. Таким образом, видно, что часть раствора пенообразователя $\Delta Q_{ж}$ не участвует в процессе образования пены, а выносится пенным потоком. С повышением кратности пены при данной производительности компрессора потери пенообразующего раствора уменьшаются; это связано с тем, что для увеличения кратности пены уменьшают подачу пенообразующего раствора уменьшением щели в регулирующем клапане, в связи с этим давление пенообразующего раствора перед регулирующим клапаном возрастает и поток раствора пенообразователя с большой скоростью попадает на сетку.

Была поставлена задача создать устройство для получения газомеханической пены, в котором наличие нового узла позволит весь пенообразующий раствор генерировать в пену с необходимой кратностью.

Для решения этой задачи разработано устройство для получения газомеханической пены, включающее цилиндрический корпус с фланцами и подводы раствора пенообразователя и сжатого газа, пеногенерирующую сетку и форсунку (распылитель) [2]. Разделитель потоков установлен в корпусе устройства между каналами потоков водного раствора пенообразователя и сжатого газа, причем разделитель потоков и сетка выполнены в виде полых усеченных конусов, меньшими основаниями прикрепленных друг к другу, а большими основаниями по всему периметру – к корпусу; при этом распылитель выполнен в виде клапана, установленного на выходе разделителя потоков, а канал подвода сжатого газа расположен между разделителем потоков и сеткой, в соответствии с изобретением оборудованный дополнительной пеногенерирующей сеткой, выполненной в виде полого усеченного конуса, меньшее основание которого закреплено на запорном элементе клапана, а большее основание – расположено в цилиндрическом корпусе с созданием между ними кольцевой щели.

Наличие второй конусной сетки, установленной на клапане распылителя, позволяет полностью уловить водный раствор пенообразователя, который не принял участия в образовании пены на первой сетке. Если раствор пенообразователя приготовлен с использованием шахтной неочищенной воды и стабилизирующих добавок, то они сдуваются сжатым газом и попадают на поверхность второй конусной сетки. Водный раствор пенообразователя, который не принял участия в генерации пены на первой сетке, генерируется в пену на второй сетке, стабилизирующие примеси и твердые частицы попадают на поверхность второй сетки и сдуваются с неё сжатым газом через кольцевую щель, созданную между цилиндрическим корпусом устройства и большим основанием второй конусной сетки, и попадают в пенопровод.

Таким образом, такое конструктивное решение устройства для получения газомеханической пены устраняет лишние потери водного раствора пенообразователя и повышает надежность работы устройства (рис. 2).

Предлагаемое устройство работает следующим образом.

Корпус устройства фланцем соединяется с напорным пенопроводом. К штуцерам 11 и 12 соответственно подают сжатый газ и водный раствор пенообразователя. Последний поступает до середины полости разделителя потоков и с помощью распылителя равномерно распределяется на внутренней поверхности пенообразующей сетки 8. Количество подаваемого раствора пенообразователя определяет регулировка зазора между распылителем и разделителем потоков за счет продольного перемещения втулки при вращении рукоятки винта.

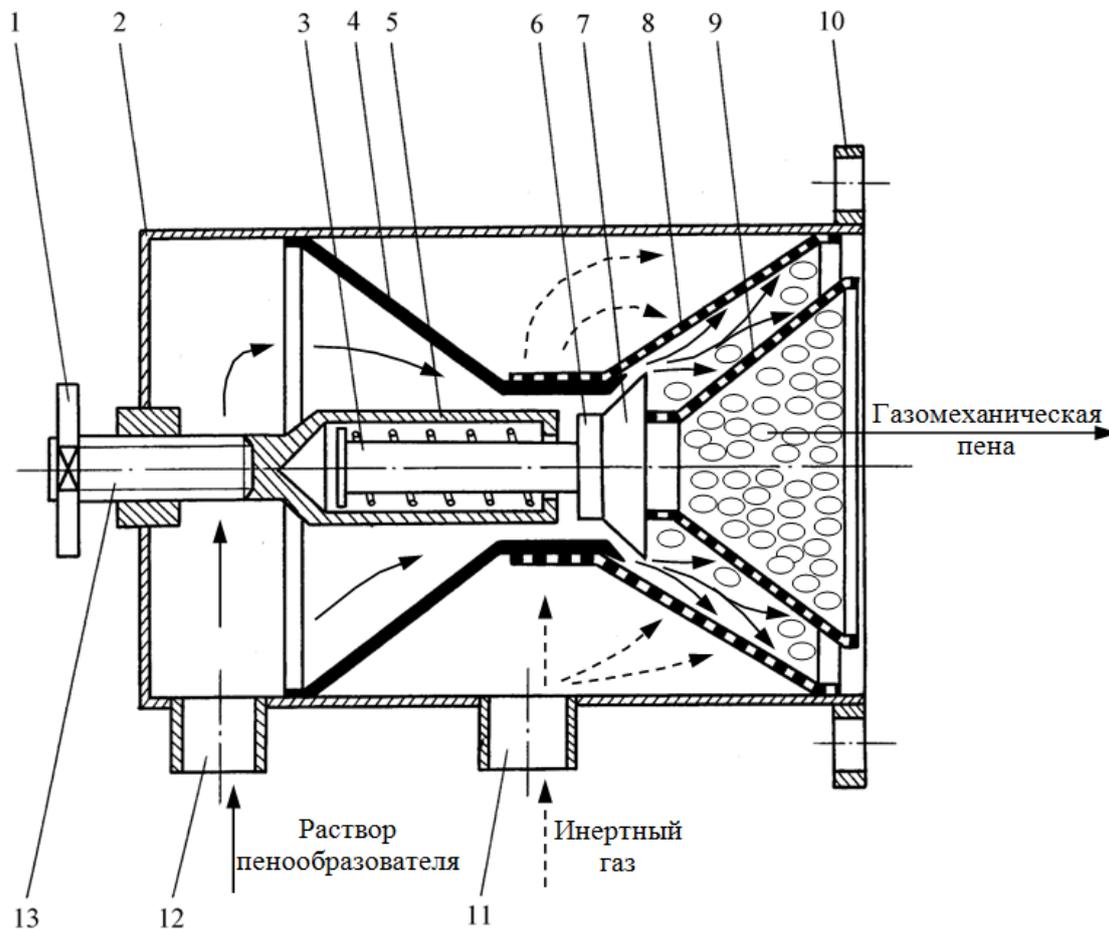


Рис. 2. Общий вид устройства для получения газомеханической пены:

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

Одновременно сжатый газ из штуцера 11 попадает в полость корпуса и далее на внешнюю поверхность сетки 8, в результате чего образуется газомеханическая пена. Твердые частицы грязи, стабилизирующие добавки и,

частично, раствор пенообразователя сдуваются с пеногенерирующей сетки 8 и попадают на внешнюю поверхность сетки 9, затем через кольцевую щель выносятся в пенопровод. Не участвующий в процессе генерации пены водный раствор пенообразователя с сетки 8 попадает на сетку 9 и генерируется в пену, которая далее по пенопроводу транспортируется к очагу подземного пожара.

При загрязнении выходного отверстия распылителя повышается давление раствора пенообразователя, под действием которого подпружиненный шток перемещается, увеличивая выходное отверстие, в результате чего твердые частицы выносит поток раствора пенообразователя, устраняя тем самым затруднения работы распылителя [1, 3].

В зависимости от стадии пожара изобретение позволяет полностью отрабатывать водный раствор пенообразователя в пену нужной кратности. Для этого вращением рукоятки перемещают запорный элемент, меняя размер выходного отверстия распылителя.

Выводы. Предложенное техническое решение позволяет в полном объеме использовать водный раствор пенообразователя для создания пены требуемой кратности, регулировать кратность пены непосредственно при работе устройства, исключить засорение пеногенерирующих сеток, упростить обслуживание пеногенерирующего устройства и повысить удобство его эксплуатации.

Список литературы / References

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

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

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

Momot, D.I. (2005). *Obosnovaniye konstruktivnykh parametrov penogeneratora napornogo trubnogo* [Substantiation of design parameters of the pressure piped foam generator]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats'/ LDU BZhD* [Proc. of the LDU BZhD "Fire safety"]. Lviv, no. 7, pp. 78 – 84.

3. Пат. 61615 Україна, МПК⁷ А62 С 5/02, Е21 F 5/02. Пристрій для одержання газомеханічної піни / Е.А. Попов, П.С. Пашковський, Д.І. Момот; заявл. і патентовл. НДІГС «Респиратор». – № 2003032316; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9 від 15.09.2005.

Popov, E.O., Pashkovskiy, P.S., and Momot, D.I. (2005). *Prystrii dlia oderzhannia gazomekhanichnoi piny* [Device for generation of the gas mechanical foam]. Patent Ukraine, no. 61615.

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

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. and Zinchenko, I.N. (2012). *Aktualnyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya: sb. nauch. tr.* [Proc. "Actual problems of control of spontaneous combustion of coal"]. Donetsk, Arpi, 656 p.

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

Popov, E.A. and Momot, D.I. (2003). *Eksperimental'nyye issledovaniya polucheniya peny v trubnykh setochnykh penogeneratorakh* [Experimental investigations of production of foam in the net piped foam generators]. *Sovershenstvovaniye tekhnologii stroitel'stva shakht i podzemnykh sooruzheniy: sb. nauch. tr.* [Proc. "Improvement of the technology of construction of mines and underground installations"]. Donetsk, Nord-press, pp. 38 – 41.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.А. Чернышевым.
Дата поступления рукописи 17.06.2015

Purpose. Generation of the gas mechanical foam in the net foam generating installations and devices for prevention and fighting the spontaneous fires in mines.

Methodology. The methodology is based on the principle of generation of the gas mechanical foam by passage of the foaming agent solution through the net.

Results. The in the main new device for generation of the gas mechanical foam is obtained.

Novelty. The example of generation of the gas mechanical foam by feeding of the foaming agent solution and gas on the net from various sides is adduced.

Practical value. The device under consideration permits to change the expansion ratio of the generating foam directly during the operation, the obstruction of the foam generating net is ruled out.

Keywords: gas mechanical foam, spontaneous fire, foam generating net, foam expansion ratio.

УДК 622.868.3:622.41

Ю.Н. Перехрест, аспирант, А.В. Мавроди, ведущий инж. НИИГД «Респиратор», Донецк

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕХОДНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ИЗОЛИРОВАННОМ АВАРИЙНОМ УЧАСТКЕ ШАХТЫ

Yu.N. Perekhrest, postgraduate student, A.V. Mavrodi, leading engineer (NIIGD "Respirator", Donetsk)

DURATION OF THE TRANSIENT AERODYNAMIC PROCESS IN AN ISOLATED EMERGENCY DISTRICT OF A MINE

Цель. Исследование длительности переходного аэродинамического процесса методом математического моделирования. Математическая модель учитывает изменение расхода воздуха в аварийном участке в зависимости от его аэродинамических параметров и температуры.

Методика. Базируется на определении аналитическим путем расхода воздуха после изменения депрессии на участке.

Результаты. Установлены аналитические зависимости длительности переходного аэродинамического процесса на аварийном участке от размеров изолированного пожароопасного участка, сопротивления перемычек и объема выработанного пространства.

Научная новизна. Предложенный метод позволяет определять длительность переходного процесса и расход воздуха в изолированном участке.

Практическая значимость. Данный метод позволяет прогнозировать длительность переходного процесса по расходу воздуха на отдельных участках изолированных выработок.

Ключевые слова: шахта, пожар, аэродинамические процессы, изолированная выработка, переходный период, перемычка, аэродинамическое сопротивление, температура.

Постановка проблемы. На шахтах, опасных по газу, в случае невозможности или неэффективности тушения пожара активным способом при непосредственном и дистанционном воздействии огнетушащими материалами пожар изолируют взрывоустойчивыми перемычками [1]. В период ликвидации пожаров в шахтах возникает необходимость в частичной временной разгерметизации перемычек, изолирующих аварийный выемочный участок, путём открывания вмонтированных в перемычки труб с целью применения средств тушения или охлаждения пород, а также для измерения аэродинамических параметров и отбора проб пожарных газов. При этом расход воздуха в изолированном участке увеличивается (рис. 1). Также при изменении давления воздуха в районе аварийного участка изменяется депрессия на изолирующих перемычках, что может привести к переходному аэродинамическому процессу, продолжительность которого зависит от геометрических параметров изолированного участка, воздухопроницаемости боковых пород и изменения вентиляционного давления.

При уменьшении аэродинамического сопротивления одной или нескольких перемычек изменяется режим проветривания изолированного участка.

Аэродинамические параметры изолированного участка с момента разгерметизации существенно изменяются во времени и в аварийном участке начинается переходный аэродинамический процесс, длительность которого может зависеть от размеров изолированного пожароопасного участка, сопротивления перемычек, объема выработанного пространства и других факторов.

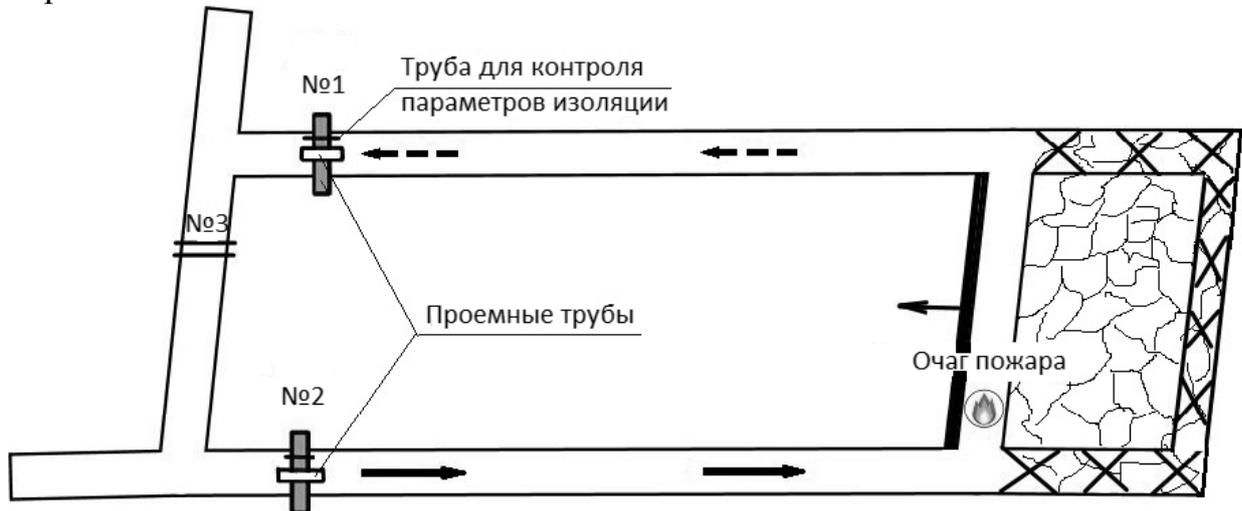


Рис. 1. Схема изолированного пожарного участка

Переход к новому режиму проветривания участка может привести к существенному перераспределению температурного поля и поля концентраций пожарных газов и метана, а также к усилению воздействия тепловой депрессии пожара и термического сопротивления на вентиляционную обстановку. Возрастает угроза развития пожара и расширения зоны поражения по тепловому и газовому факторам за пределы изолирующих перемычек [2]. В этой связи определение длительности переходного периода в изолированном участке – актуальная проблема.

Анализ публикаций. Переходные газодинамические процессы, возникающие при тушении пожаров методом изоляции, определены не полностью. Это, в свою очередь, не позволяет надежно прогнозировать обстановку в ходе ведения аварийно-спасательных работ.

Цель работы. Исследование переходного процесса по расходу воздуха в изолированном участке аварийной выработки после ее изоляции и при разгерметизации.

Изложение результатов исследований. Для того чтобы избежать взрывов в изолированных аварийных участках, необходимо уметь прогнозировать процессы, происходящие в изолированном пространстве, своевременно корректировать параметры, влияющие на взрывоопасность.

Для математического моделирования объекта исследований используют дифференциальное уравнение движения газовых потоков в виде [3]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\lambda}{2d} \rho u^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой среды (воздуха) изолированного участка, кг/м³;
 $u = u(x, t)$ – скорость вентиляционной струи в изолированных выработках, м/с;

$P = P(x, t)$ – давление, Па;

λ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

d – приведенный диаметр выработок участка, м;

x – пространственная координата по длине выработок, м;

τ – время с момента изоляции или разгерметизации участка, с.

При наличии пожара в аварийном участке значительно меняется температура воздуха, а его плотность уменьшается таким образом, что произведение этих величин будет таким, как в первоначальном состоянии [3]:

$$\rho T = \rho_0 T_0, \quad (2)$$

где T – средняя температура на участке, К;

T_0 – температура при нормальных условиях, К;

ρ_0 – плотность при нормальных условиях, кг/м³.

Пренебрегая кинетической энергией – второе слагаемое в левой части уравнения (1) – и вводя в рассмотрение скорость, с учётом (2) вместо (1) получим

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho_0} \times \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\lambda}{2d} \times \frac{T}{T_0} \tilde{u}^2, \quad (3)$$

где $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$ – скорость воздуха, м/с.

Представим в конечных разностях градиент давления в уравнении (3):

$$\frac{\partial P}{\partial x} \approx \frac{P - P_0}{\Delta x} = -\frac{h}{L}, \quad (4)$$

где h – депрессия участка, Па;

L – длина участка, м.

Подставляя выражение (4) в уравнение (3), получим

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tau} = \frac{h}{\rho_0 L} - \frac{\lambda}{2d} \frac{T}{T_0} \tilde{u}^2. \quad (5)$$

Выразим приведенный диаметр выработок участка через их периметр и площадь поперечного сечения: $d = 4S/\Pi$. Тогда уравнение (5) примет вид

$$\frac{\rho_0 L}{S} \frac{\partial Q}{\partial \tau} = h - R \frac{T}{T_0} Q^2, \quad (6)$$

где $Q = \tilde{u}S = \rho u S / \rho_0$ – расход воздуха, м³/с;

$$R = \frac{\lambda \rho_0 \Pi L}{8 S^3} = \frac{\alpha \Pi L}{S^3} \text{ – аэродинамическое сопротивление, Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6;$$

α – коэффициент аэродинамического сопротивления, Па·с²/м²;

Π – периметр выработки;

S – площадь поперечного сечения выработки, м².

Выделяя из уравнения стационарную часть, найдём ожидаемый расход воздуха при новом режиме проветривания:

$$Q_1 = \text{sign} h_1 \sqrt{\frac{|h_1|}{RT/T_0}}. \quad (7)$$

Ожидаемый расход воздуха на аварийном участке зависит от приложенной депрессии и от направления движения воздушной струи при реверсивном режиме.

Первоначальный расход воздуха может быть задан по такой же формуле (7), но с другим индексом:

$$Q_0 = \text{sign} h_0 \sqrt{\frac{|h_0|}{RT/T_0}}. \quad (8)$$

Для получения аналитического решения представим уравнение (6) в виде

$$\frac{\rho_0 L}{S} \frac{\partial Q}{\partial \tau} = h - R \frac{T}{T_0} (|Q_1| + |Q_2|) Q / 2. \quad (9)$$

В результате интегрирования уравнения (9) найдём зависимость расхода воздуха от времени при переходном аэродинамическом процессе:

$$Q(\tau) = Q_1 + (Q_0 - Q_1) \exp\left(-\frac{RS}{2\rho_0 L} \frac{T}{T_0} (|Q_1| + |Q_2|) \tau\right). \quad (10)$$

Представим полученную формулу (10) в безразмерном виде:

$$\bar{Q}(\tau) = \bar{Q}_1 + (1 - \bar{Q}_1)e^{-\bar{\tau}}, \quad (11)$$

где $\bar{Q}_1 = Q_1 / Q_0$ – относительный расход воздуха после изменения режима проветривания;

$\bar{\tau} = \frac{RS}{2\rho_0 L T_0} (|Q_1| + |Q_2|)\tau$ – безразмерное время с момента изменения режима проветривания.

На рис. 2 представлены результаты расчёта динамики расхода воздуха при закорачивании и реверсировании вентиляционных струй.

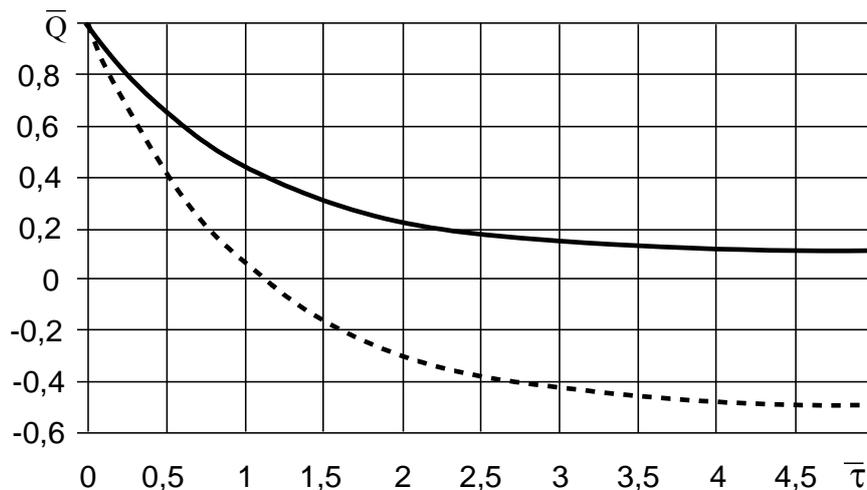


Рис. 2. Переходный аэродинамический процесс при закорачивании (сплошная линия) и реверсировании (штриховая линия) вентиляционной струи

При этом принято, что при закорачивании вентиляционной струи воздух уменьшается в 10 раз, а при реверсировании – составляет половину первоначального значения.

Очевидно, при $\bar{\tau} = 4$ переходный процесс заканчивается, что позволяет определить его время, если известны все исходные данные, предварительно сопоставленные с данными экспериментов. Так, если заранее известны, например, первоначальный и конечный расходы воздуха $Q_0 = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_1 = 1 \text{ м}^3/\text{с}$, известно аэродинамическое сопротивление участка, например, $R = 1,0 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$, длина выработок участка $L = 1000 \text{ м}$ и их площадь поперечного сечения $S = 10 \text{ м}^2$, то время установления нового режима проветривания будет $\tau = 87 \text{ с}$. При уменьшении аэродинамического сопротивления это время увеличится до 5 мин, а при увеличении уменьшится.

Выводы. В результате проведенных исследований получены аналитические зависимости динамики расхода воздуха в переходный период в изолированном участке и его длительности в зависимости от аэродинамических и тепловых параметров этого участка.

Список литературы / References

1. Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных аварий методом вентиляционного воздействия / С.Н. Смоланов. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 272 с.

Smolanov, S.N. (2002). *Likvidatsiya slozhnykh podzemnykh avariy metodom ventilyatsionnogo vozdeystviya* [Elimination of complicated underground accidents by the ventilation influence method]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye, 272 p.

2. Устав ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ. – Киев, 1997. – 453 с.

Ustav GVGSS po organizatsii i vedeniyu gornospasatelnykh robot [Regulations of the State Para-military Mine-rescue Service on organization and carrying-out the mine-rescue operations] (1997). Kiev, 453 p.

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

Pashkovskiy, P.S. and Lebedev, V.I. (2012). *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines by underground fires]. Donetsk, Arpi, 448 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 03.07.2015*

Purpose. Investigation of duration of the transient aerodynamic process by means of the mathematical model approach. The mathematical model takes into account change of the air consumption in the emergency district depending on its aerodynamic parameters and temperature.

Methodology. The methodology is based on determination of air consumption after change of depression in the district by the analytical way.

Results. The analytical dependences of duration of the transient aerodynamic process in the emergency district were ascertained on dimensions of the isolated fire-hazardous district, resistance of the stoppings and volume of the waste.

Scientific novelty. The method proposed allows determining the duration of the transient process and air consumption in the isolated district.

Practical value. The method given permits to forecast the duration of the transient process on air consumption in the separate districts of the isolated mine workings.

Keywords: mine, fire, aerodynamic processes, isolated mine working, transient period, stopping, aerodynamic resistance, temperature

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Для рассмотрения принимаем только научные статьи, которые имеют такие необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами; анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья; формулирование целей статьи (постановка задачи); изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в этом направлении.

Текст рукописи статьи (7–8 страниц, включая таблицы, рисунки) разместить на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее и нижнее 20 мм, левое 25 мм и правое 20 мм. Страницы не нумеровать (нумерацию выполнить карандашом), на последней странице – подписи авторов. Рукопись статьи оформить с применением редактора Win Word (не ниже версии 7.0), шрифтом Times New Roman, кегль 14, распечатать в одном экземпляре с высоким качеством печати (через полтора интервала) без переносов.

Порядок оформления: слева, не отступая от верхнего поля, печатать УДК; инициалы и фамилии авторов (не более четырех), сведения об ученой степени, звании, должности, месте работы; наименование организации, населенного пункта, название статьи печатать прописными буквами (жирным шрифтом) без переносов, аннотация и ключевые слова (5–15). Сведения, содержащиеся в заглавии, не следует повторять в тексте аннотации. Избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения не приводятся.

Каждый графический объект (рисунок, график, схема, фотография) следует представлять с разрешением не менее 300 dpi в формате *.gif, *.jpg. Все позиции, обозначения и надписи, показанные на рисунке, должны быть набраны печатными буквами, позиции – расположены по часовой стрелке и объяснены. Под каждым рисунком указывается его номер и название. Рекомендуются, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла 20...25 % общего объема статьи.

Формулы и математические знаки должны быть понятны, показатели степени и индексы – меньше основных знаков. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля) только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом межстрочный интервал увеличивается на 6 пунктов. Латинские буквы выполняются курсивом, а русские, греческие буквы и функции – прямо. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы должны иметь название, порядковый номер и располагаться после первого упоминания в тексте. Желательный объем таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не больше 10 источников, изданных не раньше чем за 20 лет) должен быть приведен в конце статьи в соответствии с принятым стандартом. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Необходимо представить электронную копию статьи.

Статьи, которые не соответствуют указанным требованиям, не будут рассмотрены.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Основатель и издатель

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

Подписано к печати 18.09.2015. Формат 60×84/8. Тираж 400 экз.
Усл. печ. л. 12,5. Заказ № 622

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 83048
Телефоны: 311-69-52; 311-31-47
E-mail: niigd@mail.ru

Отпечатано в типографии «Норд Компьютер»
83003, Донецк, ул. Разенкова, 6
Тел. +380 66 558 36 63
E-mail: nordpress@gmail.com

АСПИРАНТУРА
НИИГД «Респиратор»

Контакты:

тел. +38(062)311-69-52

факс (062)311-69-43

e-mail: niigd@mail.ru

ПЕРЕЧЕНЬ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ
АСПИРАНТУРЫ

Технические науки

05.26.01 – охрана труда

21.26.02 – безопасность в чрезвычайных
ситуациях

05.26.03 – пожарная и промышленная
безопасность