



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

№ 3 (53)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2016

УДК 614.8”363”+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 3 (53). – 120 с.

Изложены результаты исследований в области защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях, техногенной безопасности, предупреждения и тушения пожаров на шахтах, создания горноспасательной техники, спасения людей при подземных авариях. Журнал включен ВАК ДНР в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (заключение президиума ВАК Министерства образования и науки ДНР от 19.07.2016 № 14/19).

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

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

Утверждено к печати решением ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 6 от 30.06.2016).

Редакционная коллегия:

| | |
|------------------|--|
| канд. техн. наук | В.Г. Агеев – главный редактор |
| д-р техн. наук | П.С. Пашковский – заместитель главного редактора |
| д-р техн. наук | Ю.Ф. Булгаков |
| д-р техн. наук | С.П. Высоцкий |
| д-р техн. наук | С.С. Гребёнкин |
| д-р техн. наук | С.П. Греков |
| д-р техн. наук | А.Ф. Долженков |
| д-р техн. наук | С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь) |
| д-р техн. наук | В.Г. Игишев (Российская Федерация) |
| д-р техн. наук | В.В. Мамаев |
| д-р техн. наук | Ф.В. Недопекин |
| д-р техн. наук | Д.Ю. Палеев (Российская Федерация) |
| д-р техн. наук | Г.П. Стариков |
| канд. техн. наук | В.С. Харьковский (Республика Казахстан) |

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (договор № 157-03/2016 от 23.03.2016).

Журнал зарегистрирован Министерством информации ДНР 07.12.2015.
Свидетельство о госрегистрации № 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-technical journal

No. 3 (53)

Published quarterly

Found in 1970

Donetsk
2016

UDC 614.8”363”355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal. – Donetsk, 2016. – No. 3 (53). – 120 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included by the Higher Attestation Commission of the Donetsk People’s Republic in the list of reviewed scientific publications which the basic scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences should be published in (resolution of the presidium of the Higher Attestation Commission of the Department of education and science of the Donetsk People’s Republic from 19.07.2016 no. 14/19).

The materials being published are intended for scientists and specialists concerning with the problems of prevention of emergencies, fighting their consequences, lecturers, postgraduate students and students of institutes of higher education, workers of various industries.

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

Approved for printing according to the decision of the academic council of the NIIGD “Respirator” (proceeding no.6 from 30.06.2016).

Editorial board:

| | |
|--------------------|--|
| Cand. Sci. (Tech.) | V.G. Ageyev – editor-in-chief |
| Dr. Sci. (Tech.) | P.S. Pashkovskiy – deputy editor-in-chief |
| Dr. Sci. (Tech.) | Yu.F. Bulgakov |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.P. Vysotskiy |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.S. Grebyenkin |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.P. Grekov |
| Dr. Sci. (Tech.) | A.Ph. Dolzhenkov |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus) |
| Dr. Sci. (Tech.) | B.G. Igishev (Russian Federation) |
| Dr. Sci. (Tech.) | V.V. Mamayev |
| Dr. Sci. (Tech.) | F.V. Nedopekin |
| Dr. Sci. (Tech.) | D.Yu. Paleyev (Russian Federation) |
| Dr. Sci. (Tech.) | G.P. Starikov |
| Cand. Sci. (Tech.) | V.S. Khar'kovskiy (Republic of Kazakhstan) |

The journal is included in the database of the “Russian Science Citation Index” (РИИЦ) (contract no. 157-03/2016 from 23.03.2016).

The journal is registered by the Ministry of Information of the Donetsk People’s Republic 07.12.2015. State registration certificate no. 348.

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

Кострубицкий А.А.
Влияние избыточного давления на
выходе из сопла на дисперсность капель
жидкости 7

**Агеев В.Г., Стариков Г.П.,
Зинченко И.Н.**
Расчёт максимального давления при
взрыве метанопылевоздушных смесей 14

Богомаз А.М., Дикенштейн И.Ф.
Влияние воздушно-водяной смеси на
температуру в помещении 23

**Пашковский П.С., Греков С.П.,
Всякий А.А., Глушенко К.В.**
Математическое моделирование
формирования полей температур при
самонагревании органических
материалов 36

Мамаев В.В.
Определение кинетических показателей
термодеструкции горючих материалов 47

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

**Стариков Г.П., Старикова И.Г.,
Шажко Я.В., Хашчеватская Н.В.**
Построение физико-химической модели
опасного газообразования при
возгорании угля в пластовых
подготовительных выработках 57

Высоцкий С.П., Гулько С.Е.
Совершенствование технологии
очистки шахтных вод от взвешенных
частиц 70

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

Kostrubitskiy A.A.
Influence of the overpressure at the outlet
from the nozzle on dispersibility of drops of
liquid 7

**Ageyev V.G., Starikov G.P.,
Zinchenko I.N.**
Calculation of the maximum pressure by
explosion of methane-dust-air mixtures 14

Bogomaz A.M., Dikenshteyn I.F.
Temperature reduction in a premise
by supply of the air-water mixture 23

**Pashkovskiy P.S., Grekov S.P.,
Vsyakiy A.A., Hlushenko K. V.**
The mathematical modeling of forming
the temperature fields by the spontaneous
heating of organic materials 36

Mamayev V.V.
Determination of kinetic indices of
thermодestruction of combustible materials 47

II. Safety in emergencies

**Starikov G.P., Starikova I.G.,
Shazhko Ya.V., Khashchevatskaya N.V.**
Making the physicochemical model
of the hazardous gas formation by ignition
of coal in the bedded preparation mine
workings 57

Vysotskiy S.P., Gul'ko S.Ye.
Improvement of the technology of
purification of mine waters from suspended
particles 70

| | | | |
|---|------------|---|--|
| Гребенкин С.С., Коляда А.Ю., Буряк Д.С. Принципы системного подхода к проблеме обеспечения эффективности тушения пожаров в угольных шахтах | 79 | Grebyenkin S.S., Kolyada A.Yu., Buryak D.S. Principles of the system approach to the problem of guaranteeing the effectivity of extinguishing the fires in coal mines | |
| Орликова В.П. Газовый анализ органических веществ при термоокислительной деструкции | 85 | Orlikova V.P. The gas analysis of organic substances by the thermal-oxidative break-down | |
| III. Охрана труда | | III. Labour protection | |
| Шевцов Н.Р., Купенко И.В. Параметры автоматической системы локализации взрывов в вертикальных стволах | 93 | Shevtsov N.R., Kupenko I. V. Parameters of the automatic system of localization of explosions in vertical mine shafts | |
| Пeftибай Г.И., Чернышев В.А., Чайковская Э.Г. Определение основных параметров каркасных опалубок многоразового использования для возведения изолирующих сооружений | 103 | Peftibay G.I., Chernyshyev V.A. Chaykovskaya E.G. Determination of principal parameters of reusable frame sheathings for erection of isolating structures | |
| Плетенецкий Р.С. Обоснование параметров регенеративного патрона | 112 | Pletenetskiy R.S. Increase of effectiveness of the regenerative resource of the oxygen-containing product | |
| Требования к оформлению статьи | 118 | Requirements of execution of an article | |

І. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.844.2

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

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

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

ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ СОПЛА НА ДИСПЕРСНОСТЬ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ

Цель. Определение диаметров капель жидкости над очагом пожара в зависимости от начальной скорости истечения струй и избыточного давления на выходе из сопла.

Методика. Основана на поиске аналитического решения математической задачи движения и распада струй жидкости с образованием капель жидкости.

Результаты. Рассмотрена динамика струи жидкости при её полном распаде с образованием капель жидкости. Получены аналитические зависимости диаметров капель жидкости от скорости истечения струй и избыточного давления на выходе из сопла. Проведены экспериментальные исследования зависимости диаметров капель жидкости от избыточного давления, которые позволили определить эмпирические константы для удовлетворительной сходимости результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научная новизна. Результаты исследования зависимости диаметров капель жидкости при распаде струй от избыточного давления позволяют решить вопрос повышения эффективности системы водяного пожаротушения.

Практическая значимость. Полученные результаты способствуют выбору параметров пожарного водомёта и оценке эффективности воздействия диспергированной воды на очаг пожара.

Ключевые слова: жидкость; прерывистая струя; скорость истечения; избыточное давление; диаметр капель; аналитическая зависимость.

Состояние вопроса. При тушении пожаров водой в помещениях различных зданий необходимо выполнять следующие требования: дальнобойность струи, малый расход воды, максимально возможная площадь покрытия зоны горения, как можно меньший диаметр капель жидкости для получения большой скорости поглощения теплоты и высокого охлаждающего эффекта. Исследования подачи диспергированной жидкости к очагу пожара [1, 2] в потоке воздуха неразрывно связаны с фазовыми переходами (испарением влаги) и характером воздействия на зону горения, где дисперсность капель жидкости играет большую роль. При этом необходимо комплексно учитывать следующие факторы:

- образование двухфазной среды (воздух и капли жидкости) в месте подачи диспергированной жидкости и дальнейшее её движение совместно с воздушным потоком (воздух и пар);
- потери дискретной фазы (капель жидкости) в результате испарения влаги и при столкновении капель со стенами помещения под действием сил тяжести;

- наличие трения непрерывной фазы (жидкости) о стены помещения и, как результат, потери давления;
- наличие теплообмена диспергированной жидкости со стенами и очагом пожара при вступлении с ним в контакт.

Появление жидких частиц в потоке воздуха приводит к необходимости рассмотрения движения трёхкомпонентной двухфазной среды (воздух, пар и капли жидкости). Наиболее существенными особенностями процессов, происходящих в двухфазных средах, следует считать: а) тепловое и механическое взаимодействие фаз между собой и с твёрдыми границами (стенами помещения); б) наличие фазовых переходов (испарение). Наиболее интенсивно эти особенности проявляются при больших температурах на подступах к очагу и в самом очаге пожара.

Специфической особенностью рассматриваемой среды является тот факт, что газ и пар при больших температурах расширяются. Сложность решения таких задач обусловлена ещё возможным многообразием форм существования жидкой фазы (взвешенные мелкие и крупные капли, плёнки жидкости на стенах).

Таким образом, формы движения двухфазных потоков многообразны, а методы обобщённого анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований имеют в этой области большое значение.

Цель исследований. Определение диаметров капель диспергированной жидкости в зависимости от начальной скорости истечения струй и избыточного давления на выходе из сопла для оценки эффективности средств водяного пожаротушения.

Материалы и результаты исследований. Выделим некоторый участок помещения x_n за местом подачи жидкости со струйным истечением капель (рис. 1), за которым под действием сил тяжести они осаждаются на стены помещения.

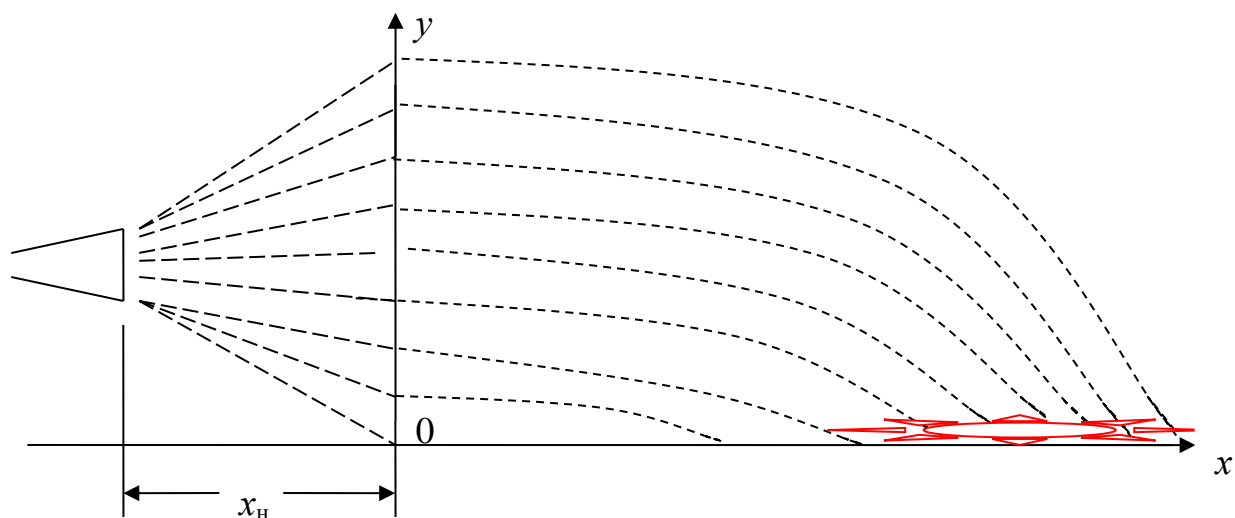


Рис. 1. Схема подачи диспергированной воды к очагу пожара

Для установления максимального диаметра капель жидкости при распаде струй воспользуемся формулой [3]

$$W = \frac{\rho_1(u_0 - u_1)^2 d_{\max}}{2\sigma}, \quad (1)$$

где W – число Вебера;

ρ_1 – плотность воздуха, кг/м³;

u_0 – скорость истечения струи жидкости в атмосферу, м/с;

u_1 – скорость потока воздуха, м/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Па·м;

d_{\max} – максимальный диаметр капель жидкости, м.

При числе Вебера $W = 6$ происходит распад струй [4]. Это даёт возможность определить максимальный диаметр капель жидкости:

$$d_{\max} = \frac{12\sigma}{\rho_1(u_0 - u_1)^2}. \quad (2)$$

Как известно, расход жидкости на выходе из сопла [4] зависит от избыточного давления:

$$G = BF\sqrt{\rho_0\Delta P}, \quad (3)$$

где G – расход воды, кг/с;

B – коэффициент истечения;

F – площадь поперечного сечения отверстия сопла, м²;

ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³;

ΔP – избыточное давление на выходе из сопла, Па.

Так как расход воды $G = \rho_0 u_0 F$, то вместо формулы (3) получим

$$u_0 = B\sqrt{\Delta P/\rho_0}. \quad (4)$$

Поскольку скорость истечения капель жидкости намного больше скорости потока воздуха ($u_0 \gg u_1$), то, подставляя (4) в формулу (2), найдём

$$d_{\max} = \frac{12\sigma\rho_0}{\rho_1 B^2 \Delta P}. \quad (5)$$

Для расчёта минимального диаметра капель жидкости использована формула Никуяма-Таназава [3, 4]:

$$d_{\min} = \frac{a}{(u_0 - u_1)} \sqrt{\sigma / (\rho_0 g)}, \quad (6)$$

где a – эмпирическая константа, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Подставляя в формулу (6) зависимость (4) с учётом того, что $u_0 \gg u_1$, будем иметь

$$d_{\min} = \frac{a}{B} \sqrt{\sigma / (g \Delta P)}. \quad (7)$$

Таким образом, средним диаметром капель следует считать среднегармонический диаметр. Так, считая, что количество капель минимального и максимального диаметра примерно одинаково, найдём согласно уравнениям (2) и (7) их средний диаметр по формуле

$$d_k = \frac{2}{1/d_{\min} + 1/d_{\max}}. \quad (8)$$

Исследования дальности полёта струй жидкости и диаметров её капель проводили на полигоне НИИГД «Респиратор». При этом использовали различные типы серийно выпускаемых сопел, а также диспергатор жидкости конструкции НИИГД. На этом этапе исследований не проводили тушения очага пожара, а изучали лишь дальность полета струи и дисперсность капель жидкости. Высота установки распылителей варьировалась от 1 до 2 м.

Серия экспериментов на поверхности полигона при различных режимах подачи жидкости от пункта её отбора по рукавной линии до испытательного стенда позволила оценить параметры распыливания.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, найденных по формуле (5) для максимального диаметра капель жидкости, представлены на рис. 2. Результаты сравнения экспериментальных и расчётных данных, найденных по формуле (7) для минимального диаметра капель жидкости, представлены на рис. 3. Судя по значениям коэффициентов детерминации для двух построенных моделей $R_1^2 = 0,8906$ (см. рис. 2) и $R_2^2 = 0,9275$ (см. рис. 3), сходимость расчётных и экспериментальных значений максимальных и минимальных диаметров удовлетворительная.

В экспериментах скорость ветра колебалась в пределах 1...3 м/с. Избыточное давление на выходе из сопла изменялось в пределах 0,25...0,8 МПа. В некоторых случаях его принимали равным 1,2...1,4 МПа. Это предоставило возможность установить максимальный и минимальный диаметры капель жидкости и их зависимость от избыточного давления.

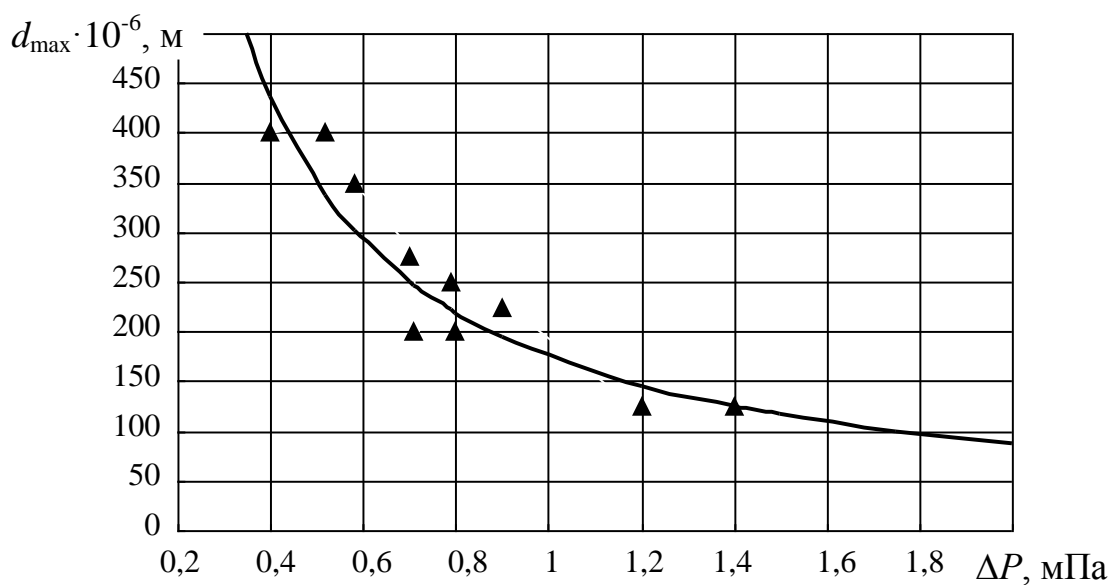


Рис. 2. Зависимость максимального диаметра капель жидкости от избыточного давления (▲ – экспериментальные данные, сплошная линия – аналитическая кривая)

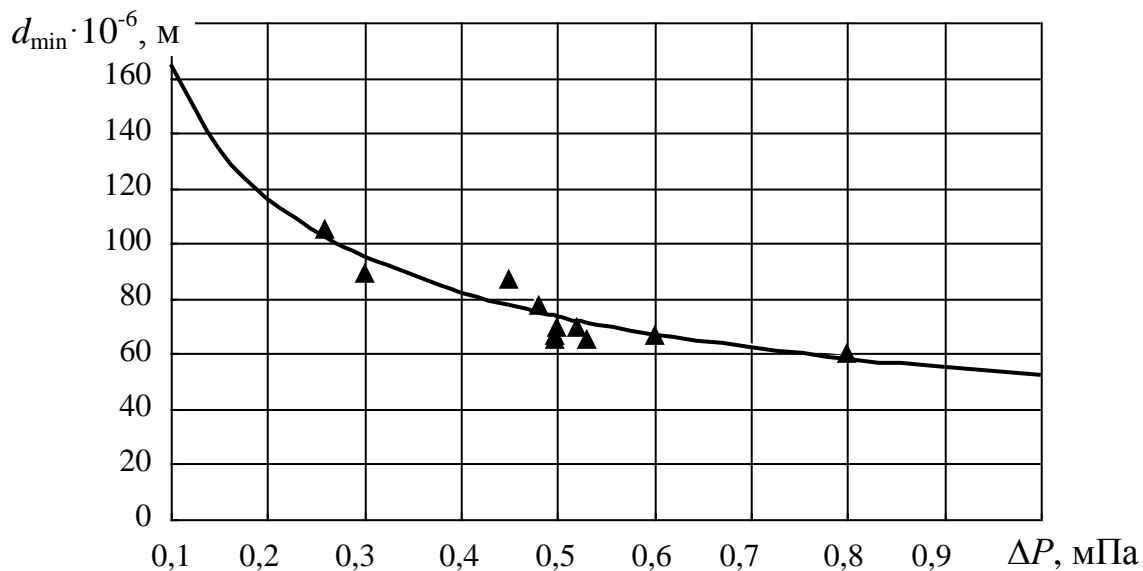


Рис. 3. Зависимость минимального диаметра капель жидкости от избыточного давления (▲ – экспериментальные данные, сплошная линия – аналитическая кривая)

Обработка экспериментальных данных и их сравнение с результатами расчета по аналитическим зависимостям позволили представить формулы (5) и (7) в удобном для расчёта виде:

$$d_{\max} = \frac{170}{\Delta P}; \quad d_{\min} = \frac{52}{\sqrt{\Delta P}}. \quad (9)$$

Для расчётов среднего диаметра каплей можно представить формулу (8) в виде

$$d_k = \frac{340}{\Delta P + 3,3\sqrt{\Delta P}}, \quad (10)$$

где d_k – средний диаметр каплей жидкости, м;

ΔP – избыточное давление, МПа.

Вывод. Таким образом, проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили получить формулы для расчёта диаметров каплей жидкости, зависящих от избыточного давления и испаряющихся в предполагаемой зоне горения тем быстрее, чем капли меньше.

Список литературы / References

1. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Моделирование квазивертикального падения испаряющейся капли огнетушащей жидкости // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – 2006. – № 72. – С. 322 – 328.

Ol'shanskiy, V.P., Ol'shanskiy, S.V. *Modelirovaniye kvazivertikal'nogo padeniya isparayushchey kapli ognetushashchey zhidkosti* [Modelling of the quasivertikal drop of the vaporizing droplet of the fire-fighting liquid]. *Kommunal'noye khozyaystvo gorodov: nauch.-tekhn. sb.* [Public service of the cities: scientific and technical collection]. 2006, no. 72, pp. 322-328.

2. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К расчёту предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспылённых огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т. 14, № 4. – С. 67 – 70.

Ol'shanskiy, V.P., Ol'shanskiy, S.V. *K raschyetu predel'noy dal'nosti podachi isparayushchikhsya tonkoraspylyennykh ognetushashchikh veshchestv ustanovkami impul'snogo pozharotusheniya* [To the calculation of the greatest possible range of feed of evaporating fire-fighting substances sprayed with pulse fire-fighting installations]. *Pozharovzryvobezopasnost' - Fire-explosion safety*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 67-70.

3. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Двухфазные течения в элементах теплотехнического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

Deych, M.Ye., Filippov, G.A. *Dvukhfaznyye techeniya v elementakh teplotekhnicheskogo oborudovaniya* [Two-phase currents in elements of the heat engineering equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 328 p.

4. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1968. – 424 с.

Deych, M.Ye., Filippov, G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow, Energiya Publ., 1968, 424 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 09.06.2016

*Aleksey Aleksandrovich Kostrubitskiy, Minister; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;
The Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies
and Liquidation of Consequences of Natural Disasters;
283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-28*

INFLUENCE OF THE OVERPRESSURE AT THE OUTLET FROM THE NOZZLE ON DISPERSIBILITY OF DROPS OF LIQUID

Purpose. Determination of diameters of the drops of liquid dispersed depending on the initial velocity of jets and overpressure at the outlet from the nozzle to estimate the efficiency of water fire-fighting means.

Methods. Determination of the analytical solution of the mathematical problem of the process of motion and decay of the liquid jets with formation of the drops of liquid.

Results. The dynamics of the jet of liquid by its complete decay with formation of the drops of liquid was considered. The analytical dependences of the diameters of the drops of liquid on the velocity of the jets and overpressure at the outlet from the nozzle were received. The experimental investigations of the dependence of the diameters of the drops of liquid that allowed determining the empirical constants for satisfactory convergence of results of theoretical investigations with the experimental data on the overpressure were carried out.

Scientific novelty. The results of investigation of the dependence of diameters of the drops of liquid by decay of the jets on the overpressure permit to increase the efficiency of the water fire-fighting means.

Practical value. The results received contribute to the choice of parameters of the fire water-cannon and to the estimation of efficiency of influence of the dispersed water on a seat of fire.

Keywords: *liquid; interrupted jet; exhaust velocity; overpressure; diameter of drops; analytical dependence.*

УДК 622.81:534.222.2

Владимир Григорьевич Агеев, канд. техн. наук, директор; e-mail: niigd@mail.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-89;

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

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»;
283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 311-52-85;

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, замнач. отд.; e-mail: zinstar@mail.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52

РАСЧЁТ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ МЕТАНОПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Цель. Исследование процесса возникновения воздушной ударной волны при взрывах газовых и пылевых смесей.

Методика основана на использовании математической модели теплового взрыва или быстрого горения, учитывающей резкое повышение температуры с переходом тепловой энергии в механическую, которая определяет давление в горной выработке.

Результаты. Рассмотрен стационарный режим быстрого горения, приводящий к возникновению воздушной ударной волны. Получена аналитическая зависимость скорости воздуха, которая быстро нарастает и становится сверхзвуковой при определённой длине зоны горения. В результате вне зоны горения возникает воздушная ударная волна.

Научная новизна. Впервые установлена аналитическая зависимость максимального давления от объёма взорванной смеси газов, которая позволяет рассчитать максимальное давление в воздушной ударной волне при образовании взрывоопасных концентраций метана.

Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что даёт возможность достоверно прогнозировать последствия взрыва метанопылевоздушных смесей.

Ключевые слова: метанопылевоздушная смесь; взрыв; воздушная ударная волна; максимальное давление; зона воспламенения.

Состояние вопроса. При рассмотрении воздушных ударных волн обычно принимают, что в результате взрыва в некоторой зоне происходит резкое повышение давления и расширение продуктов реакции, после чего ударная волна отрывается от продуктов реакции и распространяется по выработкам [1, 2].

Однако исходя из теории теплового взрыва [3] или быстрого горения вначале резкое повышение температуры в каком-либо объёме должно вызывать переход тепловой энергии в механическую: кинетическую и статическую энергию. Последняя как раз и определяет значение давления в выработке. Поэтому некорректно заранее задаваться максимальным статическим давлением, даже исходя из объёма загазованной зоны. Расчёт необходимо начинать с определения объёма взрывоопасного слоевого или

общего загазования выработок и ожидаемой температуры в результате быстрого воспламенения смеси газов и пыли.

Цель исследований. Изучение процесса возникновения воздушной ударной волны при горении и взрывах газовых и пылевых смесей.

Материалы и результаты исследований. Распространение пламени в горючей газовой смеси, как отмечено в работе [3], независимо от механизма воспламенения подчиняется основным законам газовой динамики.

Для расчёта газодинамических явлений, возникающих при горении и взрывах газовых и пылевых смесей, обычно используют систему уравнений, состоящих из уравнений неразрывности потока, сохранения количества движения и энергии [3-5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u^2 + P \right) = - \frac{\lambda \Pi}{8S} \rho u |u|; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(c_v \rho T + \rho u^2 / 2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(c_v \rho T + \rho u^2 / 2 + P \right) u \right] = q_m, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³;

u – скорость смеси, м/с;

t – время с момента воспламенения смеси газов, с;

x – текущее расстояние от места воспламенения, м;

P – давление, Па;

λ – коэффициент аэродинамического сопротивления выработок;

Π – периметр поперечного сечения выработок, м;

S – площадь поперечного сечения выработок, м²;

c_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме, Дж/(кг·К);

T – температура газовой смеси, К;

q_m – интенсивность тепловыделения при горении метана и угольной пыли, Вт/м³.

В правой части второго уравнения системы (1) необходимо, чтобы функция скорости потока смеси была под знаком модуля. Это указывает на то, что при изменении направления движения аэродинамическое сопротивление также меняет знак и действует против потока.

Замыкает систему уравнений (1) уравнение состояния газов [3-5]

$$P = \rho RT, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная, Па·м³/(кг·К).

Рассмотрим стационарный режим быстрого горения, приводящий к возникновению воздушной ударной волны. В этом случае система уравнений (1) принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\rho u)}{dx} = 0; \\ \frac{d}{dx} \left(\rho u^2 + P \right) = -\frac{\lambda \Pi}{8S} \rho u |u|; \\ \frac{d}{dx} \left[\left(c_v \rho T + \rho u^2 / 2 + P \right) u \right] = q_m. \end{array} \right. \quad (3)$$

Из первого уравнения неразрывности потока системы (3) следует, что массовая скорость потока постоянна, поэтому

$$\rho u = \rho_0 u_0 = const, \quad (4)$$

где ρ_0 – где плотность газов при нормальных условиях, кг/м³;

u_0 – скорость потока при нормальных условиях, м/с.

В результате система уравнений упрощается и остаются два уравнения: движения и сохранения энергии

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} \left[(\rho_0 u_0) u + P \right] = -\frac{\lambda \Pi}{8S} (\rho_0 u_0) u; \\ \frac{d}{dx} \left\{ \left[c_v \rho T + (\rho_0 u_0) u / 2 + P \right] u \right\} = q_m. \end{array} \right. \quad (5)$$

Рассмотрим процессы в зоне воспламенения, когда $q_m \neq 0$.

Интегрируя второе уравнение системы (5), получим

$$\left[c_v \rho T + (\rho_0 u_0) u / 2 + P \right] u = q_m x. \quad (6)$$

Используя уравнение состояния (2), представим решение (6) в виде

$$\left[(c_v + R) \rho T + (\rho_0 u_0) u / 2 \right] u = q_m x. \quad (7)$$

Газовую постоянную можно выразить через разность удельных теплоёмкостей [3]:

$$R = c_p - c_v, \quad (8)$$

где c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Подставляя выражение (8) в формулу (7), получим

$$\left[c_p \rho T + (\rho_0 u_0) u / 2 \right] u = q_m x. \quad (9)$$

Пренебрегая тепловой энергией по сравнению с кинетической энергией в левой части формулы (9), получим

$$u = \sqrt{\frac{2q_m x}{\rho_0 u_0}}. \quad (10)$$

Таким образом, в зоне воспламенения скорость воздуха быстро нарастает и становится сверхзвуковой при определённой длине зоны горения.

Представим систему уравнений (3) зоны образования воздушной ударной волны в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\rho u)}{dx} = 0; \\ \frac{d}{dx}(\rho u^2 + P) = 0; \\ \frac{d}{dx} \left[(c_v \rho T + \rho u^2 / 2 + P) u \right] = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

В зоне образования воздушной ударной волны не учтены потери на трение и наличие источников теплоты. Интегрируя уравнения системы (11), получим условия динамической совместности или условия Гюгонио [3, 4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho u = \rho_1 u_1; \\ P + \rho u^2 = P_1 + \rho_1 u_1^2; \\ c_v T + P/\rho + u^2/2 = c_v T_1 + P_1/\rho_1 + u_1^2/2. \end{array} \right. \quad (12)$$

Используя первые два равенства системы (12), выразим скорости через давления и плотности следующим образом:

$$u_1^2 = \frac{\rho}{\rho_1} \frac{P_1 - P}{\rho_1 - \rho}; \quad u^2 = \frac{\rho_1}{\rho} \frac{P_1 - P}{\rho_1 - \rho}. \quad (13)$$

Отсюда найдём разность квадратов скоростей:

$$u^2 - u_1^2 = \frac{\rho + \rho_1}{\rho \rho_1} (P_1 - P). \quad (14)$$

Так как

$$c_v T + P/\rho = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P/\rho, \quad (15)$$

то, используя третье равенство системы (12), найдём уравнения адиабаты Гюгонио [4]:

$$\left. \begin{array}{l} \rho/\rho_1 = \frac{(\gamma + 1)P + (\gamma - 1)P_1}{(\gamma - 1)P + (\gamma + 1)P_1}; \\ P/P_1 = \frac{(\gamma + 1)\rho - (\gamma - 1)\rho_1}{(\gamma + 1)\rho_1 - (\gamma - 1)\rho}, \end{array} \right\} \quad (16)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – отношение удельных теплоёмкостей (для воздуха $\gamma = 1,4$).

Если воздушная ударная волна большой амплитуды при $P/P_1 \rightarrow \infty$, то отношение плотностей стремится к пределу:

$$\rho/\rho_1 = \frac{\gamma+1}{\gamma-1}. \quad (17)$$

Этот скачок уплотнения происходит во фронте воздушной ударной волны (для воздуха $\rho/\rho_1 = 6$). Пользуясь условиями динамической совместности (12), определим скорость движения фронта воздушной ударной волны, а также значения скачков плотности и давления:

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{\gamma+1}{4}u/c + c\sqrt{1 + \frac{(\gamma+1)^2}{16}(u/c)^2}; \\ \rho/\rho_1 &= \frac{1 + \frac{\gamma+1}{4}(u/c)^2 + \frac{u}{c}\sqrt{1 + \frac{(\gamma+1)^2}{16}(u/c)^2}}{1 + (\gamma-1)(u/c)^2/2}; \\ P/P_1 &= 1 + \frac{\gamma(\gamma+1)}{4}(u/c)^2 + \frac{\gamma u}{c}\sqrt{1 + \frac{(\gamma+1)^2}{16}(u/c)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где c – скорость звука (принимается равной 340 м/с).

Для определения давления представим для воздуха ($\gamma = 1,4$) третье равенство системы (18) в виде

$$P/P_1 = 1 + 0,84(u/c)^2 + \frac{1,4u}{c}\sqrt{1 + 0,36(u/c)^2}. \quad (19)$$

Для установления зависимости максимального давления в воздушной ударной волне от скорости и объёма взорванной смеси газов или от длины зоны воспламенения использованы экспериментальные данные [1]. Установлено, что скорость движения фронта воздушной ударной волны при согласовании результатов теоретических расчетов по формуле (10) с экспериментальными данными равна

$$u/c = 0,28\sqrt{V/S}. \quad (20)$$

Подставляя выражение (20) в формулу (19), получим (см. рисунок)

$$\Delta P_0 / P_1 = 0,067V / S + 0,4 \sqrt{(1 + 0,029V / S)V / S}, \quad (21)$$

где ΔP_0 – начальное избыточное давление, Па;

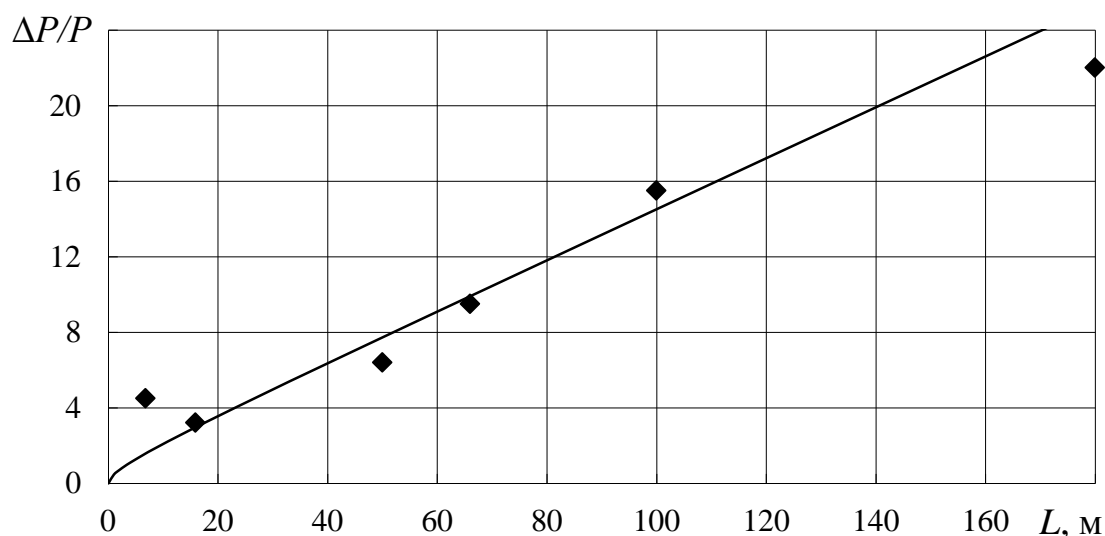
V – объём взорванной смеси газов, м³;

S – средняя площадь поперечного сечения выработки, м².

Если имеет место общее по всему сечению загазование выработки, то

$$V/S = L,$$

где L – длина зоны воспламенения, м.



Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными изменения максимального давления по длине штольни при взрыве метана:

◆ – экспериментальные точки

Вывод. Полученная математическая модель дает возможность рассчитывать начальное максимальное давление в воздушной ударной волне при образовании взрывоопасных концентраций метана и пыли.

Список литературы / References

1. Гурин А.А., Малый П.С., Савенко С.К. Ударные воздушные волны в горных выработках. – М.: Недра, 1983. – 223 с.

Gurin, A.A., Malyu, P.S., Savenko, S.K. *Udarnyye vozdushnyye volny v gornykh vyrabotkakh* [Air shock waves in mine workings]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 223 p.

2. Греков С.П., Зинченко И.Н., Карманов В.С. Методика расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли в шахтах //

Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 17 – 25.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Karmanov, V.S. *Metodika raschyeta parametrov vozdushnykh udarnykh voln pri vzryvakh gaza i pyli v shakhtakh* [Methods of calculation of parameters of air shock waves by gas and dust explosions in mines]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2010, issue 47, pp. 17 – 25.

3. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Затухание давления воздушной ударной волны на прямолинейных участках горных выработок // Вопросы безопасности труда на горных предприятиях: сб. науч. тр. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – Вып. 2. – С. 64 – 72.

Paleyev, D.Yu., Lukashov, O.Yu. *Zatukhaniye davleniya vozdushnoy udarnoy volny na pryamolineynykh uchastkakh gornykh vyrabotok* [Attenuation of pressure of the air shock wave on straight portions of mine workings]. *Voprosy bezopasnosti truda na gornykh predpriyatiyakh: sb. nauch. tr.* [Industrial safety problems at mining enterprises: collected scientific papers]. Kemerovo, Kuz. GTU Publ., 2003, issue 2, pp. 64-72.

4. Игишев В.Г., Васение И.М. Оценка параметров физических процессов прохождения ударной волны через двухфазную среду пылевых и водяных защитных сооружений // Борьба с авариями в шахтах: сб. науч. тр. / РосНИИГД. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – Вып. 17. – С. 146 – 150.

Igishev, V.G., Vaseniye, I.M. *Otsenka parametrov fizicheskikh protsessov prokhozheniya udarnoy volny cherez dvukhfaznyuyu sredu pylevykh i vodyanykh zashchitnykh sooruzheniy* [Estimation of parameters of physical processes of the propagation of the shock wave through the two-phase medium of dust and water protective shelters]. *Bor'ba s avariymi v shakhtakh: sb. nauch. tr.* [Control of accidents in mines: collected scientific papers]. RosNIIGD, Kemerovo, Kuzbassvuzizdat Publ., 2007, issue 17, pp. 146-150.

5. Палеев Д.Ю., Брабандер О.П. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных пластах. – Томск: Изд-во Томского университета, 1999. – 202 с.

Paleyev, D.Yu., Brabander, O.P. *Matematicheskoye modelirovaniye aktivnogo vozdeystviya na vzryvoopasnyye oblasti i ochagi goreniya v ugol'nykh plastakh* [The mathematical modeling of the active influence on highly explosive areas and heat sources in coal seams]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 1999, 202 p.

Vladimir Grigor'yevich Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director; e-mail: niigd@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-39-89;

Gennadiy Petrovich Starikov, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;

The Governmental Institution "Institute of Physics of Mining Processes";

283114, Donetsk, 72, ulitsa Rosy Luxemburg. Phone (+38 062) 311-52-85;

Igor' Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), deputy head of department; e-mail: zinstar@mail.ru;

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

283048, Donetsk, ulitsa Artyema, 157. Phone (+38 062) 311-13-52.

CALCULATION OF THE MAXIMUM PRESSURE BY EXPLOSION OF METHANE-DUST-AIR MIXTURES

Purpose. Investigation of the process of origin of the air shock wave by the explosions of gas and dust mixtures.

Methods. The methods are based on the use of the mathematical model of the thermal explosion or deflagration taking into account the sharp rise of temperature with the transition from the heat energy to the mechanical one that determines the pressure in the mine working.

Results. The stationary mode of the deflagration resulting in origin of the air shock wave is considered. The analytical dependence of the air velocity that rises rapidly and becomes supersonic by the definite length of the combustion zone was received. As a result the air shock wave comes into existence outside the combustion zone.

Scientific novelty. The analytical dependence of the maximum pressure on the volume of the gas mixture exploded that allows calculating the maximum pressure in the air shock wave by formation of the explosive methane limits was established for the first time.

Practical value. The analytical dependences received agree satisfactorily with the experimental data, what enables to forecast the consequences of the explosion of the methane-dust-air mixtures for certain.

Keywords: methane-dust-air mixture; explosion; air shock wave; maximum pressure; ignition zone.

УДК 614.842.612:[614.841.13:621.63]

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-70*

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНО-ВОДЯНОЙ СМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ПОМЕЩЕНИИ

Цель. Определение параметров подачи воздушно-водяной смеси при помощи дымососов в аварийное помещение для снижения температуры.

Методы. Аналитические исследования процесса теплообмена капель диспергированной воды с высокотемпературными продуктами горения.

Результаты. Получены уравнения для расчета температуры в аварийном помещении, изменения размеров капель в зависимости от времени и интенсивности подачи воздушно-водяной смеси.

Научная новизна. Установлена зависимость радиуса испаряющейся капли воды от ее физических параметров и температуры газовой среды.

Практическая значимость. Разработана методика расчета снижения температуры пожарных газов при подаче в аварийное помещение распыленной воды с помощью переносных дымососов, имеющихся на вооружении пожарно-спасательных подразделений МЧС ДНР. Это позволит определить необходимые время работы дымососа и расход воздушно-водяной смеси для обеспечения безопасности спасателей при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: опасные факторы пожара; дымоудаление; дымососы; температура; капля воды; испарение; давление пара; расход воздуха.

Постановка проблемы. Рост количества общественных, промышленных и административных зданий с разветвленной схемой помещений, разнообразной пожарной нагрузкой значительно увеличивают пожарную опасность. Несмотря на используемые современные пожарно-профилактические конструктивно-строительные решения, полностью исключить возможность возникновения пожара в любых зданиях и сооружениях невозможно из-за действия таких негативных факторов, как старение технических средств и систем, ненадлежащий уровень их обслуживания, неожиданность возгорания и стрессовое состояние персонала.

Во время возникновения и развития пожара действуют опасные факторы, влияющие на людей и материальные ценности, находящиеся в опасной зоне. В соответствии с ранжированием опасных факторов пожара методом экспертных оценок, наибольшую значимость имеют такие факторы, как дым и высокая температура [1]. Во многих случаях задымление помещений и связанное с ним ухудшение видимости представляет для эвакуирующихся людей не меньшую опасность, чем тепловое и токсическое воздействие продуктов горения. Трагические последствия и гибель людей чаще всего являются следствием паники и беспорядочных действий самих же потерпевших в условиях потери видимости [2].

Все опасные факторы пожара значительно усложняют действия пожарно-спасательных подразделений при спасении людей и тушении пожаров. Чтобы избежать этого, достаточно снизить температуру в аварийном помещении и плотность дыма до видимости 3...6 м. При такой видимости в большинстве случаев человек правильно ориентируется и реагирует на изменения в обстановке, возникающие при продвижении в задымленной зоне.

Эффективность ликвидации пожаров в задымленных и загазованных помещениях и проведение аварийно-спасательных работ в значительной степени зависят от продуктивности, скорости оперативного развертывания пожарно-технического оборудования, одним из видов которого являются дымососы.

Пожарные дымососы предназначены для откачивания продуктов горения или подачи свежего воздуха в помещение путем нагнетания, а также для подачи и транспортирования по рукаву пены высокой кратности к очагу пожара, в случае совместной работы с пеногенераторной установкой.

Анализ использования дымососов на пожарах показывает, что нагнетание свежего воздуха в помещение более эффективно по сравнению с откачиванием дыма. Так, для дымососов, перекачивающих 24000 м³/ч смеси воздуха и пожарных газов, время удаления дыма сокращается на 20...25 %. Это объясняется тем, что во время работы дымососа на откачивание создаются условия перетекания воздуха из смежных помещений и извне, поэтому дымосос вместе с продуктами горения отсасывает значительную часть свежего воздуха [3].

Основным способом оперативного осаждения продуктов горения является использование струй распыленной воды, а для удаления дыма на практике используют переносные дымососы, находящиеся на вооружении подразделений МЧС ДНР. Эффективность ручных пожарных стволов, используемых для осаждения, – низкая вследствие малой дисперсности и точности подачи распыленной воды. В то же время дымососы не в состоянии быстро обеспечить увлажнение задымленного помещения, охлаждение продуктов горения и, как следствие, снижение температуры и улучшение видимости.

Одновременное использование пожарных стволов и дымососов приводит к увеличению задействованного личного состава, что нежелательно, особенно при ликвидации больших пожаров. Поэтому создание новых высокопродуктивных компактных устройств, которые бы сочетали и подачу распыленной воды, равномерно заполняющей весь объем задымленного помещения, и нагнетание свежего воздуха, – актуальная задача.

Идея способа заключается в подаче (нагнетании) воздушно-водяной смеси в задымленное помещение, в результате чего температура в помещении снижается, находящиеся в дыму твердые частицы углерода осаждаются вследствие увлажнения – в результате чего улучшается видимость, снижается концентрация некоторых растворимых в воде токсичных продуктов горения и, соответственно, создаются более благоприятные условия для ведения оперативных действий пожарно-спасательных подразделений [4].

Анализ последних публикаций. По этому пути пошли в МЧС Республики Беларусь и Украины. В Институте переподготовки и повышения квалификации МЧС Республики Беларусь (пос. Светлая Роща Минской области) разработано и испытано устройство для доставки распыленной воды в очаг пожара (дымосос с распыляющим устройством) [4].

В Львовском государственном университете безопасности жизнедеятельности (Украина) разработано устройство на базе осевого пожарного дымососа, которое подает в задымленное помещение воздушно-водяной поток для осаждения продуктов горения, снижения температуры и увеличения видимости [5].

В работах [6 – 8] описаны экспериментальные исследования параметров разработанного устройства, однако остается открытым вопрос, какая должна быть дисперсность и какой объем воды необходимо вводить в воздушный поток для обеспечения максимального эффекта снижения температуры и задымленности в аварийном помещении с очагом горения и создания обстановки, дающей возможность спасателям проводить оперативную работу или обеспечивать безопасную эвакуацию.

Цель исследований. Создание на основе указанного способа средств дымоудаления требует проведения физико-математического моделирования процессов охлаждения пожарных газов распыленной водой, осаждения твердых частиц дыма и абсорбции токсичных газообразных продуктов горения.

При работе такого устройства вначале распыленную воду подают для охлаждения пожарных газов, затем – для осаждения твердых частиц дыма и в конце (с добавлением поверхностно-активных веществ) – для абсорбции токсичных газообразных продуктов горения.

На первом этапе работы целью исследования было моделирование процесса тепломассообмена при испарении капель распыленной воды в аварийном помещении и на основе реализации разработанной модели определение параметров подачи воды.

Материалы и результаты исследований. Массовый расход воды q_m , кг·с⁻¹, испаряющейся в единицу времени с поверхности капли, определяют по формуле Максвелла [10]:

$$q_m = \frac{4\pi D_n \mu r}{RT} (P_S - P_\infty), \quad (1)$$

где D_n – коэффициент диффузии пара испаряющейся жидкости, м²·с⁻¹;

μ – молярная масса жидкости, кг·кмоль⁻¹;

r – радиус капли, м;

R – универсальная газовая постоянная, Дж·кмоль⁻¹·К⁻¹;

T – температура, К;

P_S – парциальное давление пара на поверхности капли, Па;

P_∞ – парциальное давление пара в парогазовой смеси, Па.

Для расчета парциального давления пара используем уравнение Клапейрона-Клазиуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{H}{T(v_1 - v_2)}, \quad (2)$$

где H – теплота фазового перехода (теплота испарения), Дж·кг⁻¹;

P – давление, Па;

v_1, v_2 – удельные объемы пара и жидкости, м³·кг⁻¹.

Сделаем допущения, что значение H не зависит от температуры, а удельным объемом жидкости по сравнению с удельным объемом пара можно пренебречь ($v_1 \gg v_2$).

Считаем, что к пару применимо уравнение состояния Клапейрона:

$$Pv = RT/\mu. \quad (3)$$

Тогда получаем

$$\frac{dP}{dT} = \frac{H}{Tv} = \frac{\mu HP}{RT^2} \quad (4)$$

или

$$\frac{dP}{P} = \frac{\mu H dT}{RT^2}. \quad (5)$$

Интегрируя выражение (5), получим

$$\ln P = -\frac{\mu H}{RT} + C, \quad (6)$$

где C – постоянная интегрирования.

Постоянную интегрирования C можно найти, если известно давление насыщенного пара P_0 при какой-либо одной температуре T_0 . При этой температуре

$$\ln P_0 = -\frac{\mu H}{RT_0} + C. \quad (7)$$

Согласно работе [10] с учетом влияния на испарение поверхностного натяжения для водяного пара

$$C = 2338,8e^{\frac{2\sigma\mu}{\rho_{ж}RT_0}}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н·м⁻¹;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг·м⁻³.

Тогда парциальные давления:

$$P_s = 2338,8 e^{\frac{2\sigma\mu}{\rho_{ж}RT_{к}r}} e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{к}} - \frac{1}{293}\right)}; \quad (9)$$

$$P_{\infty} = 2338,8 v e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{г}} - \frac{1}{293}\right)}. \quad (10)$$

Пар в газовой смеси не является насыщенным, поэтому в уравнение (10) введен коэффициент v – влажность пара:

$$v = P/P_H,$$

где P_H – парциальное давление насыщенного пара, Па.

Подставляя выражения (9) и (10) в (1), получаем для скорости испарения (скорости уменьшения массы капли)

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{4\pi D_{п}\mu r}{RT_{г}} 2338,8 \left[e^{\frac{2\sigma\mu}{\rho_{ж}RT_{к}r}} e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{к}} - \frac{1}{293}\right)} - v e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{г}} - \frac{1}{293}\right)} \right]. \quad (11)$$

Масса капли $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж}$, тогда изменение радиуса капли определяется уравнением

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2338,8 D_{п}\mu}{RT_{г}r} \left[e^{\frac{2\sigma\mu}{\rho_{ж}RT_{к}r}} e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{к}} - \frac{1}{293}\right)} - v e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{г}} - \frac{1}{293}\right)} \right]. \quad (12)$$

Коэффициент диффузии пара в газовой смеси зависит от температуры [10]:

$$D_{п} = D_0 \left(\frac{T_{г}}{293}\right)^{1,89} \frac{760}{P}, \quad (13)$$

где $D_0 = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии пара при начальных условиях ($T_{г}=293 \text{ К}$; $P = 0,1 \text{ МПа}$).

Подставляя уравнение (13) в (12), получаем

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1,06 \cdot 10^{-6} T_{г}^{0,89} \mu}{Rr} \left[e^{\frac{2\sigma\mu}{\rho_{ж}RT_{к}r}} e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{к}} - \frac{1}{293}\right)} - v e^{\frac{\mu H}{R}\left(\frac{1}{T_{г}} - \frac{1}{293}\right)} \right]. \quad (14)$$

Изменение количества теплоты в капле происходит по двум причинам:

- конвективный теплообмен между каплей и газовой смесью;
- унос энергии вместе с испаряющейся массой жидкости.

Конвективный теплообмен рассчитывают по формуле Ньютона-Рихмана:

$$q_T = S\alpha_k(T_\Gamma - T_K), \quad (15)$$

где q_T – теплоотвод с поверхности капли за счет конвекции, Вт;

$S = 4\pi r^2$ – площадь поверхности капли, m^2 ;

$\alpha_k = \frac{\lambda}{r}$ – коэффициент конвективного теплообмена, $Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$;

λ – коэффициент теплопроводности газовой смеси, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$.

Тогда

$$q_T = 4\pi r\lambda(T_\Gamma - T_K). \quad (16)$$

Тепловой поток при испарении капли

$$q_{исп} = (C_{pж} T_K + H) \frac{dm}{dt} = - (C_{pж} T_K + H) \frac{4\pi D_p \mu r}{RT_K} \cdot 2338,8 \times \\ \times \left[e^{\frac{2\sigma\mu}{R_{пж}RT_K r}} e^{\frac{\mu H}{R} \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{293} \right)} - v e^{\frac{\mu H}{R} \left(\frac{1}{T_\Gamma} - \frac{1}{293} \right)} \right], \quad (17)$$

где $q_{исп}$ – теплоотвод от капли за счет испарения, Вт.

Тогда суммарное изменение количества теплоты в капле в единицу времени

$$C_{pж} m \frac{dT_K}{dt} = q_T + q_{исп}; \\ C_{pж} m \frac{dT_K}{dt} = 4\pi r\lambda(T_\Gamma - T_K) - (C_{pж} T_K + H) \frac{4\pi D_p M r \cdot 2338,8}{RT_K} \times \\ \times \left[e^{\frac{2\sigma M}{R_{пж}RT_K r}} e^{\frac{MH}{R} \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{293} \right)} - v e^{\frac{MH}{R} \left(\frac{1}{T_\Gamma} - \frac{1}{293} \right)} \right]. \quad (18)$$

Обозначим расход воды через распыливающее устройство дымососа $q_{ж}$, $м^3 \cdot с^{-1}$.

За время $\tau_{исп}$ (время испарения капли), с, в аварийное помещение вносится дымососом масса жидкости, равная

$$M_{ж} = \rho_{ж} q_{ж} \tau_{исп}. \quad (19)$$

Это количество распределяется в объеме помещения (рис. 1) W , $м^3$, равном

$$W = S v_{дым} \tau_{исп}, \quad (20)$$

где $v_{дым}$ – скорость подачи воздуха с распыленной водой в аварийное помещение, $м^3 \cdot с^{-1}$.

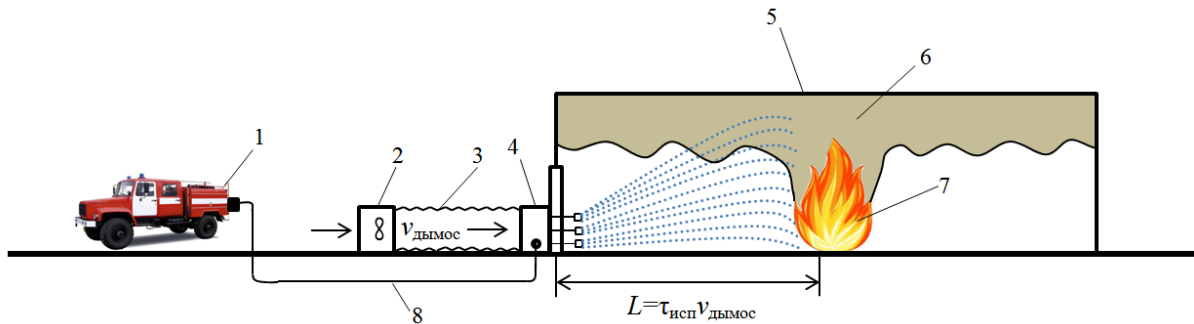


Рис.1. Схема подачи распыленной воды в аварийное помещение с использованием пожарных дымососов:

1 – автоцистерна; 2 – дымосос; 3 – вентиляционный рукав; 4 – приставка для подачи распыленной воды; 5 – аварийное помещение; 6 – дым (продукты горения); 7 – очаг пожара; 8 – пожарный рукав для подачи воды

Тогда в единице объема начальная масса частиц жидкости равна

$$m_0 = \frac{M}{W} = \frac{\rho_{ж} q_{ж}}{S v_{дым}}. \quad (21)$$

Количество капель в единице объема:

$$n_0 = \frac{m_0}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_{ж}} = \frac{3m_0}{4\pi r_0^3 \rho_{ж}}. \quad (22)$$

Принимаем, что в процессе испарения капли не коагулируют и не успевают выпасть на ограждающие конструкции. Тогда их количество не меняется, и в период времени $0 < \tau < \tau_{исп}$ масса капель в единице объема m , кг/м³:

$$m = n_0 \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ж} = m_0 r^3 / r_0^3, \quad (23)$$

где r – радиус капли в момент времени τ , м.

Масса испарившейся жидкости в единице объема $m_{исп}$, кг·м⁻³:

$$m_{исп} = m_0 - m = m_0 \left(1 - \frac{r^3}{r_0^3}\right). \quad (24)$$

В начальный момент времени масса пара в единице объема M_{H_0} , кг·м⁻³:

$$M_{H_0} = \frac{v_0 P_{H_0} \mu}{R T_{\Gamma_0}}, \quad (25)$$

где v_0 – начальная объемная доля влаги в пожарных газах;

P_{H_0} – давление насыщенных паров в начале процесса, Па;

T_{Γ_0} – начальная температура газовой смеси, К.

В произвольный момент времени в единице объема масса пара равна $M_{H_0} + m_{исп}$, а текущая влажность

$$v = \frac{M_{H_0} + m_{исп}}{M_H}, \quad (26)$$

где $M_H = \frac{P_H \mu}{RT_\Gamma}$ – масса насыщенного пара в единице объема при температуре T_Γ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Для расчета температуры пожарных газов T_Γ используем закон сохранения тепловой энергии для системы «газ – капли воды».

В начальный момент времени тепловая энергия этой системы

$$E_0 = (m_0 C_{pж} + m_{воз} C_{p\text{воз}}) T_{к0} + (M_{H0} C_{p\text{пар}} + m_{п.г} C_{pпг}) T_{Г0}, \quad (27)$$

где $C_{pж}$ – теплоемкость воды, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$C_{p\text{воз}}$ – теплоемкость воздуха, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$C_{p\text{пар}}$ – теплоемкость пара, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$C_{pпг}$ – теплоемкость пожарных газов, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$m_{воз}$ – масса воздуха, подаваемого дымососом, в единице объема, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$m_{п.г}$ – масса пожарных газов в единице объема, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

В последующие моменты времени тепловая энергия смеси равна

$$E = m C_{pж} T_\Gamma + [(M_{H_0} + m_{исп}) C_{p\text{пар}} + m_{воз} C_{p\text{воз}} + m_{п.г} C_{pпг}] T_\Gamma. \quad (28)$$

В результате испарения часть тепловой энергии, равная $m_{исп} H$, переходит во внутреннюю энергию пара.

Тогда имеем

$$E_0 - E = m_{исп} H. \quad (29)$$

Подставляем уравнения (26) и (27) в (28) и, разрешая относительно T_Γ , получаем текущую температуру газозадушной смеси в аварийном помещении:

$$T_\Gamma = \frac{(m_0 C_{pж} + m_{воз} C_{p\text{воз}}) T_{к0} + (M_{H0} C_{p\text{пар}} + m_{п.г} C_{pпг}) T_{Г0} - m C_{pж} T_\Gamma - m_{исп} H}{(M_{H_0} + m_{исп}) C_{p\text{пар}} + m_{воз} C_{p\text{воз}} + m_{п.г} C_{pпг}}. \quad (30)$$

Масса воздуха в единице объема $m_{воз}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$m_{воз} = M_{воз} / W, \quad (31)$$

где $M_{воз} = \rho_{воз} v_{воз}$ – массовый расход воздуха, создаваемый дымососом, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\rho_{воз}$ – плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$v_{воз}$ – объемный расход воздуха, создаваемый дымососом, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

$$m_{\text{воз}} = \frac{\rho_{\text{воз}} V_{\text{воз}}}{W}. \quad (32)$$

Масса пожарных газов в единице объема $m_{\text{п.г}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$m_{\text{п.г}} = M_{\text{п.г}}/W, \quad (33)$$

где $M_{\text{п.г}}$ – массовый расход пожарных газов, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

Согласно [4] определяем $m_{\text{п.г}}$ по формуле

$$m_{\text{п.г}} = \frac{\varphi \psi v_{\text{п.г}} S T_{\text{п.г}} \rho_{\text{п.г}}}{T_0 W}, \quad (34)$$

где φ – коэффициент пропорциональности;

ψ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

$v_{\text{п.г}}$ – удельный объем продуктов сгорания, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, (от сгорания 1 кг горючих материалов);

$S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м^2 ;

$T_{\text{п.г}}, T_0$ – температура пожарных газов и окружающей среды, К;

$\rho_{\text{п.г}}$ – плотность пожарных газов, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Уравнения (14), (18) и (30) позволяют в процессе испарения капель распыленной воды рассчитать их радиус, а также температуру газозадушной смеси в аварийном помещении. При решении уравнения (18) применяли неявную разностную схему, в которой правая часть на каждом шаге линеаризовалась по малому приращению температуры $T_{\text{к}}^{n+1} - T_{\text{к}}^n$. Разностный аналог уравнения разрешается относительно $T_{\text{к}}^{n+1}$. Начальное значение температуры капель принимали $T_{\text{к}0} = 293$ К, а пожарных газов $T_{\text{г}0} = 873$ К.

При этих температурах значения параметров:

$$\rho_{\text{ж}} = 958 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$C_{\text{рж}} = 4232 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$M = 18 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$\sigma = 0,0589 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1};$$

$$H = 2257000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1};$$

$$\lambda = 0,0619 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

$C_{\text{р воз}}, C_{\text{р пар}}, C_{\text{рпг}}$ – в зависимости от температуры $T_{\text{г}}$;

$$v_0 = 0,4;$$

$$P_{\text{Н}0} = 0,1 \text{ МПа};$$

$$\rho_{\text{воз}} = 1,205 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$\rho_{\text{п.г}} = 0,405 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

$$r_0 = 15 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$S_{\text{п}} = 5 \text{ м}^2;$$

$$\psi = 0,0162 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \text{ (древесина)};$$

$$\varphi = 0,8.$$

Аналогичный прием использовали при решении уравнения (14). Правая часть линеаризовалась по малому приращению времени $t^{(n+1)} - t^{(n)}$.

Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 показана динамика уменьшения радиуса капель распыленной воды вследствие их испарения. С повышением влажности газовой смеси испарение капель замедляется.

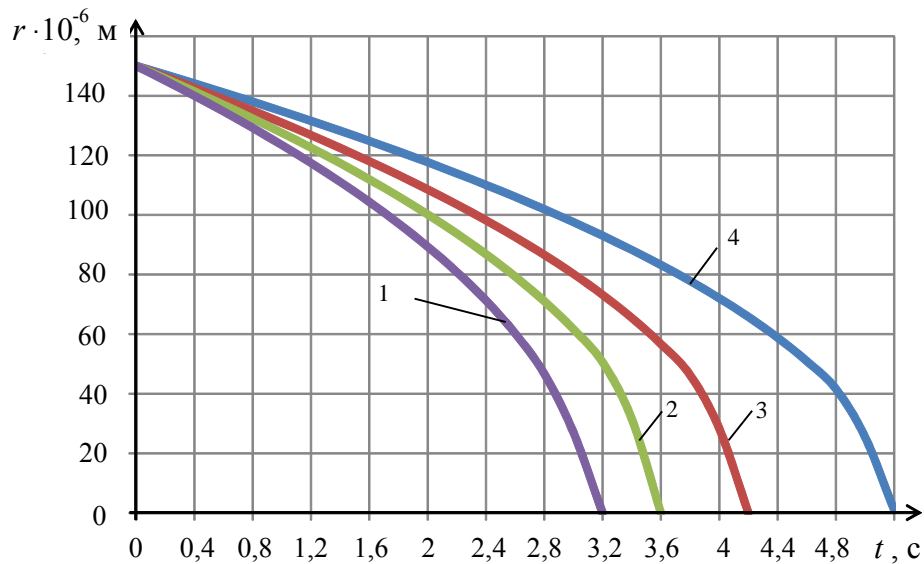


Рис. 2 Динамика уменьшения радиуса капель распыленной воды вследствие их испарения при температурах:
1 – 700 °C; 2 – 600 °C; 3 – 500 °C; 4 – 400 °C

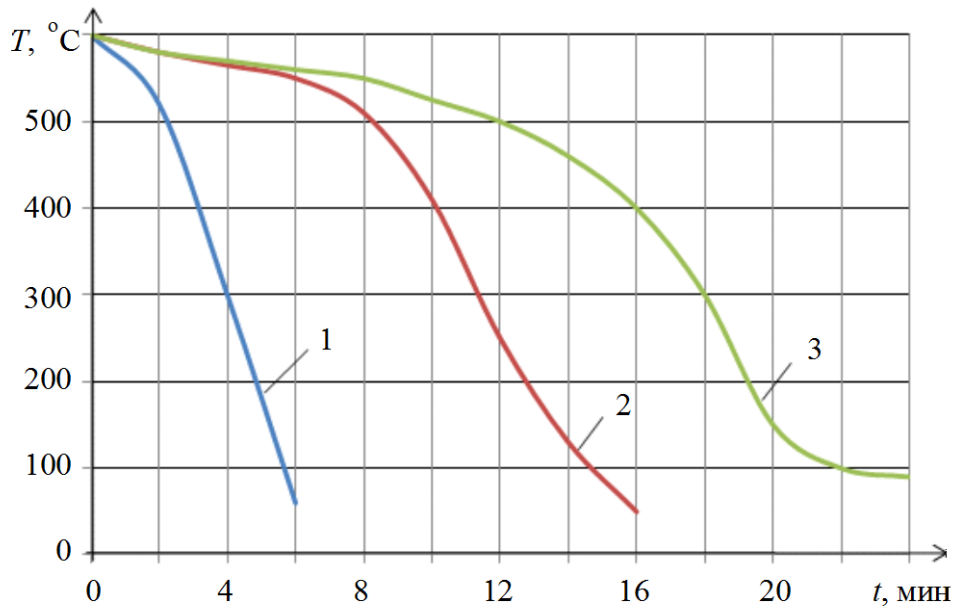


Рис. 3. Динамика изменения температуры продуктов горения в аварийном помещении в зависимости от расхода воды, подаваемой дымососом:
1 – при $q_{ж} = 0,003 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – при $q_{ж} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$; при $q_{ж} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$

Выводы. Исследованы процессы охлаждения пожарных газов в аварийном помещении при подаче воздушно-водяной смеси. Разработанная физико-математическая модель позволяет рассчитать параметры подачи воздушно-водяной смеси в аварийное помещение.

Список литературы / References

1. Ранжирование опасных факторов пожара методом экспертных оценок / Н.Ф. Бурарь, А.И. Фурсов и др. // Безопасность людей при пожарах: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1989. – С. 234 – 237.

Burar', N.F., Fursov, A.I. etc. *Ranzhированиye opasnykh faktorov pozhara metodom ekspertnykh otsenok* [Ranking the hazardous fire factors with the method of expert evaluations]. *Bezopasnost' lyudey pri pozharakh: sb. nauch. tr.* [Safety of the people by fires: collected scientific papers]. Moscow, VNIPO Publ., 1989, pp. 234-237.

2. Грачев В.А., Поповский Д.В. Газодымозащитная служба. – М.: Пожкнига, 2004. – 313 с.

Grachyev, V.A., Popovskiy, D.V. *Gazodymozashchitnaya sluzhba* [Gas-and-smoke protective service]. Moscow, Pozhkniga Publ., 2004, 313 p.

3. Луц В.І., Наливайко М.А. Аналіз підвищення ефективності застосування переносних пожежних димовсмоктувачів // Пожежна безпека: зб. наук. праць / ЛДУ БЖД. – 2011. – № 19. – С. 77 – 80.

Lushch, V.I., Nalyvayko, M.A. *Analiz pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia perenosnykh pozhazhnykh dymovsmoktuvachiv* [Analyses of increase of effectiveness of the use of portable fire smoke exhauster]. *Pozhezha bezpeka: zb. nauk. prats' LDU BZhD* [Fire safety: collected scientific papers of the LDU BZhD]. 2011, no. 19, pp. 77-80.

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

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

5. Патент UA №55428A62C35/01. Пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях / В.В. Ковалишин, В.І. Луц, П.І. Мельник; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.

Kovalyshyn, V.V, Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Prystriy dlya osadzhennia produktiv gorinnia, znyzhennia temperatury ta zbil'shennia vydyimosti v zadymlenykh*

prymishchenniakh [Device for precipitation of combustion products, temperature decrease and visibility increase in the premises screened with smoke]. Patent UA no. 55428A62C35/01, 2010.

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

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

7. Луц В.І., Мельник П.І. Тактико-технічні характеристики насадки розприскувача для дрібнодисперсного розпорощення води з метою осадження продуктів горіння // Пожежна безпека. – 2012. – № 21. – С.111 – 114.

Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Taktyko-tekhnichni kharakterystyky nasadky rozpryskuvacha dlia dribnodispersnogo rozporoshennia vody z metoiu osadzhennia produktiv gorinnia* [Performance characteristics of the nozzle of the sprayer for fine-dispersed water atomization on purpose of precipitation of the combustion products]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 2012, no. 21, pp. 111-114.

8. Баланюк В.М., Луц В.І., Наливайко М.А. Нові підходи подачі тонко розпиленої води з поверхнево активними речовинами та сумішами хімічних сполук // Пожежна безпека. – 2012. – № 20. – С. 118 – 123.

Balaniuk, V.M., Lushch, V.I., Nalyvayko, M.A. *Novi pidkhody podachi tonko rozpylenoi vody z poverkhnevo-aktyvnymu rechovynamy ta sumishamy khimichnykh spoluk* [New approaches of the supply of the fine-dispersed water with surface-active substances and mixtures of chemical compounds]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 2012, no. 20, pp. 118-123.

9. Чернобай В.А., Луц В.І. Експериментальні дослідження використання пожежного димовсмоктувача для подачі повітряно-водяного струменя в задимлене приміщення // Теорія і практика ліквідації надзвичайних ситуацій: зб. тез всеукраїнської наук.-практ. конф. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – С. 128 – 130.

Chornobai, V.A., Lushch, V.I. *Eksperymental'ni doslidzhennia vykorystannia pozhezhnogo dymovsmoktuvacha dlia podachi povitriano-vodianogo strumenia v zadymlene prymishchennia* [Experimental investigations of the use of the fire smoke exhauster for the supply of the air-water stream into the premise screened with smoke]. *Teoriia i praktyka likvidatsii nadzvychnykh situatsii: zb. tez vseukrains'koi nauk.-prakt. konf.* [Theory and practice of elimination of emergency situations:

collected theses of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference] L.: LDU BZhd, 2013, pp. 128-130.

10. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 365 с.

Roldugin, V.I. *Fiziko-khimiia poverkhnosti* [Physics and chemistry of the surface]. Dolgoprudnyy, “Intellekt” Publ. House. 2008, 365 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 03.05.2016

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

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

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-39-70

TEMPERATURE REDUCTION IN A PREMISE BY SUPPLY OF THE AIR-WATER MIXTURE

Purpose. Determination of parameters of the air-water mixture supply into the dangerous premise by means of the smoke exhausters to reduce the temperature.

Methods. Analytical investigations of the process of heat-mass exchange of drops of water dispersed with high-temperature combustion products.

Results. The equations for calculation of the temperature in the dangerous premise, change of dimensions of drops subject to the time and intensity of the air-water mixture supply were received.

Scientific novelty. The dependence of the radius of the water drop being evaporated on its physical parameters and temperature of the gaseous medium was established.

Practical value. The methods of calculation of the decrease of the smoke gases temperature by supply of water dispersed into the dangerous premise by means of the portable smoke exhausters being in the inventory of the fire-rescue forces of the Ministry of Emergency Situations of the Donetsk People’s Republic were worked out. This will allow determining the necessary time of operation of the smoke exhauster and the consumption of the air-water mixture to guarantee safety by elimination of the emergency situations.

Keywords: *hazardous factors of the fire; smoke removal; smoke exhauster; temperature, water drop; evaporation; steam pressure; air consumption.*

УДК 614.841.22+622.822.22

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

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

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

Кристина Валериевна Глушенко, инж. 1-й кат.; e-mail: kristina_hlushenko@mail.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ПРИ САМОНАГРЕВАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Создание математической модели процессов низкотемпературного окисления веществ органического происхождения на основе предлагаемой математической модели их нагревания и экспериментальных данных о теплофизических свойствах, размеров скоплений и условий теплообмена.

Методика. Основана на математической модели гетерогенного процесса окисления веществ, экспериментальных данных НИИГД и анализе литературных источников.

Результаты. Для описания динамики температур органических веществ при их самонагревании в результате реакций окисления предложено использовать математическую модель низкотермической адсорбции веществ, сопровождаемой реакциями первого порядка. Дано аналитическое решение задачи с учетом теплообмена скопления веществ с окружающей средой. Выполнены расчеты температур скопления угля в шахтах I – III групп эндогенной пожароопасности и инкубационного периода по 42 шахтам, где произошли пожары на пластах с объемной долей летучих веществ от 8 до 42 %. Рассчитана динамика температур при химическом окислении пяти других различных органических веществ и определена доля реакционной поверхности, вступающей в реакции окисления.

Выводы. Выполнено математическое моделирование динамики температур пяти типов органических веществ по экспериментальным данным НИИГД и литературным источникам. Показано, что начало самонагревания большинства веществ происходит за счет микробиологических процессов в течение 3...35 суток, после чего рост температур продолжается за счет химических реакций окисления.

Ключевые слова: органические вещества; пожароопасность; самовозгорание; пожар.

Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими задачами. Большинство органических веществ, таких, как сено, солома, травяная мука, уголь, при соприкосновении с воздухом изменяют температуру и нагреваются. Травяная мука сразу же после соприкосновения с воздухом вступает в реакции окисления.

Причиной выделения теплоты при хранении зерна, сена, семян масличных культур, волокон растительного и животного происхождения и подобных продуктов является поглощение кислорода плесенью, грибами и бактериями, которые содержатся в этих веществах и интенсивно размножаются при наличии необходимого количества влаги. Активный рост и размножение грибов при обычной температуре наблюдается при относительной влажности

воздуха до 96 % и равновесной влажности растительного сырья до 40 % и более [1].

Рост температуры, связанный с биологической активностью грибков, определяется разностью между скоростью выделения теплоты и теплопотерями. Наблюдаются две стадии жизнедеятельности микробиологических объектов, связанных с потреблением кислорода, выделением диоксида углерода и теплоты в массе растительного вещества [2].

Помимо этого, имеются еще два источника выделения дополнительной биологической теплоты. Первый из них – это дыхание растительных веществ, у которых жизнедеятельность продолжается некоторое время после их уборки с поля. Примером этого механизма является быстрое саморазогревание небольших куч свежескошенной травы. При формировании стога сена остаточная активность этого типа выделения теплоты может служить начальным импульсом для более энергичного микробиологического тепловыделения и таким образом влиять на самовозгорание и загорание стога. Этот способ выделения теплоты характерен и для хранилищ зерна, в которых при большой влажности зерно начинает прорасти. Однако этот процесс обычно быстро опережается процессом выделения теплоты микроорганизмами.

Вторым дополнительным источником может быть заражение насекомыми массива относительно сухого зерна. Главным следствием этого заражения оказывается появление влаги и повышение температуры в различных точках продукта, которые способствуют увеличению влажности не только в нагретых, но и в холодных частях массы вещества, а также развитию микробиологического разогревания.

Угли негазоносные и с малой массовой долей влаги сразу же после отделения от массива и измельчения по технологическим причинам или в результате горного давления начинают окисляться кислородом с выделением теплоты. Угли, содержащие метан и влагу, в течение некоторого времени (1...3 суток) дегазируются и за счет дросселирующего эффекта метана и испарения влаги несколько охлаждаются. В дальнейшем начинают протекать реакции окисления с выделением теплоты и угли нагреваются вплоть до самовозгорания (при ограниченной теплоотдаче).

Математические модели микробиологического самонагрева нам не известны, хотя опытные данные имеются [3, 4].

Что касается описания низкотемпературного окисления органических веществ за счет химических реакций окисления, то здесь есть несколько различных подходов и математических моделей, ранее анализированных и приведенных в работе [5].

Цель работы – математическое моделирование процессов низкотемпературного окисления веществ органического происхождения на основе предлагаемой математической модели их самовозгорания и экспериментальных данных о теплофизических свойствах веществ, размерах их

скоплений, условий теплообмена, критических температур самовозгорания, констант скоростей окисления.

Материалы и результаты исследований. Для описания динамики температуры органических веществ при их самонагревании в результате реакций окисления кислородом воздуха воспользуемся предложенной в работе [5] математической моделью:

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

где T_0, T – начальная и текущая температуры окисляющегося вещества, К;
 Γ_T – комплексный критерий генерации и отвода теплоты, определяемый зависимостью*

$$\Gamma_T = \Gamma_{T_1} - \Gamma_{T_2} - \Gamma_{T_3}, \quad (2)$$

где

$$\Gamma_{T_1} = \frac{\xi a_c a_{O_2} q k m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad \Gamma_{T_2} = \frac{q_{др} J_M m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad \Gamma_{T_3} = \frac{a_c q_B k_B w m^2}{\rho c_v T_0 a}; \quad (3)$$

ξ – доля реакционной поверхности, принимающей участие в окислении органического вещества;

a_c – концентрация реагента в веществе, моль/м³;

a_{O_2} – концентрация кислорода в веществе, моль/м³;

q – теплота реакции окисления вещества, Дж/моль;

k – константа скорости окисления вещества, м³/(с·моль);

m – толщина скопления вещества, м;

ρ – плотность вещества, кг/м³;

c_v – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К);

a – коэффициент температуропроводности вещества, м²/с;

$q_{др}$ – теплота дросселирования метана из угля, Дж/моль;

J_M – скорость выделения метана, моль/ (м³·с), определяемая зависимостью

*Параметры Γ_{T_2} и Γ_{T_3} используют при изучении самонагревания газонасыщенных и влажных углей.

$$J_M = G/t_{\Pi}, \quad (4)$$

G – газоносность пласта угля, моль/м³;
 t_{Π} – пороговое время самовозгорания угля, равное $3 \cdot 10^6$ с;
 k_B – константа скорости испарения влаги, м³/ (с·моль);
 q_B – теплота испарения влаги, Дж/моль;
 w – концентрация влаги в угле, моль/м³;
 Fo – критерий Фурье, определяемый по формуле

$$Fo = at / m^2; \quad (5)$$

t – время, с;
 μ_k^2 – корни уравнения [6]

$$tg\mu = -\frac{1}{Bi-1}\mu, \quad (6)$$

Bi – критерий $Bi = \alpha m / \lambda$;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/ (м²·К);
 λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/ (м·К);
 B_k – коэффициент уравнения [6].

Влияние химической активности вещества k на процесс его самонагревания подробно изучено ранее [7]. Теплота дросселирования метана $q_{др}$ изучена в работе [8], константа скорости испарения влаги k_B – в работе [9].

Как показали проведенные ранее исследования, с достаточной для практических целей точностью можно ограничиться одним членом суммы в уравнении (1) и одним корнем μ . Значение Bi , как правило, менее 1, что позволяет использовать связь $\mu^2 = 3Bi$ [6].

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

$$\ln \frac{T}{T_0} = \Gamma_T Fo. \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражения (3) и (5), получим

$$\ln \frac{T}{T_0} = \left(\frac{\xi a_c a_{O_2} q k}{\rho c_v T_0} - \frac{q_{др} J_M}{\rho c_v T_0} - \frac{a_c q_B k_B w}{\rho c_v T_0} \right) \frac{m^2}{a} \frac{a}{m^2} t, \quad (8)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\Gamma_T} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{Fo}$

Для случая теплообмена между скоплением самонагревающегося вещества и окружающей средой сделаем некоторые математические преобразования в уравнении (1), полагая $\mu^2 = 3Bi$, после чего получим

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \frac{1 - \left[\exp\left(\Gamma_T Fo\right) \right]^{-b}}{b}, \quad (9)$$

$$\text{где } b = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1. \quad (10)$$

Из сравнения уравнений (9) и (7) нетрудно видеть, что при $b = 1$ (когда $Bi = 0$) выражение (9) переходит в (7).

Доля реакционной поверхности для угля, вступающего в реакцию окисления ξ , находится согласно зависимости, приведенной в работе [10].

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6} (V^r)^2 + 2,99 \cdot 10^{-4} V^r + 3,76 \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

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

Для других органических веществ параметр ξ находится при лабораторном исследовании их окислительной способности.

Моделируя процесс самонагревания органических веществ, воспользуемся вначале экспериментальными данными о низкотемпературном окислении одного из наиболее изученных органических веществ – угля I, II и III групп эндогенной пожароопасности. Экспериментальные данные для 42 образцов углей разной степени углефикации, газоносности и влажности приведены в работе [11].

При вычислении динамики температур низкотемпературного окисления углей по выражению (9) с использованием данных [11] параметр Fo находился по формуле (5) для различных значений t . Критерий Bi , входящий в (10), вычисляется по формуле (6). Значения скопления углей принимались по данным [11].

На рис. 1 представлены кривые нарастания температур углей I группы пожароопасности по шести шахтопластам.

Последняя точка кривых соответствует критической температуре самовозгорания (ось y), найденной при лабораторных исследованиях углей, и соответствующее ей время инкубационного периода (ось x) для конкретных значений угольных скоплений в шахтах. Из представленных данных следует, что для пластов I группы пожароопасности инкубационный период самовозгорания углей длится 8...15 суток.

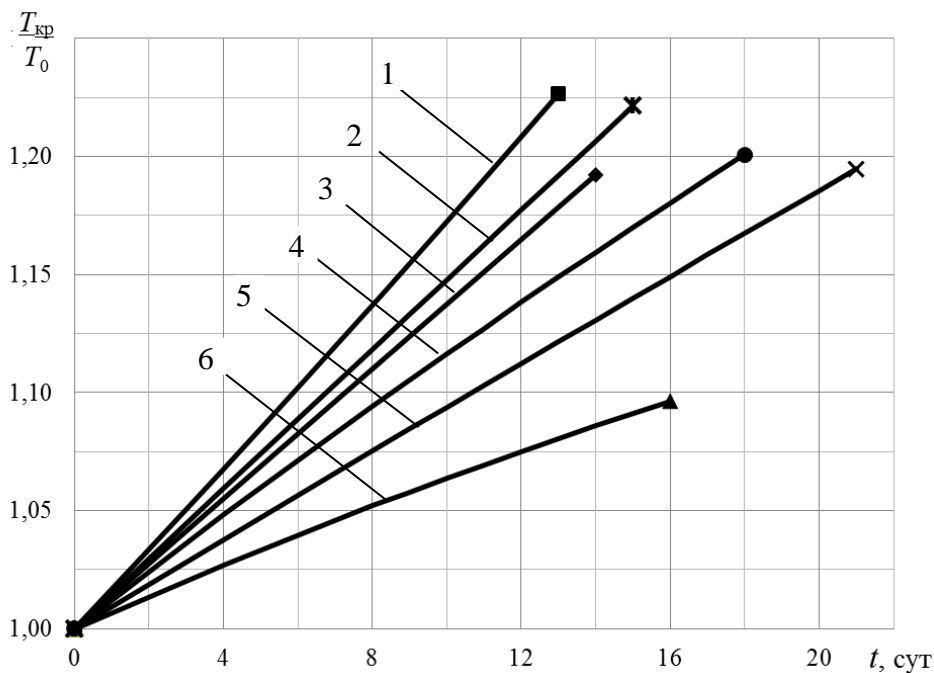


Рис. 1. I группа пожароопасности:

- 1 – шахта «Комсомолец», l_3 ; 2 – шахта «Комсомолец Донбасса», l_3 ; 3 – шахта «Северная», l_3 ;
 4 – шахта им. М.И. Калинина, k_7 ; 5 – шахта им. В.И. Ленина, l_3 ;
 6 – шахта им. Г.Г. Капустина, m_3

Аналогичным образом было выполнено математическое моделирование изменения температур самонагревающегося угля для II и III групп пожароопасности. Время инкубационного периода для II и III групп пожароопасности 12...29 и 23...36 суток соответственно.

Таким образом, увеличение времени инкубационного периода самовозгорания углей с понижением группы пожароопасности шахт, полученное в реальных условиях их самовозгорания, наглядным образом характеризует пожароопасность их скоплений в результате промышленной деятельности.

Обратимся теперь к другим органическим веществам.

Лабораторные исследования процесса самовоспламенения влажных растительных веществ проводились в адиабатическом калориметре на образцах сена из травы люцерны [1, 2]. При этом начальная разность температур между центром образца и окружающей средой во всех опытах не превышала 0,25 °С. Установка позволяла поддерживать относительную влажность воздуха от 86 до 100 %. В зависимости от относительной влажности объемная доля воды в сене изменялась от 24 до 76 %. Как показали испытания (рис. 2), рост температуры в образце выше предельного для микробиологической активности значения 75 °С наблюдался в достаточно узком диапазоне относительной влажности воздуха, который только немного меньше 100 %.

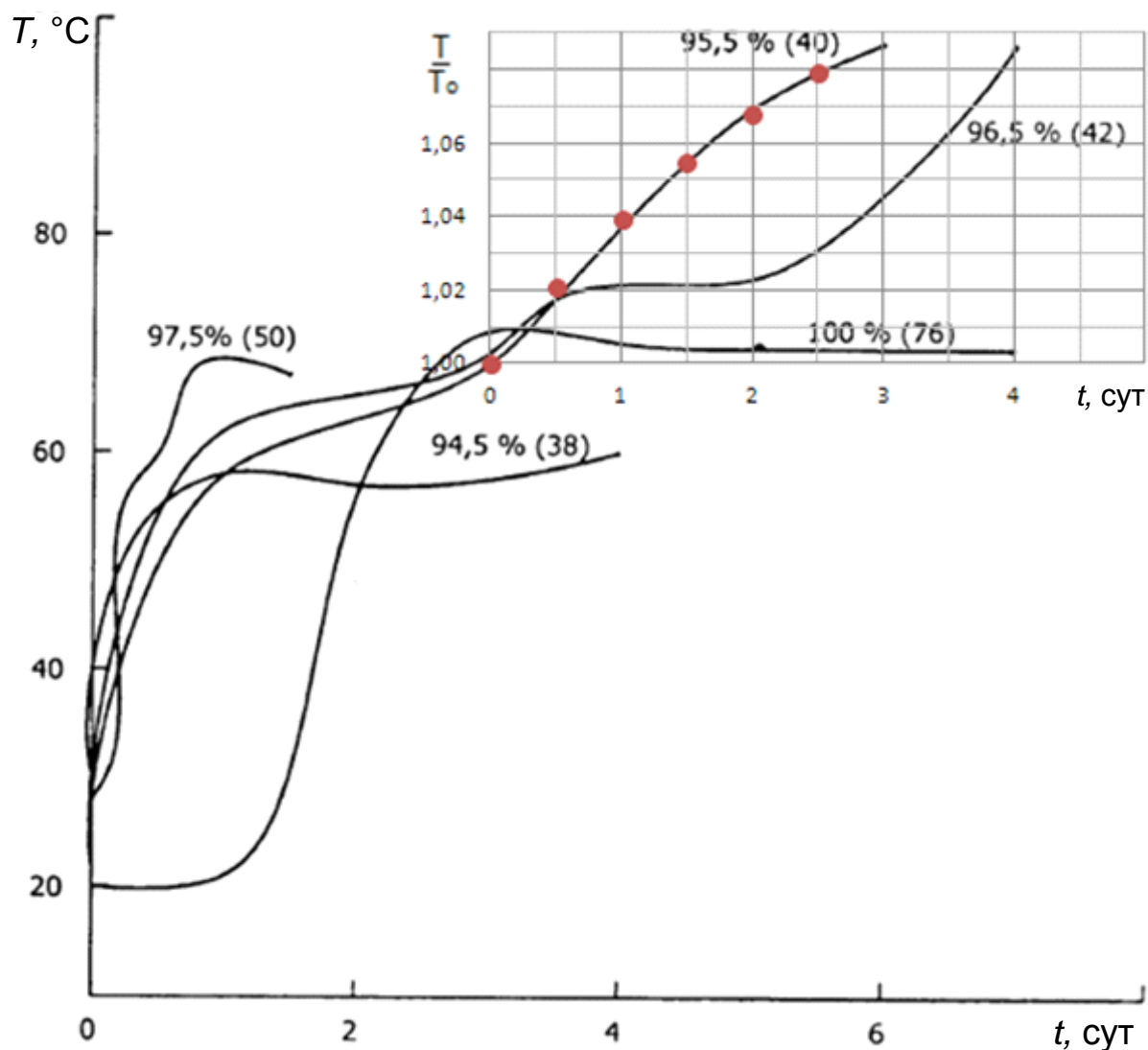


Рис. 2. Самонагревание влажного сена в адиабатическом калориметре (цифры у кривых – относительная влажность воздуха, %, цифры в скобках – влажность продукта, %) по данным работы [2]

Соответствующая этому интервалу абсолютная влажность продукта равнялась 38...48 %. При относительной влажности более 97 % и менее 94,5 % температура в образцах достигает некоторого предельного значения, меньшего 75 °С и обусловленного размножением и ростом микроорганизмов.

Как следует из рис. 2, после достижения образцами сена температуры 70...75 °С при влажности 95...96 % нагревание продолжилось за счет химических реакций окисления. Для расчета динамики температур сена в этот период времени используем найденную ранее зависимость (9), принимая следующие характеризующие сено параметры: $T_0 = 341$ К; $T_{кр} = 370$ К; $q = 3,5 \cdot 10^5$ Дж/моль; $\rho = 200$ кг/м³; $R = 0,05$ м; $C_v = 1300$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,15/(м·К)$; $K = 12 \cdot 10^{-9}$ м³/(с·моль); $\xi = 0,1$; $\alpha = 0,07$ Вт/(м²·К); $a = 2,1 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Расчетные данные динамики температур для сена с влажностью 95,5 %, совмещенные с измеренными [1, 2], показаны в верхней части рис. 2. Почти полное соответствие расчетных значений температур измеренным свидетельствует о применимости предложенной теории самонагрева органических веществ к одному из них – влажному сену.

Исследования самонагрева веществ растительного происхождения, таких, как травяная мука, сосновые опилки, зерно пшеницы и семена подсолнечника, проводили ранее на лабораторной установке, представляющей собой деревянный ящик с теплоизолированными пенопластом толщиной 5 см стенками. Внутренний объем размером 50×50×100 см заполняли исследуемым сырьем через съемный верх. Исследуемый слой был толщиной 0,2 м, влажностью 50...60 % и помещался внутри верхнего и нижнего слоев с влажностью 20...35 %. При комнатной температуре в центральном слое из-за повышенной влажности активно развивались спороносные микробы, гнилостные грибки, актиномицеты, бактерии, что приводило к выделению теплоты и повышению температуры. Температуру в слое измеряли термомпарами. По достижении 75...80 °С термофильные микроорганизмы гибли и дальнейшее повышение температуры происходило за счет протекания экзотермических химических процессов окисления растительного сырья кислородом.

Математическое описание изменения температуры некоторых органических веществ после начала процессов окисления дано с использованием зависимости (9) и теплофизических параметров исследуемого сырья.

Сводные данные по результатам выполненного моделирования нарастания температур некоторых органических веществ представлены в таблице.

Результаты моделирования процесса самовозгорания органических веществ

| Вещество | ξ | $K \cdot 10^{-9}$, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$ | Длительность нагрева, сут | |
|--|-------|--|---------------------------|--|
| | | | микро- организмами | в результате химиче- ского реагирования |
| Сено влажностью 38...76 % в адиабат. калориметре | 0,1 | 12 | 3 | 2 |
| Мука травяная влажн. 40...50 % | 0,1 | 11 | 33 | 18 |
| Опилки сосновые влажн. 60 % | 0,1 | 11 | 35 | 7 |
| Семена пшеницы влажн. 26 % | – | – | 21 | – |
| Семена подсолн. влажн. 15,4 % | 0,1 | 8 | 24 | 22 |

Из результатов исследований динамики температур при самонагревании органических веществ, представленных в таблице и на рисунках, следует:

- динамика температур «органического вещества – угля» может быть описана предложенной математической моделью. Инкубационный период самовозгорания углей в зависимости от категории пожароопасности равен от 9 до 36 сут;

- температура таких органических веществ, как сено, травяная мука, сосновые опилки, семена подсолнечника, в диапазоне 0...70 °С поднимается в течение 3...35 сут за счет биологических процессов, а затем химических и продолжается до самовоспламенения в течение 2...18 сут;

- температура семян зерновых в течение 2...3 недель в зависимости от влажности поднимается до 60...65 °С, после чего физико-химические свойства зерен изменяются, они чернеют и дальнейшее самонагревание прекращается (по данным авторов [4]).

Выводы. Выполнено математическое моделирование динамики температур шести типов веществ органического происхождения на основе предложенной модели их самонагревания и экспериментальных данных различных авторов. Показано, что начало самонагревания большинства веществ происходит за счет микробиологических процессов, осуществляемых различными микроорганизмами. Дальнейшее повышение температуры происходит за счет химических реакций окисления.

Список литературы / References

1. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов. – М.: ВНИИПО, 2003. – 446 с.

Gorshkov, V.I. *Samovozgoraniye veshchestv i materialov* [Spontaneous combustion of substances and materials]. Moscow, VNIPO Publ., 2003, 446 p.

2. Bowes P.C. Self-heating: evaluating and controlling the hazards. – London, 1984. – 500 p.

3. Рубцов Ю.И., Казаков А.И., Рубцова Е.Ю. Кинетические закономерности тепловыделения при развитии микроорганизмов на зерне пшеницы и оценка возможности теплового самовоспламенения, инициированного этим процессом // Химическая физика. – 2003. – Т. 22, № 6. – С. 79 – 86.

Rubtsov, Yu.I., Kazakov, A.I., Rubtsova, Ye.Yu. *Kineticheskiye zakonomernosti teplovydeleniya pri razvitiy mikroorganizmov na zerne pshenitsy i otsenka vozmozhnosti teplovogo samovosplamneniya, initsirovannogo etim protsessom* [Kinetic conformities of heat emission by development of microorganisms on the grain of wheat and assessment of the possibility of thermal self-ignition initiated with this process]. *Khimicheskaya fizika – Chemical Physics*, 2003, vol. 22, no. 6, pp. 79 – 86.

4. Возникновение очага самосогревания при хранении зерна / А.В. Крестинин, Н.И. Перегудов, Н.Г. Самойленко, Г.Б. Манелис // Химическая физика. – 2002. – Т. 21, № 12. – С. 54 – 65.

Krestinin, A.V., Peregudov, N.I., Samoilenko, N.G., Manelis, G.B. *Vozniknoveniye ochaga samosogrevaniya pri khranении zerna* [The emergence of the self-warming hearth in storage of grain]. *Khimicheskaya fizika – Chemical Physics*, 2002, vol. 21, no. 12, pp. 54 – 65.

5. Пашковский П.С., Греков С.П., Орликова В.П. Критические параметры самовозгорания угля // Уголь Украины. – 2016. – № 1. – С. 23 – 27.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Kriticheskiye parametry samovozgoraniya uglya* [Critical parameters of the spontaneous ignition of coal]. *Ugol' Ukrainy - Coal of the Ukraine*, 2016, no. 1, pp. 23 – 27.

6. Лыков А.В. Теория теплопроводности – М.: Высш. шк., 1997. – 599 с.

Lykov, A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1997, 599 p.

7. Греков С.П., Калюсский А.Е., Кошовский Б.И. Влияние динамики хемосорбции кислорода углями на их склонность к самовозгоранию // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1995. – С. 21 – 28.

Grekov, S.P., Kalyusskiy, A.Ye., Koshovskiy, B.I. *Vliyanie dinamiki khemosorbtsii kisloroda uglyami na ikh sklonnost' k samovozgoraniyu* [The impact of the dynamics of oxygen chemisorption with coals on their propensity to spontaneous combustion]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 1995, pp. 21 – 28.

8. Греков С.П., Орликова В.П., Всякий А.А. Охлаждение угля за счет дросселирования выделяющегося метана // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 97 – 106.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya za schyot drosselirovaniya vydelyayushchegosya metana* [Cooling of coal at the expense of throttling of the emitting methane]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 60, pp. 97 – 106.

9. Пашковский П.С., Греков С.П., Зинченко И.Н. Влияние кинетической активности и влажности углей на процесс самовозгорания // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 17 – 25.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Vliyaniiye kineticheskoy aktivnosti i vlazhnosti ugley na protsess samovozgoraniya* [Influence of kinetic activity and moisture of coals on the process of the spontaneous combustion]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2007, issue 44, pp. 17 – 25.

10. Греков С.П., Всякий А.А., Орликова В.П. Особенности низкотемпературного окисления углей и их пожароопасность // Уголь Украины. – 2015. – № 7-8. – С. 51 – 54.

Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Orlikova, V.P. *Osobennosti nizkotemperaturnogo okisleniya ugley i ikh pozharoopasnost'* [Features of the low-temperature oxidation of coals and their fire hazard]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2015, no. 7-8, pp. 51 – 54.

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

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

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Н.В. Карнаухом.
Дата поступления рукописи 03.03.2016

Pyetr Semyenovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science; e-mail: niigd@mail.ru;
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department, e-mail: obep.niigd@list.ru;
Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, senior scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru;
Kristina Valeriyevna Hlushenko, engineer of the first category, e-mail: kristina_hlushenko@mail.ru;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-13-52

THE MATHEMATICAL MODELING OF FORMING THE TEMPERATURE FIELDS BY THE SPONTANEOUS HEATING OF ORGANIC SUBSTANCES

Purpose. Creation of the mathematical model of the processes of the low-temperature oxidation of the substances of organic origin on the basis of the mathematical model of their heating proposed and experimental data about thermal properties, dimensions of accumulations and heat exchange conditions.

Methods. The methods are based on the mathematical model of the heterogeneous process of oxidation of the substances, experimental data of the NIIGD and analysis of literature sources.

Results. To describe the dynamics of the temperatures of the organic substances by their spontaneous heating as a result of the oxidation reactions it is proposed to use the mathematical model of the low-temperature adsorption of the substances being accompanied by the first-order reactions. The analytical solution of the problem taking into account the heat exchange of the substance accumulation with the environment is given. The calculations of the temperatures of the coal accumulation were fulfilled in the mines of the Ist – IIIrd groups of the endogenous fire hazard and of the incubation period in 42 mines, where the fires occurred on the seams with the volume fraction of volatile matters from 8 up to 42 %. The dynamics of the temperatures by the chemical oxidation of five another various organic substances was calculated, and the portion of the reaction surface entering in the oxidation reactions was determined.

Conclusions. The mathematical modeling of the dynamics of the temperatures of five types of the organic substances was fulfilled according to the experimental data of the NIIGD and literature sources. It is shown that the beginning of the spontaneous heating of the most substances occurs at the expense of microbiological processes during 3...35 twenty-four hours, whereat the temperature increase continues at the expense of the chemical oxidation reactions.

Keywords: *organic substances; fire hazard; spontaneous ignition; fire.*

УДК [622.647.2-418-036:614.841.12]:001.891.53

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

e-mail: niiigd@mail.ru;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-70-29*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Разработка алгоритма определения кинетических показателей реакции термической деструкции материала при обтекании его ламинарным высокотемпературным воздушным потоком.

Методы. Использованы расчетно-экспериментальный метод для определения энергии активации и скорости реакции термодеструкции горючего материала, а также статистический – для оценки погрешности измерений массы материала при различных температурах термостатирования.

Результаты. Разработан алгоритм методики расчета кинетических показателей термодеструкции горючих материалов при испытании их на модернизированной установке для экспериментального определения температурных показателей твердых веществ и материалов.

Научная новизна. На основе разработанной методики впервые установлены численные значения кинетических показателей реакции термического разложения резин с антипиренами, используемых для обкладок шахтных конвейерных лент.

Ключевые слова: *термодеструкция; кинетические показатели; горючий материал; воздушный поток; энергия активации; константа скорости реакции; оценка погрешности.*

Постановка задачи. При исследовании процессов взаимодействия высокотемпературных воздушных потоков с твердыми горючими материалами представляет научный и практический интерес изучение реакции термического разложения, когда скорость выхода летучих компонентов будет достаточной для их воспламенения. Одним из основных показателей, характеризующих эту скорость, является энергия активации, которую определяют расчетно-экспериментальным методом с использованием специальных лабораторных установок для определения динамики массы материала при различных температурах термостатирования. Энергия активации является тем фактором, посредством которого связывается влияние параметров материала и воздушного потока на скорость реакции.

Практическое осуществление термодеструкции чаще всего происходит в условиях подъема температуры с постоянной или переменной скоростью, поэтому кинетика процесса в подавляющем большинстве случаев оказывается неизотермической, что тоже выдвигает свои требования к методике исследования. Удобным способом лабораторного моделирования и изучения кинетики термического разложения веществ является метод Фримена и Кэррола, который основан на измерении потери массы исследуемого образца за счет выделения летучих веществ при изменении его температуры [1, 2],

энергия активации термического разложения рассматривается как один из важных кинетических параметров при изучении механизмов термической деструкции. Кинетические параметры термодеструкции используются в расчете ряда характеристик процесса горения, например, критического теплоотвода от нагретого тела, скорости линейного пиролиза и других. Для определения энергии активации процесса разложения органических полимеров используют данные динамической термогравиметрии [3, 4], полученные при разных скоростях нагревания, что в несколько раз увеличивает время проведения эксперимента. Поэтому вопрос о том, как точно, быстро и с меньшей трудоемкостью определять энергию активации, достаточно актуален.

Цель исследования. Разработка алгоритма определения кинетических показателей реакции термической деструкции материала при обтекании его ламинарным высокотемпературным воздушным потоком.

Материалы и результаты исследований. Для исследования процесса термоокислительной деструкции материалов и определения эффективных кинетических характеристик реакции была использована установка для определения температурных показателей твердых материалов. Однако в ее конструкцию внесены незначительные изменения (рис. 1).

Одной из составных частей установки является цилиндрическая реакционная камера диаметром рабочего пространства 100 мм и высотой 250 мм. Камера нагревается двумя электронагревателями, каждый из которых состоит из пяти соединенных параллельно спиралей, расположенных в кольцевых керамических желобах.

Температура в реакционной камере устанавливалась и стабилизировалась при помощи системы термостатирования с точностью ± 2 °С. Измерение температуры производилось двумя термопарами типа ТХК, выведенными на милливольтметр. При этом одна термопара была подключена к регулятору температуры ПСР1-01 (класс точности 0,5), а другая – к милливольтметру М-64 (класс точности 1,5). Рабочий спай термопар устанавливался в непосредственной близости от образца.

Внутри реакционной камеры находится образец материала массой 0,5 г, подвешенный к торсионным весам типа ВТ-500, абсолютная погрешность показаний которых во всем диапазоне шкалы ± 1 мг. Малая толщина навески материала позволяет быстро термостатировать образец по всему объему, что приводит к более полному выходу летучих при данной температуре.

Для создания оптимальных условий испытания образца материала в реакционную камеру подавали воздух, который нагревался при прохождении по желобам с накаливаемыми спиралями. Постоянный расход воздуха $7,5 \cdot 10^{-4}$ м³/с (45 л/мин).

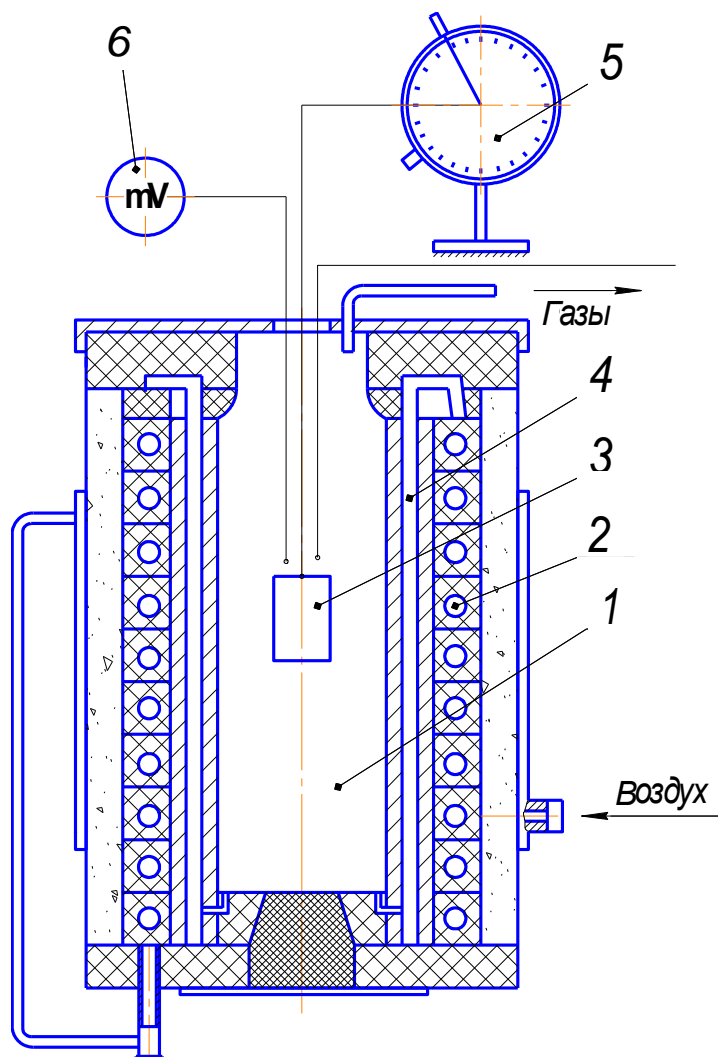


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования термодеструкции и горения в воздушном потоке твердых материалов: 1 – реакционная камера; 2 – электроспирали нагревателя; 3 – образец материала; 4 – термопара системы термостатирования; 5 – весы торсионные; 6 – милливольтметр

Для нагревания до требуемой температуры T_k при закрытой камере к нагревателям подавали напряжение 180 В и поддерживали его в течение некоторого времени. Затем на основном нагревателе напряжение снижали до рабочего

$$U_{\text{он}} = 0,276T_k + 17,$$

а на дополнительном электронагревателе – до значения $U_{\text{он}}/2$.

При установлении выбранного температурного режима, который фиксировали по показаниям милливольтметра, быстро прикрепляли к весам образец материала и закрывали камеру. После достижения в камере

температуры T_k фиксировали динамику массы образца до полного выхода летучих продуктов из материала.

При термостатировании образца по всему объему скорость изменения массы W , кг/(м²·с), достаточно высокая, поэтому необходимо определять массу на весах ВТ-500 за малый промежуток времени. Этим может быть уменьшена ошибка определения скорости реакции термоокислительной деструкции материала.

Зависимость скорости реакции от температуры:

$$W = \rho_s K_1, \quad (1)$$

где K_1 – константа скорости химической реакции, отнесенной к поверхности образца материала, подчиняется известному закону Аррениуса, м/с;

$$K_1 = k_0 \exp(-E/RT_{1к}), \quad (2)$$

$T_{1к}$ – температура в реакционной камере, К.

Энергия активации E может быть определена опытным путем по скоростям реакции согласно формуле

$$E = \frac{R \ln(K_2/K_1)}{1/T_{1к} - 1/T_{2к}}, \quad (3)$$

где K_2 – константа скорости химической реакции, отнесенной к поверхности образца материала, при температуре испытания $T_{2к}$, м/с.

Однако такое определение энергии активации E не обеспечивает достаточной точности и рекомендуется при этом определение энергии активации проводить не менее чем по четырем значениям константы скорости при четырех различных температурах.

Исходя из того, что скорость реакции пропорциональна константе K , можно записать:

$$\frac{\Delta m}{\Delta \tau} = K.$$

Предполагая, что поверхность образца материала при испытываемых температурах в реакционной камере существенно не изменяется, для выбранного остатка массы образца при различных температурах можно записать равенство

$$\frac{\Delta m}{\Delta \tau M} = K, \quad (4)$$

где Δm – потеря массы образца материала за время $\Delta \tau$, кг;

M – масса остатка, кг.

При выполнении уравнения Аррениуса зависимость константы скорости химической реакции от температуры в координатах $\lg K - 1/T$ графически изображается прямой линией. Энергия активации в этом случае может быть определена графически по тангенсу угла наклона прямой по формуле

$$E = 2,303R|\operatorname{tg}\hat{\alpha}|\xi_1, \quad (5)$$

где $\hat{\alpha}$ – угол наклона кривой к оси абсцисс, ...°;

ξ_1 – отношение масштабов по оси абсцисс и оси ординат.

По разработанной методике проведены экспериментальные исследования резиновых обкладок конвейерных лент для шахт на лабораторной установке при различных температурах в реакционной камере: 533; 523; 488 К.

Испытуемые образцы резины имели размеры $16 \times 10 \times 2,5$ мм. Изменение массы образца материала для условий, когда он был термостатирован по всему объему при выбранных значениях температур, представлено на рис. 2. При этом графики построены по средним значениям массы образца, изменяющейся во времени. На участке резкого изменения массы для трех графиков выбрано одно и то же значение массы остатка. Для удобства таким значением является $M = 450 \cdot 10^{-6}$ кг. При данном значении на графиках изменения массы были проведены касательные, тангенс угла наклона которых характеризует скорость реакции термоокислительной деструкции. Тогда значения констант скорости химической реакции при различных температурах определяли по формуле (4):

$$K_{1к} = 0,01555; \lg K_{1к} = \bar{2},1903;$$

$$K_{2к} = 0,0222; \lg K_{2к} = \bar{2},3464;$$

$$K_{3к} = 0,00107; \lg K_{3к} = \bar{3},0294,$$

где $K_{1к}, K_{2к}, K_{3к}$ – константы скорости химической реакции при значениях температуры в реакционной камере 533; 523; 488 К соответственно.

Зависимость константы скорости от температуры для реакции термического разложения резины обкладок шахтной конвейерной ленты БКНЛ-150 в аррениусовых координатах приведена на рис. 3. В выбранном масштабе $|\operatorname{tg}\hat{\alpha}| = 0,7$, а отношение масштаба

$$\xi_1 = \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 0,1} = 10^4.$$

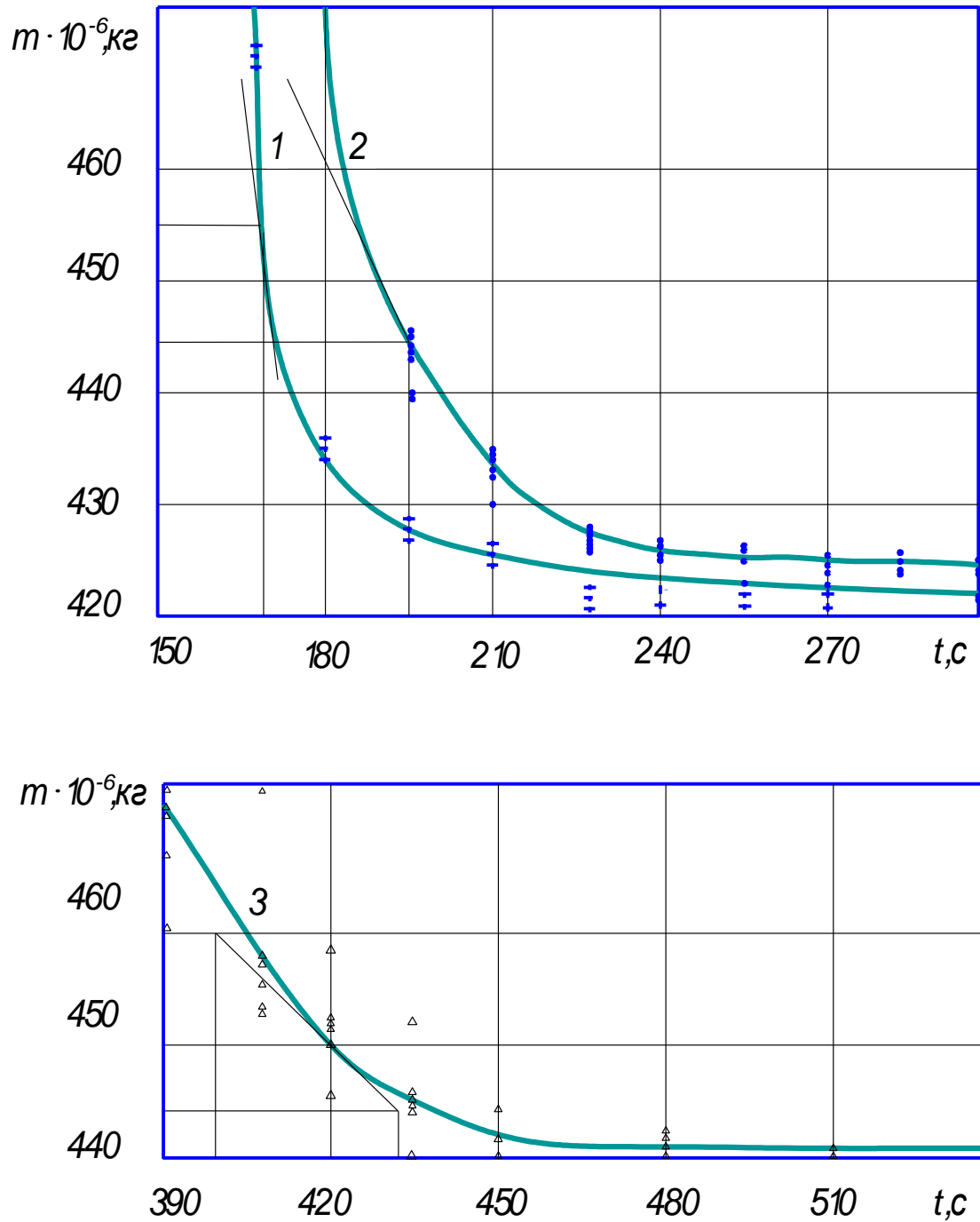


Рис. 2. Динамика массы образца обкладки резиноканевой конвейерной ленты БКНЛ-150 при различных температурах термостатирования:
1 – при $T = 533 \text{ K}$; 2 – при $T = 523 \text{ K}$; 3 – при $T = 488 \text{ K}$

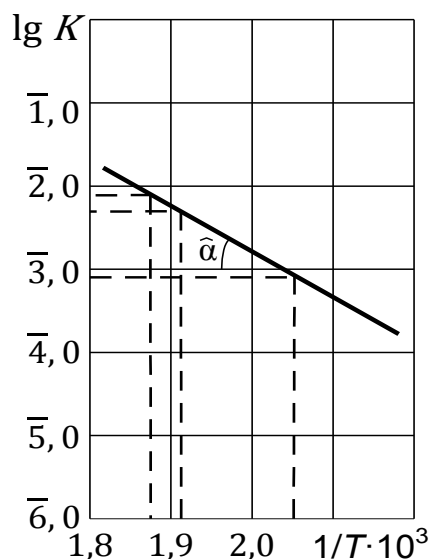


Рис. 3. Зависимость константы скорости реакции термического разложения от температуры для обкладок конвейерной ленты БКНЛ-150

Используя формулу (5) для численного определения энергии активации E , получим $E = 1,34 \cdot 10^8$ Дж/кмоль.

При значении температуры $T_{1к} = 533$ К константу скорости химической реакции, отнесенную к единице поверхности испытуемого образца, определяют по формуле

$$K_1 = K_{1к} \frac{V_{об}}{S_{пол}}, \quad (6)$$

где $V_{об}, S_{пол}$ – объем и полная поверхность образца резины, m^3, m^2 соответственно.

Подставив в формулу (6) численные значения, получим $K_1 = 1,328 \cdot 10^{-5}$ м/с.

На основании полученных численных значений кинетических характеристик определим скорость химической реакции по формуле (1). Тогда $W = 1,66 \cdot 10^{-2}$ кг/($m^2 \cdot c$).

Таким образом, предложенная методика позволила экспериментально-расчетным путем получить численные эффективные значения кинетических характеристик и скорости реакции термоокислительной деструкции резины, используемой для обкладок шахтных конвейерных лент.

Погрешность определения энергии активации E в конечном счете зависит от точности определения отношения $\Delta m / \Delta t$ на участках резкого изменения массы навески резины, где и выбирали значения для расчета E при различных $T_{1к}$.

Для определения погрешности результатов воспользуемся коэффициентом Стьюдента [5], зависящим от количества произведенных измерений n и от значения α_n :

$$\Delta a = t_\alpha S_{\bar{a}}, \quad (7)$$

где Δa – погрешность результата;

t_α – коэффициенты Стьюдента;

$S_{\bar{a}}$ – среднеквадратичная погрешность результата серии измерений;

$$S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (8)$$

При этом

$$\Delta a_i = \bar{a} - \bar{a}_i; \quad \bar{a} = \frac{\Delta m_{cp}}{\Delta \tau}; \quad \bar{a}_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta \tau};$$

$$\Delta m_{cp} = m_{cp_1} - m_{cp_2}; \quad \Delta m_i = m_{i_1} - m_{i_2}; \quad \Delta \tau = \tau_2 - \tau_1.$$

При надежности $\alpha_n = 0,95$ и количестве проведенных экспериментов $n = 9$ для каждого значения температуры определим по таблицам значение коэффициента Стьюдента: $t_\alpha = 2,31$. Результаты определения погрешности $S_{\bar{a}}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета среднеквадратичной погрешности серии измерений при различных температурах термостатирования

| T, K | τ_2, c | τ_1, c | \bar{a} | \bar{a}_1 | \bar{a}_2 | \bar{a}_3 | \bar{a}_4 | \bar{a}_5 | \bar{a}_6 | \bar{a}_7 | \bar{a}_8 | \bar{a}_9 | $S_{\bar{a}}$ |
|--------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 533 | 180 | 165 | 2,59 | 2,07 | 2,2 | 2,07 | 2,47 | 2,27 | 2,0 | 2,4 | 2,27 | 2,13 | 0,1447 |
| 523 | 195 | 180 | 2,38 | 2,13 | 2,26 | 2,53 | 2,67 | 2,47 | 2,4 | 2,13 | 2,26 | 2,6 | 0,0664 |
| 488 | 405 | 390 | 0,68 | 0,47 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,67 | 1,0 | 0,6 | 0,73 | 0,6 | 0,0513 |

Погрешность измерения массы навески при различных значениях температуры термостатирования равна

$$\Delta a_{1K} = 0,334; \quad \Delta a_{2K} = 0,153; \quad \Delta a_{3K} = 0,118.$$

Относительная погрешность при различных значениях температуры термостатирования равна соответственно

$$\varepsilon_{1K} = 12,9 \%; \quad \varepsilon_{2K} = 6,4 \%; \quad \varepsilon_{3K} = 17,4 \%; \quad \varepsilon_{cp} = 12,2 \%.$$

Выводы

Разработанная методика позволяет рассчитать кинетические показатели реакции термодеструкции твердого горючего материала с использованием лабораторной установки для определения его температурных показателей.

Список литературы / References

1. Крамаренко В.Ю. Неизотермическая кинетика в термическом анализе полимеров. Простые реакции // Вісник НТУ «ХПІ». – Харьков, 2013. – № 64. – С. 64 – 75.

Kramarenko, V.Yu. *Neizotermicheskaya kinetika v termicheskom analize polimerov. Prostyye reaktsii* [Nonisothermic kinetics in thermal analysis of polymers. Single reactions]. *Visnyk NTU KhPI* [Bulletin of the NTU KhPI]. Kharkov, 2013, no. 64, pp. 64 – 75.

2. Определение кинетических параметров термодеструкции полимерных материалов по данным динамической термогравиметрии / сост. И.П. Петряк, А.Н. Гайданин, С.А. Ефремова / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – 12 с.

Petryuk, I.P., Gaydadin, A.N., Yefremova, S.A. *Opredeleniye kineticheskikh parametrov termodestruksii polimernykh materialov po dannym dinamicheskoy termogravimetrii* [Determination of kinetic parameters of thermodestruction of polymeric materials according to data of the dynamic thermogravimetry]. Volgograd, VolgGTU, 2010, 12 p.

3. Прокопчук И.Р. Определение энергии активации деструкции полимеров по данным динамической термогравиметрии // Пластические массы. – 1983. – № 10. – С. 24 – 25.

Prokopchuk, I.R. *Opredeleniye energii aktivatsii destruksii polimerov po dannym dinamicheskoy termogravimetrii* [Determination of the activation energy of destruction of polymers according to data of the dynamic thermogravimetry]. *Plasticheskiye massy – Plastic masses*, 1983, no. 10, pp. 24-25.

4. Разработка и исследование поведения динамических термоэластопластов / В.А. Лукасик, А.Н. Гайданин, Д.А. Куцов, Е.С. Голикова // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 9 – 12.

Lukasik, V.A., Gaydadin, A.N., Kutsov, D.A., Golikova, Ye.S. *Razrabotka i issledovaniye povedeniya dinamicheskikh termoelastoplastov* [Working-out and investigation of the behavior of dynamic thermoplastic rubbers]. *Nauka – proizvodstvu - Science to production*, 2005, no. 1, pp. 9-12.

5. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

Tret'yak, L.N. *Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya* [Processing the observational results]. Orenburg: GOU OGU, 2004, 171 p.

*Valeriy Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science; e-mail: niigd@mail.ru;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-70-29.*

DETERMINATION OF KINETIC INDICES OF THERMODESTRUCTION OF COMBUSTIBLE MATERIALS

Purpose. Working-out the algorithm of determination of kinetic indices of the reaction of thermal destruction of a material by its flow with the laminar high-temperature air stream.

Methods. The experiment-calculated method to determine the activation energy and the reaction velocity of thermal destruction of the combustible material as well the statistical one to estimate the measurement errors of the mass of the material at various temperatures of the thermostating were used.

Results. The algorithm of the methods of calculation of kinetic indices of thermodestruction of the combustible materials by their testing at the modernized installation for experimental determination of the temperature indices of solid substances and materials was worked out.

Scientific novelty. On the basis of the methods worked out the numerical values of kinetic indices of the reaction of thermal decomposition of rubbers with fire retardants being used for covers of the mine conveyor belts were established for the first time.

Keywords: *thermodestruction; kinetic indices; combustible material; air flow; activation energy; reaction velocity constant; estimation of error.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.822.24:622.411.33

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

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»;

283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 311-52-85;

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-69-51;

Ярослав Витальевич Шажко, канд. техн. наук, замдиректора; e-mail: syarilo@mail.ru;

Надежда Владимировна Хащеватская, аспирант; e-mail: mailbox93@gmail.com;

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»;

283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 311-52-85

ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПАСНОГО ГАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВОЗГОРАНИИ УГЛЯ В ПЛАСТОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Цель. Разработка критериев оценки уровня и времени образования опасных концентраций метана и других углеводородов при пожарах в пластовых горных выработках.

Методы. Экспериментальные исследования скорости и объемного выхода газообразных продуктов термического разложения углей и теоретическая оценка кинетики формирования стационарных концентраций углеводородов при движении фронта теплового потока в глубь угольного массива.

Результаты. Установлены закономерности, характеризующие степень влияния температуры на стадии десорбции метана из угля, образования летучих и его газификацию. Впервые оценку кинетики и уровня концентрации метана в зависимости от температуры угольного массива предложено определять по ряду критериев, основанных на учете интенсивностей потока метана и проветривания, эффективной диффузии как функции энергии активации выхода метана от температуры, и по изменению концентрации горючих газов в выработке в зависимости от их объема на разных стадиях горения угля.

Практическая значимость. Предложены методы определения концентрации и времени образования опасных концентраций метана и других углеводородов на стадии прогноза развития экзогенного пожара и для фактической оценки вне зависимости от степени проветривания горной выработки.

Ключевые слова: *скорость горения; кинетика газовыделения; интенсивность потока; стадии процесса горения.*

Актуальность темы. Эксплуатация угольных месторождений сопровождается рядом негативных явлений, в частности, экзогенными и эндогенными пожарами. Особую опасность представляют экзогенные пожары, вызывающие нагревание и возгорание угольного массива. Термическое воздействие на угольное вещество в пределах 280...320 °С в зависимости от марки угля приводит к десорбции сорбированного метана, а при более высоких температурах к химической деструкции с выделением значительных объемов

метана, водорода, оксида углерода и высших углеводов. При развитии пожара в пластовых подготовительных выработках нарушается режим проветривания, что приводит к образованию зон повышенной концентрации метана в воздухе, появлению слоевых скоплений, а в целом может привести к возгоранию метановоздушной среды и взрыву метана с вовлечением угольной пыли. При ликвидации пожаров, спасении горнорабочих и оборудования с привлечением подразделений горноспасателей чрезвычайно актуально прогнозировать время образования опасных концентраций метана с момента начала пожара. До настоящего времени не разработан достоверный метод определения времени образования опасных концентраций метана при пожарах в пластовых подготовительных выработках, учитывающий условия развития пожара в них (или в другом замкнутом пространстве) по совокупности процессов газовыделения горючего газа за счет десорбции метана при нагревании и горении угля.

Постановка проблемы. Время достижения опасной концентрации метана является сложной функцией совокупности процессов газовыделения при нагревании и горении угля. К этим процессам относятся:

- десорбция метана прилегающим к очагу горения массивом угля в результате его нагревания до 100...300 °С;
- образование газообразных летучих продуктов, в том числе и метана при нагревании угля до 300...1000 °С;
- газификация угля (и образующегося кокса), особенно в условиях неполного сгорания (при ограниченном доступе воздуха).

В зависимости от условий развития пожара в выработке (или в другом замкнутом пространстве) вклад указанных процессов может быть разным – от преимущественного разогревания прилежащего угля небольшим очагом горения (с выделением сорбированного метана) до самопроизвольного тушения продуктами горения и газификации. В практическом отношении наибольший интерес представляют начальные стадии возгораний (пожаров с образованием горючего газа за счет десорбции метана при нагревании угля).

Цель работы. Определение критериев оценки уровня и времени образования опасных концентраций метана и других углеводородов при пожарах в пластовых горных выработках.

Результаты исследований. Для исследования использовали угли марок Д, Г, Ж, К, ОС, Т, А.

Отбирали пробы угля в процессе подготовки и отбойки угольного пласта в очистном забое с глубины 0,2...0,3 м от его поверхности не менее чем из двух точек, расположенных на расстоянии 50...70 м.

На пластах сложного строения отбирали дифференциальные пробы из каждой пачки. Места отбора проб должны быть, как правило, удалены от зон, где нагнетали воду, и от дегазационных скважин не менее чем на 20 м.

На пологих пластах пробы отбирают с каждого пласта на каждом крыле в бремсберговых и наклонных частях шахтного поля. На пластах крутого падения

на каждом вновь подготавливаемом этаже. Отбитый уголь собирают методом квартования (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика исследуемых проб ископаемых углей

| № пробы | Шахта | Пласт | Марка угля | Влажность угля аналитическая W^c , % | Зольность A^d , % | Выход летучих веществ V , % |
|---------|-----------------------|---------|------------|--|---------------------|-------------------------------|
| 1 | «Трудовская» | l_4 | Д | 2,4 | 5,1 | 39,2 |
| 2 | Им. Е.Т. Абакумова | m_3 | Д | 2,5 | 4,18 | 38,75 |
| 3 | Им. А.Г. Стаханова | l_3 | Г | 1,14 | 4,88 | 32,66 |
| 4 | Им. А.Ф. Засядько | l_1 | Ж | 0,9-1,0 | 6,5 | 27,6 |
| 5 | Им. А.А. Скочинского | h^1_6 | К | 0,95 | 5,22 | 19,4 |
| 6 | «Северная» | l_3 | ОС | 0,72 | 6,5 | 16,1 |
| 7 | Им. К.А. Румянцева | m_3 | Т | 0,97 | 10,3 | 10,2 |
| 8 | «Комсомолец Донбасса» | g_2 | А | 2,5 | 9,0 | 5,5 |

Методика определения объема выхода газообразных продуктов термического разложения углей

Условия проведения эксперимента:

- скорость нагревания, °С/мин 8
- конечные температуры, °С 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000
- продолжительность выдержки при конечной температуре, мин 30

Реактор представлял собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 8 мм и длиной 180 мм. Трубку с обоих концов уплотняли пробками из прокаленного асбеста. В среднюю часть трубки помещали навеску угля – около 2 г. Трубку с навеской угля нагревали в муфельной печи СНОЛ с регулируемой температурой нагревания. Асбестовые пробки пропускали выделяющийся газ, задерживали смолу и препятствовали контакту воздуха с углем. Выход газа определяли по потере массы. Полученные значения выхода газообразных продуктов $V_{г.п}$ корректировали по массовой доле золы A^d и влаги W^c :

$$V_{г.п} = V \frac{10000}{(100 - A^d)(100 - W^c)}$$

В табл. 2 представлены значения $V_{г.п}$, %, и $V_{г.п}$, см³/г, в газах разного состава.

Таблица 2

Выход газообразных продуктов из углей разных марок*

| $t, ^\circ\text{C}$ | Д | Г | Ж | К | ОС | Т | А |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|
| 200 | ~3/39 | ~3/42 | ~3/38 | ~1,5/37 | ~2/30 | ~2/36 | ~3/45 |
| 300 | 3,6/75 | 2,6/71 | 2,0/51 | 2,0/55 | 2,7/55 | 2,5/55 | 3,3/50 |
| 400 | 10,1/125 | 8,2/98 | 7,5/87 | 7,2/78 | 4,3/57 | 3,5/40 | 3,4/51 |
| 500 | 12,7/138 | 11,0/115 | 8,9/98 | 8,5/96 | 5,5/61 | 3,8/42 | 3,4/52 |
| 600 | 16,2/175 | 13,8/144 | 10,5/119 | 9,8/108 | 6,3/75 | 4,0/43 | 3,5/55 |
| 700 | 20,0/211 | 16,8/175 | 12,6/131 | 11,5/117 | 7,2/88 | 4,2/47 | 3,6/56 |
| 800 | 21,2/310 | 18,9/251 | 13,8/200 | 12,8/195 | 7,5/110 | 4,9/70 | 3,6/57 |
| 900 | 22,8/570 | 20,0/390 | 15,9/310 | 14,0/285 | 8,4/170 | 5,6/100 | 3,7/58 |
| 1000 | 25,0/625 | 21,1/525 | 18,6/450 | 15,3/385 | 9,1/225 | 6,0/150 | 3,8/60 |

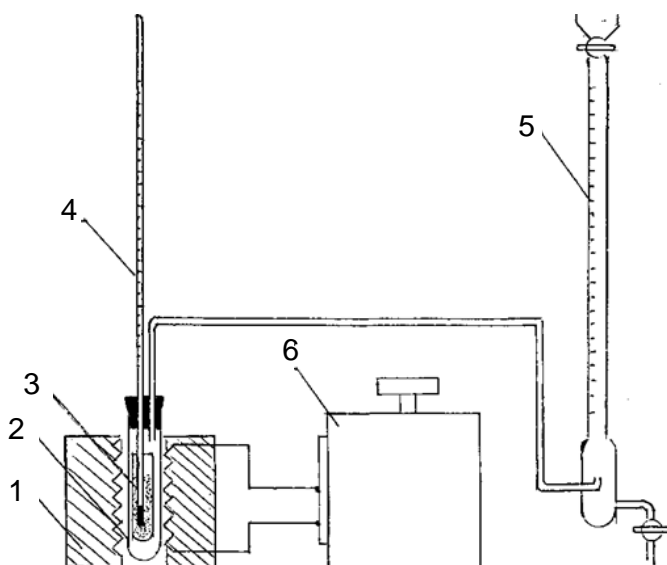
*Выход газа – в числителе, %; в знаменателе, $\text{cm}^3/\text{г}$

Во всех случаях наблюдается закономерное снижение выхода газов при переходе от угля марки Д к А.

Методика определения скорости выделения газообразных продуктов термического разложения углей (см. рисунок)

Условия проведения эксперимента:

- скорость нагревания, $^\circ\text{C}/\text{мин}$ 3
- конечные температуры выдержки, $^\circ\text{C}$ 100; 200; 300; 400; 500;
600; 700; 800; 900; 1000
- продолжительность выдержки, мин 30



Установка для исследования скорости выделения газов углями:

- 1 – электропечь; 2 – термостатирующая рубашка; 3 – контейнер (пробирка) с навеской угля;
4 – термометр; 5 – газометр; 6 – ЛАТР

Уголь загружают в кварцевую пробирку, помещенную в другую термостатирующую кварцевую пробирку. В уголь вводят термометр при 500 °С или термопару при нагревании более 500 °С. Заданный режим нагревания поддерживали печью, соединенной с ЛАТРом. Объем выделяющегося газа измеряли газометром. Параллельно ставят холостой опыт с загрузкой такого же объема песка (вместо угля) для исключения ошибки за счет расширения воздуха при нагревании.

Скорость W газовой выделения определяли по формуле

$$W = \frac{V}{\tau a} \frac{10000}{(100 - A^d)(100 - W^c)},$$

где a – навеска угля, г;

A^d – зольность угля, %;

W^c – влажность угля, %;

τ – время, мин (интервал нагревания);

V – объем выделившегося газа, см³.

Установлено, что при 200 °С максимальная скорость газовой выделения отмечена у антрацита; при 250 и 300 °С – у угля марки К; при 350 °С – у угля марки Г. Это свидетельствует о локализации метана (основного компонента газовой выделения при температуре до 350 °С) в разных типах пор.

Методика определения состава газов

Для идентификации веществ, содержащихся в пробе продуктов термической деструкции угля, был использован хроматографический метод со стандартными веществами. Время удерживания последних получено при 20 °С на хроматографической колонке длиной 1000 мм и внутренним диаметром 4 мм, с пористым стеклом со средним диаметром пор около 10 Å⁰, скорость газ-носителя аргона (0,5±0,05) мл/с.

Сопоставляя результаты, полученные для стандартных веществ и исследуемых проб угля, следует предположить, что в продуктах термической деструкции углей присутствует водород, оксид углерода и метан. Это подтверждается данными, полученными на хроматографической колонке (1000×4 мм), заполненной цеолитом NaX при температуре 20 °С (табл. 3). Газ-носитель аргон, скорость которого (1±0,05) мл/с.

Для более тяжелых углеводородных газов, чем метан, идентификацию времени удерживания определяли на хроматографических колонках, заполненных активированным углем СКТ, «Сепароном» или силикагелем КСК.

Условия анализа: температура термостата колонок (228±0,5) °С; хроматографическая колонка длиной 2000 мм и внутренним диаметром 4 мм; скорость газ-носителя азота (1±0,05) мл/с.

Таблица 3

Результаты исследования скорости газовой выделении из углей разных марок при нагревании

| Скорость газовой выделении углями разных марок, см ³ /(г·мин) | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Температура, °С | Д | Г | Ж | К | ОС | Т | А |
| 50 | – | – | – | – | 0,016 | 0,020 | 0,024 |
| 100 | 0,0125 | 0,0225 | 0,2750 | 0,0300 | 0,032 | 0,041 | 0,043 |
| 150 | 0,0275 | 0,0550 | 0,0550 | 0,0650 | 0,017 | 0,081 | 0,099 |
| 200 | 0,0350 | 0,0625 | 0,0825 | 0,1250 | 0,101 | 0,121 | 0,152 |
| 250 | 0,1100 | 0,1700 | 0,2750 | 0,3800 | 0,188 | 0,179 | 0,185 |
| 300 | 0,1250 | 0,2200 | 0,2780 | 0,3500 | 0,280 | 0,252 | 0,268 |
| 350 | 0,7400 | 0,8800 | 0,3400 | 0,4400 | 0,460 | 0,350 | 0,420 |
| 400 | – | – | 0,6000 | 0,9200 | 0,660 | 0,460 | 0,588 |

Условия анализа: температура термостата колонок (80±0,5) °С; хроматографическая колонка длиной 1000 мм и внутренним диаметром 3 мм; скорость газа-носителя азота (0,7±0,05) мл/с.

В целом, анализ составов газов, идентифицированных при нагревании и рассчитанных по данным хроматографии, показывает:

- основным продуктом начальной стадии термодеструкции углей является CO₂ как следствие декарбонизации и распада других кислородсодержащих функциональных групп; однако с повышением температуры выход CO₂ резко падает и при температуре 500 °С его объем снижается в 4-5 раз, для антрацита – в 2,5 раза;

- при температуре 500 °С основными продуктами термодеструкции являются H₂ и CH₄;

- объемная доля H₂ в зависимости от температуры постоянно возрастает, достигая 57 % для угля марки Д и 71 % для марки А;

- объемная доля метана изменяется по кривой с максимумом в районе 500 °С для углей марки Д, Г и 600 °С – для углей марки К, ОС, Т, А, достигая при этом 40...45 %, а для углей марки К 50 %.

Среди остальных газов наибольшее значение имеет CO₂, объемная доля которого при 300 °С достигает 20...30 %.

Построение физико-химической модели опасного газообразования в горящих подготовительных выработках

Реальный процесс горения угля в шахтной выработке включает в себя одновременное протекание стадий:

- десорбции метана;

- выделения летучих веществ из угля;
- газификации обуглероженного остатка.

При этом выделяющиеся газы легко воспламеняются и опережают горение собственно углерода. Все это существенно осложняет анализ процессов горения угля. Тем не менее такой анализ становится возможным, если названные процессы разграничить во времени по пути движения фронта теплового потока в глубь угольного массива в изолированной выработке. Начальное значение теплового потока принимаем равным теплотворной способности 1 кг угля (0 низшая).

Анализ процесса горения ведем по следующей схеме:

| | | | | | | | | |
|-------|---|-------------------------------------|---|---------------------------------|---|--|---|--------------------------------------|
| Q_n | → | Стадия газификации 900...1200 °С | → | Стадия пиролиза 300...900 °С | → | Стадия десорбции метана 40...300 °С | → | Теплота, уходящая в окружающую среду |
|-------|---|-------------------------------------|---|---------------------------------|---|--|---|--------------------------------------|

Стадия газификации

Без специальной подачи водяного пара газификация обуглероженного остатка проходит по механизму воздушной газификации. Имеющееся в воздухе небольшое количество водяных паров реагирует преимущественно с газообразными углеводородами на подходе к поверхности угля, т.е. участвует лишь в побочных реакциях.

Согласно существующим представлениям при воздушной газификации на компенсацию теплотеря от эндотермического эффекта реакции $2C + O_2 = 2CO$ расходуется от 30 до 40 % теплотворной способности топлива. Принимаем теплотеря равными 40 %.

Для принятого теплового потока Q_n при газификации 1 кг угля с теплотворной способностью Q_h 40 % Q_n (или 0,4 кг угля) будет израсходовано на поддержание процесса газификации, а 0,6 кг будет конвертировано в газ. При этом через зону газификации в зону пиролиза пройдет тепловой поток в количестве 0,6 Q_n . Масса образующегося газа равна: $0,6 \cdot 28/12 = 1,4$ кг, или $S_r = 1,4 \cdot 22,4/28 = 1,12$ м³ (или 1120 дм³), где 28 – молярная масса CO, кг/моль; 12 – молярная масса углерода, кг/моль; 22,4 – объем 1 моля газа, м³/кг.

Следует отметить, что при избытке воздуха этот газ (CO) в последующем практически весь выгорает. Более того, само горение угля протекает через газификацию. Молекулы O₂, диффундируя к раскаленной поверхности углерода через продукты горения, встречают диффундирующие навстречу молекулы CO и окисляют их до CO₂. Другая часть O₂, достигая поверхности, образует новые порции CO. В расчете учитываем только газификацию, так как горение газа ведет к образованию дополнительного теплового потока. При недостатке кислорода часть продуктов газификации (CO) будет попадать в газовое пространство выработки. Хотя образующийся CO почти полностью

замкнут в цикле горения, его большой объем (1120 л на 1 кг угля) представляет большую угрозу образования не только санитарно-опасных, но и взрывоопасных концентраций при ограничении доступа воздуха к очагу горения. Поэтому объем образующегося СО введен в формулу расчета.

Так как в данном процессе принимает участие только углерод, дошедший до зоны газификации, степень метаморфизма угля влияния на выход газа не оказывает.

Стадия образования летучих продуктов термодеструкции (пиролиза) угля

После прохождения зоны газификации значение теплового потока равно $0,6 Q_H$. В зоне пиролиза уголь нагревается от 400 до 900 °С, т.е. на 500 °С. При этом уголь теряет от 10 (для марки Т) до 42 % (для марки Д) массы в соответствии с выходом летучих (V^{daf} , %) и до зоны с температурой 900 °С доходит $(1 - V^{daf}/100)$ часть исходного угля. Общая масса угля, прошедшего зону пиролиза, равна

$$m_n = \left(1 - \frac{V^{daf}}{100} \right) \frac{0,6 Q_H}{500 C_y \cdot 4,2 \cdot 10^3},$$

где m_n – масса угля, подвергшегося пиролизу, кг;

C_y – теплоемкость угля, Дж/(кг·°С).

Выход газа пиролиза равен

$$G_n = m_n \frac{V^{daf}}{100 \gamma} \left(1 - \frac{18}{100} \right),$$

где G_n – объем газа пиролиза, м³;

V^{daf} – выход летучих, %;

18 – конденсирующая часть газа пиролиза (коксования) и инертные примеси (усредненные данные), %;

γ – плотность газа ($\gamma \sim 0,5$), кг/м³.

Потери теплоты за счет испарения (выделения) летучих составляют около 0,15 от доли теплового потока, приходящегося на V^{daf} . Таким образом, тепловой поток, переходящий в стадию десорбции $Q_{дес}$, Дж, равен

$$Q_{дес} = (Q_H \cdot 0,6 - V^{daf} \cdot 0,15) \cdot 4,2 \cdot 10^3.$$

Стадия десорбции метана

В соответствии с экспериментальными данными десорбция метана заканчивается при достижении углем температуры 400 °С. Выход метана из свежееотобранных образцов колеблется для углей Донбасса преимущественно в пределах 15...20 дм³/кг. От степени метаморфизма выход зависит мало. Принимаем объемный расход выделяющегося метана 20 дм³/кг.

Масса угля $m_{т.д}$, кг, нагреваемого от 40 до 400 °С, равна

$$m_{т.д} = \frac{Q_H \cdot 0,6 - V^{daf} / 100 \cdot 0,15}{(400 - 40)C_y \cdot 4,2 \cdot 10^3},$$

где C_y – теплоемкость угля, Дж/кг.

Газовыделение за счет десорбции метана равно

$$G_{т.д} = m_{т.д} \cdot 20/1000,$$

где 1/1000 – множитель для перевода кубических дециметров в кубические метры.

Суммарный выход горючего газа C_c , выделяемого из угля действием теплового потока от сгорания 1 кг угля, равен

$$G_c = G_r + G_n + G_{т.д}.$$

Пример. В выработке по пласту угля марки К ($V^{daf} = 22\%$) образуется:

$G_r = 1,12$ м³ СО (максимально возможный объем);

$G_n = (1 - 22/100) (0,6 \cdot 6000/500 \cdot 0,4) \cdot 22/100 (1 - 18/100) 1/0,5 = 5,06$ м³;

$G_{т.д} = (0,6 \cdot 6000 - 22 \cdot 0,15/100) \cdot 20/(400 - 40) \cdot 0,4 = 483$ дм³ или 0,48 м³.

Суммарный объем газа равен: $C_c = 1,12 + 5,06 + 0,48 = 6,66$ м³.

Кинетика формирования уровня и стационарной концентрации газа в подготовительной выработке при установившемся процессе горения угольного массива при $I(t) = I_{const}$, где $I(t)$ – плотность потока горючего газа в подготовительной выработке ($I(t) = W/G$), в расчете на 1 кг угля определяется из решения уравнения [1, 2], имеющего вид

$$c(t) = \frac{I(t)}{I(t) + q} \left[1 - e^{-(I(t)+q)t} \right],$$

где q – скорость поступления воздуха определяется мощностью вентиляции $Q(t)$ и объемом выработки. Этот объем равен $S \times L$, где S – площадь сечения выработки, м²; L – длина выработки, м. Следовательно,

$$q(t) = \frac{Q(t)}{SL}.$$

Основной объем метана идет из двух источников – выход метана пиролиза $I_n(t)$ и десорбций $I_g(t)$, так что

$$I(t) = I_n(t) + I_g(t).$$

Из этого уравнения получаем время достижения опасной концентрации:

$$t_{\text{кр}} = -\frac{1}{I(t) + q} \ln \left[1 - \frac{c_{\text{кр}}(1 + q)}{I(t)} \right].$$

Максимальная концентрация газов, включающих CO, H₂, CH₄, которая может достигаться в выработке, равна

$$c_{i \text{ max}} = \frac{Ii(t)}{Ii(t) + q}.$$

При этом оценка времени достижения критической концентрации определяется следующим образом:

$$t_{i \text{ кр}} = \frac{c_{i \text{ кр}}}{I_{i \text{ кр}}}.$$

В случае отсутствия проветривания ($Q = 0$) рассчитывать время образования опасных значений концентрации метана согласно [3, 4] необходимо по формуле

$$t_{i \text{ кр}} = \frac{0,156C^2 \left[mB\gamma + S_n \right]}{Q^2 \nu D_0 e^{-\frac{E}{RT}}},$$

где m – мощность пласта, м;

B – ширина выработки, м;

γ – эффективная пористость угля;

S – площадь породной части подготовительной выработки, м²;

- C – объемная доля метана в подготовительной выработке с учетом объема водорода и высших углеводов, %;
- Q – газоносность угля; $Q_{\text{ост}} = (0,1 - 0,15)Q$ – для пластовых подготовительных выработок;
- ν – коэффициент растворимости метана в угле; $\nu = 0,01$ при $T=573$ К;
- D_0 – коэффициент диффузии метана при отсутствии высокой температуры, $\text{м}^2/\text{с}$;
- E – энергия активации диффузии метана из угля; $E = 50 \dots 60$ кДж/моль;
- R – универсальная газовая постоянная;
- T – температура угольного массива; $T = 873$ К.

Приведенная методология оценки $C_{\text{кр}}$ и $t_{\text{кр}}$ применима на стадии прогноза развития экзогенных пожаров в подготовительных выработках. Фактически оценивать $t_{\text{кр}}$, независимо от уровня проветривания, необходимо по формуле

$$\tau = \frac{C_{\text{о.к}} V^{\text{выр}} \tau_u n}{G_c 100 V_{\text{CO}_2}}$$

- где $C_{\text{о.к}}$ – взрывоопасная объемная доля газа (расчетная), %;
- $V^{\text{выр}}$ – объем выработки, м^3 ;
- n – кратность воздухообмена в период измерения τ_u увеличения концентрации CO_2 в выходящем воздухе (из горящей выработки);
- G_c – суммарный объем горючего газа, м^3 ;
- τ_u – отрезок времени между двумя изменениями концентрации CO_2 ;
- ΔV_{CO_2} – количество CO_2 , образовавшегося во время измерения τ_u , м^3 .

Выводы

Установлены закономерности, характеризующие степень влияния температуры на стадии десорбции метана из угля, образования летучих и его газификацию. Впервые оценку кинетики и уровня концентрации метана в зависимости от температуры угольного массива предложено определять по ряду критериев, основанных на учете интенсивностей потока метана и проветривания, эффективной диффузии как функции энергии активации выхода метана от температуры и по изменению концентрации горючих газов в выработке в зависимости от их объема на разных стадиях горения угля.

Список литературы /References

1. Алексеев А.Д., Фельдман Э.П., Стариков Г.П. Прогноз времени образования опасных концентраций метана в очистных забоях // Уголь Украины. – 2010. – № 7. – С. 29 – 32.

Alekseyev, A.D., Fel'dman, E.P., Starikov, G.P. *Prognoz vremeni obrazovaniya opasnykh kontsentratsiy metana v ochistnykh zaboyakh* [Forecast of the time of formation of hazardous methane concentrations in breakage faces]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2010, no. 7, pp. 29 – 32.

2. Стариков Г.П., Василенко Т.А., Слюсарев В.В. Роль параметров газовой выделения в процессе образования опасных концентраций метана в горных выработках // Известия Донецкого горного института. – 2003. – № 2. – С. 41 – 43.

Starikov, G.P., Vasilenko, T.A., Slyusarev, V.V. *Rol' parametrov gazovydeleniya v protsesse obrazovaniya opasnykh kontsentratsiy metana v gornyykh vyrabotkakh* [The role of gas emission parameters in the process of formation of the hazardous methane concentrations in mine workings]. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta* [Proceedings of the Donetsk Institute of Mines], 2003, no. 2, pp. 41 – 43.

3. Алексеев А.Д., Фельдман Э.П., Стариков Г.П. Кинетика заполнения метаном воздушного пространства, граничащего с пористым твердым телом // Украинский физический журнал. – 2004. – № 1. – С. 32 – 36.

Alekseyev, A.D., Fel'dman, E.P., Starikov, G.P. *Kinetika zapolneniya metanom vozdušnogo prostranstva, granichashchego s poristym tvyerdym telom* [Kinetics of filling the air space adjacent to the porous solid with methane]. *Ukrainskiy fizicheskiy zhurnal – The Ukrainian Physical Journal*, 2004, no. 1, pp. 32 – 36.

4. Стариков Г.П., Шевченко Л.В., Жеребчевский Д.Э. Исследование влияния высоких температур на кинетику газовой выделения // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / ИФГП НАНУ. – Донецк, 2004. – Вып. 7. – С. 135 – 140.

Starikov, G.P., Shevchenko, L.V., Zherebchevskiy D.E. *Issledovaniye vliyaniya vysokikh temperatur na kinetiku gazovydeleniya* [Investigation of the influence of high temperatures on the kinetics of gas emission]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva* [Physical and technical problems of the mining practice]. IFGP NANU, Donetsk, 2004, issue 7, pp. 135 – 140.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 23.03.2016

Gennadiy Petrovich Starikov, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: ifgpdnr@mail.ru;

The Governmental Institution “Institute of Physics of Mining Processes”;
283114, Donetsk, 72, ulitsa Rosy Luxemburg. Phone (+38 062) 311-52-85;

Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary; e-mail: ir-starik@yandex.ru;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-69-51;

Yaroslav Vital'yevich Shazhko, Cand. Sci. (Tech.), deputy director; e-mail: syarilo@mail.ru;

Nadezhda Vladimirovna Khashchevatskaya, postgraduate student; e-mail: inbox93@gmail.com;

The Governmental Institution “Institute of Physics of Mining Processes”;
283114, Donetsk, 72, ulitsa Rosy Luxemburg. Phone (+38 062) 311-52-85;

MAKING THE PHYSICOCHEMICAL MODEL OF THE HAZARDOUS GAS FORMATION BY IGNITION OF COAL IN THE BEDDED PREPARATION MINE WORKINGS

Purpose. Working-out the criteria of estimation of the level and time of formation of the hazardous concentrations of methane and other hydrocarbons by the fires in the bedded mine workings.

Methods. Experimental investigations of the velocity and volume emission of the gaseous products of the thermal breakdown of coals and theoretical estimation of the kinetics of formation of the stationary concentrations of the hydrocarbons by movement of the front of the heat flow into the depth of the coal massif.

Results. The conformities characterizing the degree of influence of the temperature at the stage of desorption of methane from coal, formation of the volatile matters and its gasification are established. It is proposed for the first time to estimate the kinetics and level of the methane concentration depending on the temperature of the coal massif taking into account a number of criteria based on registration of intensities of the methane flow and ventilation, of the effective diffusion as a function of the activation energy of the methane emission from the temperature and the change of the concentration of fire gases in the mine working depending on their volume at various stages of the combustion of coal.

Practical value. The methods of determination of the concentration and the time of formation of the hazardous concentrations of methane and other hydrocarbons at the stage of the forecast of development of the spontaneous fire and for the actual estimation without the dependence on the degree of ventilation of the mine working are proposed.

Keywords: *combustion velocity; kinetics of gas emission; intensity of the flow; stages of the combustion processes.*

УДК 622.51:628.33

*Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: kafedraekologii@yandex.ru;
Автомобильно-дорожный институт Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет»;
284646, Горловка, ул. Кирова, 51. Тел. (+38) 050-649-84-36;*
*Сергей Евгеньевич Гулько, канд. техн. наук, директор; e-mail: dgsh@dgsh.donetsk.ua;
Донецкий государственный институт по проектированию шахт «Донгипрошахт»;
283001, Донецк, ул. Артема, 125. Тел. (+38 062) 305-36-11*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ

Цель. Выбор технических решений проблемы очистки шахтных вод.

Методика. Теоретические и экспериментальные исследования. Рассмотрено последовательное совершенствование технологических решений по очистке природных и оборотных вод от взвешенных частиц. Для повышения производительности оборудования обосновано использование присадок в обрабатываемую воду мелкокристаллических веществ с повышенной плотностью. Рассмотрены факторы, влияющие на скорость коагуляции взвешенных частиц.

Результаты. Обеспечение эффективной очистки больших объемов воды от взвешенных частиц.

Научная новизна. Созданы основы технологии очистки шахтных вод аппаратами с рециркуляцией высокодисперсного песка.

Практическая значимость. Повышение экономических показателей угольной промышленности за счет использования отходов очистки шахтных вод. Снижение расходов на хранение и транспортирование кека, а также повышение его стоимости и обеспечение возможности реализации.

Ключевые слова: *очистка; шахтные воды; теория; эксперименты; мелкокристаллические вещества; коагуляция частиц.*

Состояние проблемы. В мировой практике происходит быстрое увеличение водопотребления. Это обусловлено не только увеличением народонаселения, но и урбанизацией, индустриализацией и развитием сельскохозяйственного производства. В структуре водоотведения 35 % приходится на все отрасли производства, кроме теплоэнергетики, 33 % на теплоэнергетику, 18 % – сбросы сточных вод с мелиорированных земель и 14 % – сбросы сточных вод от коммунально-бытового хозяйства городов и сельских населенных пунктов.

Для производственных целей во многих отраслях промышленности могут быть использованы шахтные воды. Последние в значительной степени загрязнены взвешенными веществами, представляющими собой дисперсные частицы угля и породы. Учитывая то, что уголь по своей природе менее твердый по сравнению с пустой породой, в откачиваемой шахтной воде доля частиц угля больше, чем частиц породы – происходит своеобразная первая ступень обогащения угля. Возникает необходимость удалить эти частицы угля из шахтной воды. При этом сконцентрированные на очистных сооружениях взвешенные частицы являются качественным топливом, которое может быть использовано на промышленных установках и в бытовых твердотопливных котлах.

Физико-химические свойства пустой породы и угля существенно отличаются [1]. Таким образом, после их разделения создается возможность использования указанных отходов. Это позволяет улучшить экономические показатели угольной промышленности.

Так как объемы откачиваемых шахтных вод весьма значительны, возникает необходимость выбора высокопроизводительного оборудования для очистки шахтных вод от взвешенных частиц.

Цель исследований состоит в выборе более эффективных технических решений по очистке воды от взвешенных частиц. Показано, что при исследовании работы традиционных осветлителей, применяемых на водоподготовительных установках с использованием трассеров, последние появляются в выходной зоне осветлителя уже через несколько минут, что приводит к загрязнению осветленной воды непрореагировавшими реагентами.

Изложение материала исследований. В процессе очистки воды от соединений коллоидной степени дисперсности и от взвешенных частиц в последние годы используют в основном осветлители и тонкослойные отстойники. В осветлителях (рис. 1), разработанных проф. Е.Ф. Кургаевым и в последующем усовершенствованных В.М. Квятковским и А.И. Баулиной (Всероссийский теплотехнический институт), удалось повысить подъемные скорости потока по сравнению с отстойниками. Это достигнуто за счет применения поперечного отвода шлама через шламоприемные окна [2] по сравнению с движением (оседанием) шлама, противоположным направлению осветляемой воды в отстойниках. Кроме этого, решена задача концентрирования шлама в шламоуплотнителях, что позволило уменьшить продувку аппаратов и, соответственно, уменьшить непроизводительные потери воды. В конструкциях аппаратов, применяемых в странах СНГ, не используют механические мешалки для улучшения контакта обрабатываемой воды с реагентами. Для перемешивания применяют тангенциальный подвод потоков обрабатываемой воды и радиальный подвод реагентов. Следует отметить, что исследование работы таких аппаратов путем ввода трассера (раствора поваренной соли) в воздухоотделитель показало, что трассер появляется в выходной зоне осветлителя уже через 5 мин. Таким образом, в процессе очистки воды часть реагентов, не прореагировав, проскакивает в выходную зону осветлителя. Это объясняет причину повышенной концентрации соединений железа (160...300 мкг/кг) на выходе осветлителя при очистке воды в режиме известкования и коагуляции серно-кислым железом.

Аналогичное явление имеет место при коагуляции воды серно-кислым алюминием. Следует отметить, что в этом случае при использовании, например, осветленной воды для питьевых целей (применение указанных осветлителей в небольших населенных пунктах) существует большая опасность загрязнения осветленной воды соединениями алюминия, которые, как известно, являются одной из причин болезни Альцгеймера.

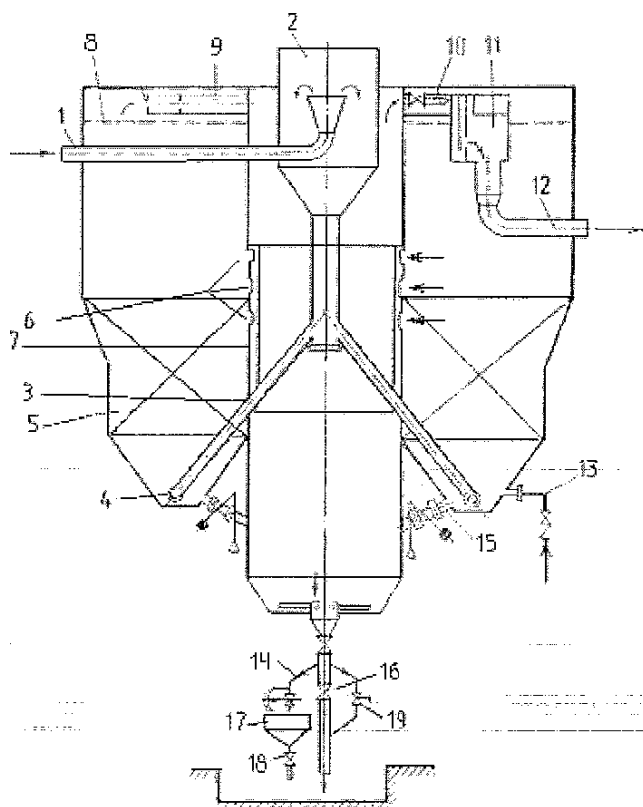


Рис. 1. Схема осветлителя, который применяют при подготовке воды в странах СНГ:

1 – трубопровод подачи исходной воды; 2 – воздухоотделитель; 3 – распределительные трубы подвода воды в зону реакции; 4 – реакционная труба; 5 – зона перегородок для гашения вращательного движения воды и улучшения контакта воды со шламом; 6 –шламоприемные окна; 7 – шламоуплотнитель; 8 – верхняя распределительная решетка; 9 – сборный кольцевой желоб; 10 – отвод осветленной воды из шламоуплотнителя (отсечка); 11 – приемный короб; 12 – трубопровод отвода осветленной воды; 13 – трубопровод ввода обработанной воды; 14 – трубопровод непрерывной продувки; 15 – трубопровод периодического отвода песка; 16 – арматура для опорожнения осветлителя; 17 – тарировочная емкость; 18 – трубопровод опорожнения тарировочной емкости; 19 – трубопровод периодической продувки

На зарубежных установках используют отстойники с устройствами для механического перемешивания обрабатываемой воды и реагентов [3]. На этих установках «проскок» реагентов в осветленную воду в несколько раз меньше. Одна из типовых конструкций такого отстойника показана на рис. 2.

В отечественной и мировой практике с 70-х годов прошлого века стали применять тонкослойные отстойники, пространство которых для осветления воды разделено на ряд каналов. Последние образованы пластинами, расположенными под углом $\alpha = 35...60^\circ$, что обеспечивает соскальзывание осадка под действием силы тяжести. Пластины (ламели) расположены на расстоянии 50...100 мм друг от друга. В тонкослойных отстойниках время перемещения (оседания) частицы с «потолка» канала на его «пол» значительно сокращается по сравнению с аппаратами традиционной конструкции и равно

$$t = h / u_0 \cos \alpha k_c, \quad (1)$$

где h – расстояние между пластинами, мм;

u_0 – скорость осаждения частицы в неподвижной воде (гидравлическая крупность), мм/с;

$k_c = 0,7 \dots 0,8$ – коэффициент стеснения потока сползающим осадком.

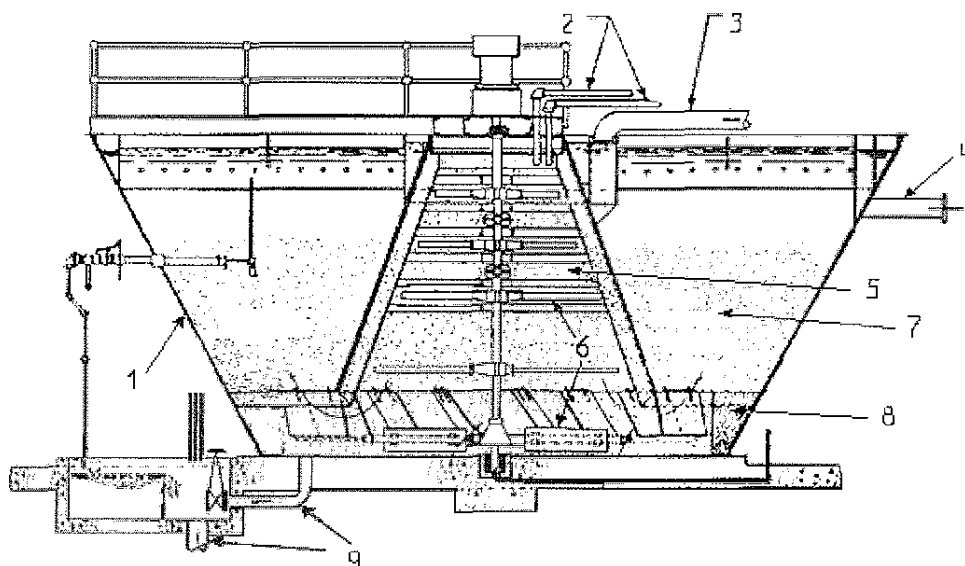


Рис. 2. Схема отстойника со шламовым фильтром, который применяют в США:

1 – корпус отстойника; 2 – трубопроводы подвода химических реагентов; 3 – трубопровод обрабатываемой воды; 4 – трубопровод выхода осветленной воды; 5 – зона смешения воды с реагентами; 6 – мешалка; 7 – зона шламowego фильтра; 8 – концентратор шлама; 9 – дренажный трубопровод

Из указанного уравнения видно, что скорость осветления увеличивается во много раз. Применение ламинарного течения потока обрабатываемой воды в режиме, близком к идеальному вытеснению, обеспечивает устойчивую работу отстойников в режимах колебаний нагрузки и температуры обрабатываемой воды. В то же время такие возмущения при эксплуатации осветлителей приводят к длительным ухудшениям качества осветленной воды. Для обеспечения эффективной работы тонкослойных отстойников следует учитывать необходимость предварительного перемешивания раствора реагента и обрабатываемой воды. Известно, что при градиентной коагуляции скорость изменения количества частиц n

$$-\frac{dn}{d\tau} = k_p r^3 G \omega^3 n^2, \quad (2)$$

где k_p – коэффициент, зависящий от режима движения воды; $k_p = 1,33$ для ламинарного движения; $k_p = 12$ для турбулентного;

G – средний градиент скорости перемешивания воды, с^{-1} ;
 $\omega = \frac{r+a}{r}$ – отношения радиуса действия межмолекулярных сил к радиусу частиц r . Считается, что $(r+a) \leq 2,4 \text{ нм}$.

Общепринято скорость коагуляции выражать

$$-\frac{dn}{dt} = \left(\frac{2 RT\rho}{3 \eta r} \right)^k n^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность частиц, кг/м^3 ;

η – динамическая вязкость воды, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$;

n – количество частиц в начальный момент коагуляции;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура, К .

В процессах осветления воды скоростной градиент поддерживают в пределах $300 \dots 350 \text{ с}^{-1}$, при этом время перемешивания равно $60 \dots 120 \text{ с}$. Увеличение градиента до $500 \dots 1000 \text{ с}^{-1}$ позволяет сократить время перемешивания до $10 \dots 30 \text{ с}$.

Из уравнений (2), (3) следует, что для интенсификации процесса коагуляции при перемешивании его следует осуществлять в турбулентном режиме и увеличивать концентрацию частиц в воде и их плотность.

Дальнейшим совершенствованием технологии обработки воды явилось создание Actiflo, в котором реализованы указанные выше положения [4]. Схема процесса Actiflo показана на рис. 3.

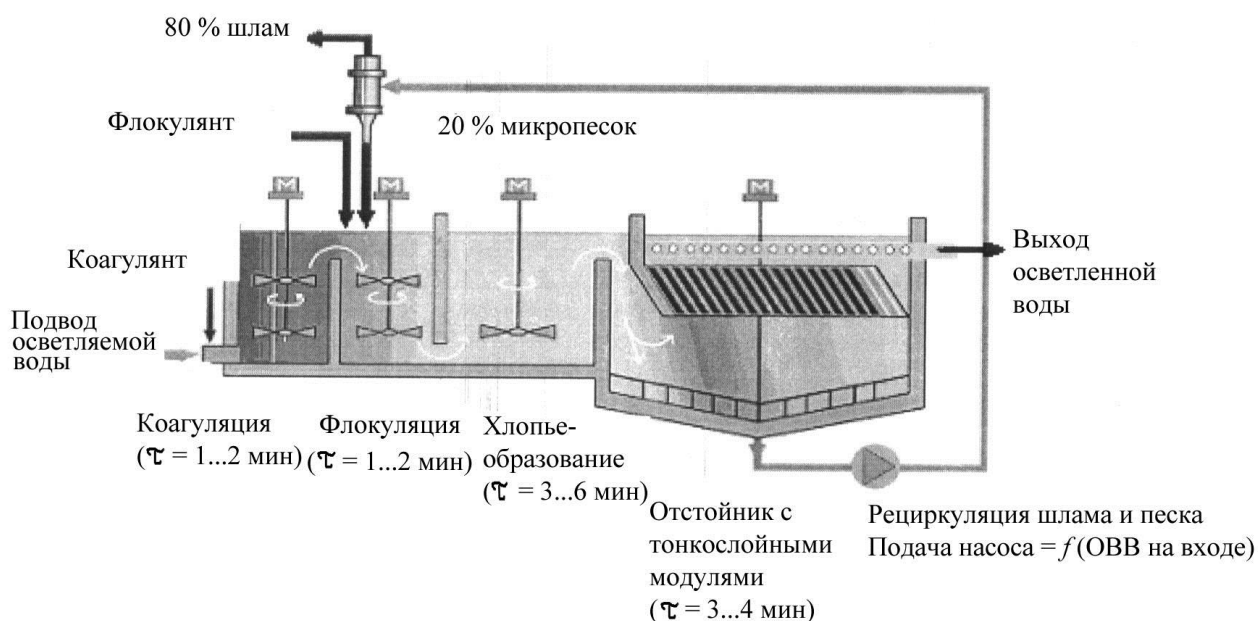


Рис. 3. Схема технологии обработки воды с рециркуляцией шлама и песка

Для ускорения процесса коагуляции используют присадку высокодисперсионного песка. Последний постоянно рециркулирует в зону смешения с обрабатываемой водой и реагентами благодаря использованию гидроциклона (рис. 4).



Рис. 4. Циклон для сепарации песка

Сравнительные характеристики процессов коагуляции воды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры процесса очистки воды

| Характеристика | Вода | Сточные воды | Традиционные методы |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | ~ 100 мкм | ~ 150 мкм | - |
| Длительность коагуляции | 8...10 мин | 3...5 мин | 20...40 мин |
| Длительность процесса | 10...12 мин | 5...6 мин | 1...4 ч |
| Нагрузка | 50...100 м ³ /ч | 100...200 м ³ /ч | 1...10 м ³ /ч |
| Номинальная производительность линии | 40...10.000 м ³ /ч | 40...20.000 м ³ /ч | - |

Применение указанной технологии позволило значительно повысить удельную производительность оборудования. Так, в мировой практике существует несколько установок, производительность которых превышает 340000 м³/ч (Франция, Китай, Канада и др.).

Описанная технология позволяет применять ее для очистки больших объемов обрабатываемой воды: очистки шахтных вод, в оборотных циклах энергетических и химических предприятий, в больших плавательных бассейнах и пр. (табл. 2).

Таблица 2

Показатели качества исходной и очищенной воды при использовании процесса Actiflo

| Показатель | Исходная вода | Очищенная вода (выходные значения или степень очистки) |
|--|---------------------|--|
| Взвешенные вещества, мг/дм ³ | 0...3000 | 0,5...5,0 |
| Цветность, град. Pt/Co | 0...350 | 0...10 |
| Общий органический углерод, мг/дм ³ | 1...30 | 30...60 % |
| Водоросли, клетки/мл | 0...100000 | 90...99 % |
| Хлорофилл А, клетки/мл | 0...100 | 90...99 % |
| Марганец, мг/дм ³ | 0...2,5 | 60...95 % |
| Мышьяк, мг/дм ³ | 0...2,0 | 50...90 % |
| Железо, мг/дм ³ | 0...5,0 | 60...98 % |
| Количество частиц 2...15 мкм | < 2·10 ⁶ | 1,5...3,0 log |
| Фекальные соли формы, клетки/мг | 0...10 ⁴ | 1,0...1,5 log |
| Бактерии, клетки/мл при 20° С | < 20000 | 1,0...1,5 log |

Возможность использования полученных в осадителях отходов реализуется за счет применения их механического обезвоживания на вакуум-фильтрах или фильтр-прессах. При фильтрации суспензий в обоих типах аппаратов процесс осуществляется в несколько стадий: первое продувание, отжим, второе продувание и фильтрация.

При использовании вакуум-фильтрации производительность аппаратов, отнесенная к 1 м² фильтрующей поверхности, выше, чем при фильтр-прессовании, а влажность полученного кека после фильтр-прессования ниже, чем после вакуум-фильтрации.

Предполагаемая стоимость обезвоживания продуктов осветления шахтных вод, отнесенная к 1 м² фильтрующей поверхности, у фильтр-прессов ФМАКИ в 1,5–2 раза выше, чем у барабанных вакуум-фильтров. Однако с учетом утилизации кека для установок сжигания предпочтение следует отдать

вакуум-фильтрам, так как последние обеспечивают получение продукта с меньшей влажностью при меньших транспортных расходах.

Выводы

1. Рассмотрена эволюция технологии очистки воды от взвешенных веществ с использованием осветлителей, тонкослойных отстойников и аппаратов с рециркуляцией высокодисперсного песка (процесс Actiflo).

2. Применение Actiflo позволило обеспечить эффективную очистку больших объемов воды от взвешенных частиц.

3. Процессы коагуляции воды целесообразно составлять из собственно коагуляции, флокуляции и осветления. При этом первые зоны работают в режиме идеального смешивания, а последняя – в режиме идеального вытеснения.

4. Обоснована целесообразность обезвоживания осадков процесса осветления шахтной воды с последующей реализацией полученного кека.

Список литературы

1. Уханева М.И., Хоботова Э.Б. Химическая оценка отходов угледобычи // Вісник Харківського національного університету. Хімія. – 2010. – № 895. – Вип. 18(41). – С. 260 – 268.

Ukhanyeva, M.I., Khabotova, E.B. *Khimicheskaya otsenka otkhodov ugledobychi* [The chemical estimation of coal production tailing]. *Visnyk Kharkivs'kogo natsional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kharkiv national university], 2010, no. 895. Chemistry, issue 18(41), pp. 260 – 268.

2. Обработка воды на тепловых электростанциях / А.И. Баулина, С.М. Гурвич, В.М. Квятковский и др. / под ред. В.А. Голубцева. – М.: Энергия, 1966. – 448 с.

Golubtsev, V.A., ed., Baulina, A.I., Gurvich, S.M., Kvyatkovskiy, V.M. etc. *Obrabotka vody na teplovykh elektrostantsiyakh* [Water treatment at thermal stations]. Moscow, Energiya Publ., 1966, 448 p.

3. Sheppard T. Powell. *Water conditioning for industry: 2-nd edition*, McGraw-Hill Book Company, inc. New York, Toronto, London, Tokyo. – 1980. – 587 p.

4. Amiad Filtration Systems. Cover story. Cooling towers: how to keep particulates at bay // *Filtration and separation*, 2006. – July / august, pp. 18 – 22.

*Sergey Pavlovich Vysotskiy, Dr. Sci. (Tech.), head of subdepartment; e-mail: kafedraekologii@yandex.ru;
Automobile Engineering College of the State Institution of Higher Education “The Donetsk National
Technical University”;*

284646, Gorlovka, ulitsa Kirova, 51. Phone (+38 050) 64 98 436;

Sergey Yevgen'yevich Gul'ko, Cand. Sci. (Tech.); e-mail: dgsh@dgsh.donetsk.ua;

The Donetsk State Institute on projecting the mines “Dongiproshakht”;

283001, Donetsk, ulitsa Artyema, 125. Phone (+38 062) 305 36 11

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF PURIFICATION OF MINE WATERS FROM SUSPENDED PARTICLES

Purpose. Choice of technical solutions of the problem of purification of the mine waters.

Methods. Theoretical and experimental investigations. The consecutive improvement of technological solutions on purification of natural and circulating water from suspended particles is considered. To higher productivity of the equipment the use of additives of the cryptocrystalline substances with increased density in the water being treated is justified. The factors having an influence on the coagulation velocity of the suspended particles are considered.

Results. Guaranteeing the effective purification of great volumes of water from the suspended particles.

Scientific novelty. The grounds of the technology of mine water purification with recirculation of the fine-grained sand are created.

Practical value. Rise of economic indicators of the coal industry at the expense of the use of waste products of the purification of the mine waters. Slowdown in expenditure to store and transport the sand as well its value enhancement and guaranteeing the possibility of realization.

Keywords: *purification; mine waters; theory; experiments; cryptocrystalline substances; coagulation of the particles.*

УДК [622.822.7:614.842.6]:001.891.573

Сергей Семенович Гребёнкин, д-р техн. наук, ведущий науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Андрей Юрьевич Коляда, нач. отдела; e-mail: kolyada1980@ukr.net;

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

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-44-92

ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Цель. Разработать обобщенную экономико-математическую модель для определения комплексного показателя эффективности пожаротушения.

Методы. Теоретические исследования эффективности создаваемых средств противопожарной защиты с применением законов теории вероятностей и математической статистики.

Результаты. Обоснован выбор параметров технических средств и способов пожаротушения в зависимости от характеристик пожара или взрыва.

Научная новизна. Получена возможность построения модели пожаротушения.

Ключевые слова: *технические средства пожаротушения; динамика изменения объекта; параметры пожара; огнетушащий эффект; минимальные затраты на разработку средств пожаротушения.*

Постановка проблемы. Решение проблемы обеспечения безопасности и эффективности тушения пожаров в угольных шахтах неразрывно связано с прогрессом в создании современных технических средств и способов пожаротушения. Важное значение в этой связи приобретают принципы подхода к созданию изделий противопожарного назначения, конструкция которых должна постоянно совершенствоваться по мере осложнения горно-технических и горно-геологических условий добычи угля. Разработчики изделий противопожарного назначения вынуждены одновременно решать две задачи – получить максимальный огнетушащий эффект и обеспечить минимальные затраты на создание новой техники. Для решения первой задачи необходимо знать причины возникновения и характер развития пожара, иметь достоверные данные об изменениях его параметров с тем, чтобы управлять ими с помощью технических средств и способов пожаротушения. Вторая, экономическая задача, заключается в нахождении оптимального решения из множества возможных вариантов. Эта задача усложняется необходимостью учета большого количества технико-экономических и социальных факторов, среди которых особое место занимает эффективность и безопасность применения изделий противопожарного назначения. Как правило, указанные факторы закладывают в техническую документацию и оценивают разработчики на этапе создания макетных и экспериментальных образцов. Испытания проводят

в лабораторных и полигонных условиях по стандартным методикам, после чего корректируют конструкторскую документацию с учетом выявленных технических недостатков. В соответствии с откорректированной конструкторской документацией заводы-изготовители выпускают опытную партию изделий, которые испытывают в шахтных условиях.

Анализ последних исследований. В исследованиях последнего времени наиболее полно применяли аппарат математического моделирования [1, 2]. Рассматривали данную проблему с позиций формирования и распространения воздушных ударных волн в горных выработках, а также исследовали теплофизические параметры на разных стадиях развития пожара. Кроме того, при построении математической модели необходимо учитывать технологические условия добычи угля [3]. В настоящей работе предположен комплексный подход решения проблемы обеспечения эффективности тушения пожаров в угольных шахтах с применением обобщенной экономико-математической модели.

Цель исследования. Основная цель исследования – разработка обобщенной экономико-математической модели для определения комплексного показателя эффективности пожаротушения.

Материалы и результаты исследования. Основным комплексным показателем степени соответствия изделия своему прямому назначению является его эффективность. Обычно при определении эффективности проектируемых средств противопожарной защиты используют различные аппроксимационные модели, основанные, как правило, на применении законов теории вероятности и математической статистики. Эти модели разрабатывают, предполагая, что процесс эксплуатации изделия определяется внешними причинами и зависит от внутреннего состояния системы. Очевидно, что современные средства тушения экзогенных пожаров представляют собой сложные инженерно-технические системы, состоящие из большого количества узлов и деталей, которые, в конечном счете, влияют на эффективность изделия в целом.

Комплексный показатель эффективности представляет собой количественное соотношение между приведенными затратами на разработку и изготовление изделия и возможным ущербом от пожара. Этот показатель выражается в виде функциональной зависимости [4]

$$\Phi = \Phi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k), \quad (1)$$

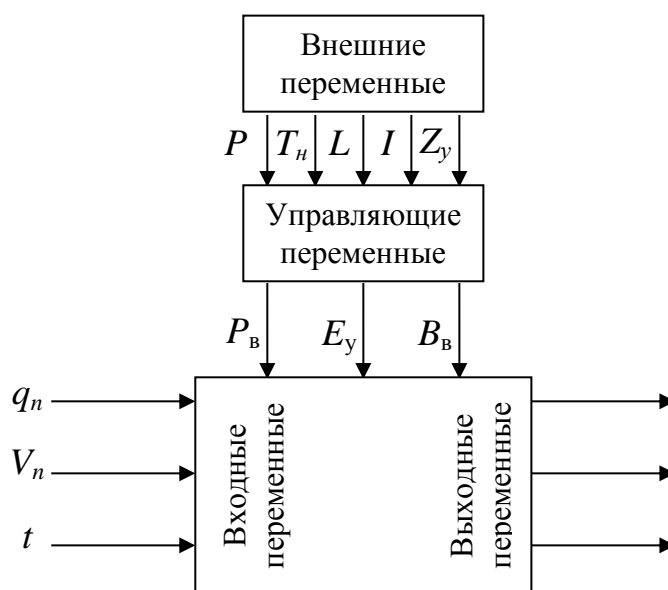
где α_i – параметры изделия;

β_j – параметры среды;

γ_k – приведенные затраты.

Показатель эффективности в данном случае выражается функционалом от процесса функционирования.

Обычно в практике разработки технических средств пожаротушения подразумевают огнетушащую эффективность изделий, которую определяют по соответствующим методикам. Говоря о безопасности тушения экзогенных пожаров в угольных шахтах, следует иметь в виду не абстрактную безопасность горнорабочих и горноспасателей, а безопасность, обеспеченную с помощью технических средств и способов, путем снижения воздействия негативных факторов пожара и взрыва до нормированных значений, не оказывающих вредного воздействия на организм человека (см. рисунок).



Блок-схема процесса

Все переменные величины классифицированы по общим признакам на входные, внешние, выходные и управляющие. Входные величины представляют собой параметры развитого подземного пожара (тепловая мощность пожара q_n , Дж/с; скорость распространения V_n , м/ч; температура пожарных газов t на заданном расстоянии от очага пожара, °С).

Выходные параметры пожара регламентируют Правила безопасности в угольных шахтах.

В качестве управляющих переменных принимаются параметры технических средств пожаротушения: вид огнетушащего вещества B_v ; расход огнетушащего вещества P_v , кг/с; огнетушащая эффективность конкретной установки при тушении модельного очага пожара E_y , м². Внешними переменными, обеспечивающими нормальную работу установок пожаротушения, будут: рабочее давление в баллонах P , МПа; время возможной непрерывной работы T_n , ч; возможная дальность подачи огнетушащего вещества или состава L , м; интенсивность подачи огнетушащего вещества конкретной установкой Z_y , кг/(с·м²). Для нормального функционирования системы управления, представленной на рисунке, необходимо знать не только начальные

значения входящих параметров объекта управления, но и скорость изменения значений этих переменных, т.е. динамические характеристики процесса.

Данные о входных и выходных переменных объекта управления позволяют построить модель процесса тушения пожара с помощью конкретного технического средства или способа.

Рассмотрим простейший случай построения модели процесса по одной из переменных на входе и выходе.

Пусть на входе объекта управления имеем случайную функцию X , а на выходе – случайную функцию Y . Требуется определить вероятностные характеристики объекта. Построенные по экспериментальным данным корреляционные K_{xx} и взаимные корреляционные K_{yx} функции позволяют составить уравнение, описывающее динамику изменения объекта:

$$K_{xx} G = K_{yx}, \quad (2)$$

где K_{xx} – корреляционная матрица, составленная по значениям ординат корреляционной функции входной случайной функции $X(t)$;

$$K_{yx} = \left\| K_{ij} \right\|; \quad (3)$$

$K_{ij} = K_{ji}$; $K_{ij} = K_{xx}(j-y)$; $i, j = 1, 2, 3, \dots, m$;

K_{yx} – матрица-столбец, элементами которой являются ординаты взаимной корреляционной функции входа и выхода;

$$K_{yx} = \left\| \begin{array}{c} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_m \end{array} \right\|; K_i = \frac{K_{yx}(i, T_i)}{T}, \quad (4)$$

G – матрица столбец, состоящая из элементов, представляющих собой значение ординат весовой функции:

$$G = \left\| \begin{array}{c} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_m \end{array} \right\|, \quad (5)$$

Значения ординат весовой функции g_i , $i = 1, 2, 3, \dots, m$ используют для дальнейшего моделирования и синтеза системы управления, выбора методов и параметров контроля, расчета точности и др.

Если путем идентификации по экспериментальным данным построить для стационарных линейных объектов аналитическую весовую функцию, то это позволит найти и другие важные характеристики объекта, например передаточную функцию $G(p)$.

По известной весовой функции $g(\tau)$ с помощью преобразования Лапласа находим

$$G(p) = \int_0^{\infty} g(\tau) \exp(-p\tau) d\tau. \quad (6)$$

Если $p=i\omega$, то частотная характеристика объекта будет:

$$G(i\omega) = \int_0^{\infty} g(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (7)$$

В соответствии с передаточной функцией можно записать уравнение, описывающее динамику изменения объекта, в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = \sum_{j=1}^m b_j \frac{d^j x(t)}{dt^j}. \quad (8)$$

Выводы. Разработана обобщенная экономико-математическая модель пожаротушения. Полученная модель может быть использована при планировании дорогостоящих экспериментальных исследований в натуральных условиях.

Список литературы / References

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

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

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

Kovalyshyn, V.V. *Matematychnе modeliuвання rozvytku i gasinnia pozhezh riznymy zasobamy na ob'iektakh znachnoi protiazhnosti*. [The mathematical modeling of development and extinguishing the fires by various methods at the objects of

major length]. *Naukovyi visnyk NDIPB* [Bulletin of the NDIPB], 2013, no. 1 (27), pp. 153 – 160.

3. Эколого-технологические проблемы безопасной отработки угольных месторождений: монография / С.С. Гребёнкин, И.Ф. Иванов, Ю.Ф. Булгаков и др., под общ. ред. С.С. Гребёнкина и И.Ф. Иванова. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 256 с.

Grebyenkin, S.S., Ivanov, I.F., eds., Bulgakov, Yu.F. etc. *Ekologo-tekhnologicheskiye problemy bezopasnoy otrabotki ugolnykh mestorozhdeniy: Monografiya* [The ecotechnological problems of the safe development of coal deposits: Monograph]. Donetsk, DonNTU Publ., 2004, 256 p.

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

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

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 13.04.2016

Sergey Semyenovich Grebyenkin, Dr. Sci. (Tech.), professor, leading scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;
Andrey Yur'yevich Kolyada, head of department; e-mail: kolyada1980@ukr.net;
Dmitriy Sergeevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phones (+38 062) 311-44-92.

PRINCIPLES OF THE SYSTEM APPROACH TO THE PROBLEM OF GUARANTEEING THE EFFECTIVITY OF EXTINGUISHING THE FIRES IN COAL MINES

Purpose. To work out the generalized econometric model to determine the complex index of efficiency of the fire-extinguishing.

Methods. Theoretical investigations of the efficiency of the fire-fighting means with the use of laws of the theory of probability and mathematical statistics.

Results. The choice of parameters of technical means and methods of extinguishing the fires is substantiated depending on characteristics of the fire or explosion.

Scientific novelty. The possibility of modeling the fire-extinguishing is received.

Keywords: *technical means of fire-extinguishing; dynamics of change of the object; parameters of the fire; fire-extinguishing effect; minimum costs for working-out the fire-extinguishing means.*

УДК 543.272.61:614.841.22

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52*

ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ

Цель. Исследование состава газов, образующихся в процессе самонагревания растительных веществ, на основе экспериментально полученных и известных литературных данных и связь их с температурой скопления растительных веществ.

Методика. Экспериментальное исследование газовой среды при термоокислительной деструкции растительного сырья, анализ и обобщение полученных и литературных данных.

Результаты. Выполнен лабораторный анализ газообразных компонентов, образующихся в результате термоокислительной деструкции образцов растительных веществ при различных температурах. На основании полученных экспериментальных и литературных данных показано, что при температуре 200 °С интенсивность выделения газов для всех исследуемых веществ увеличивается. Предложено в качестве индикаторного газа использовать монооксид углерода, характеризующий начало термического разложения растительных веществ. Установлено, что при обнаружении объемного выхода монооксида углерода, равного 0,1 %, температура внутри скопления растительного сырья достигает определенного значения.

Научная новизна. Установлена возможность использования монооксида углерода в качестве индикаторного газа при определении температуры самонагревания растительных веществ.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для раннего обнаружения процессов термической активности растительного сырья в процессе его хранения.

Ключевые слова: *газовый анализ; термоокислительная деструкция; самонагревание; индикаторный газ; растительные вещества.*

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. Одной из важных проблем при хранении зерновых культур и другого растительного сырья является прогноз возможного его самонагревания и возгорания. Как известно, самонагревание растительного сырья связано с жизнедеятельностью микроорганизмов, которые находятся в нем. При выделении теплоты в определенной зоне растительной массы может возникнуть очаг самонагревания, который с течением времени превратится в очаг пожара. Поэтому крайне важно прогнозировать процессы самонагревания в растительной массе с целью предупреждения ее возгорания [1].

Экспериментально установлено, что температура в центре влажной массы растительного сырья достигает 55...65 °С за 3...5 сут [2]. В работах под руководством Г.Б. Манелиса и А.В. Крестинина предложен метод, описывающий процессы самонагревания различной увлажненной органической массы растительного происхождения. Оценке влияния температуры на снижение популяции микроорганизмов посвящены работы Ю.И. Рубцова и сотрудников.

Полученные экспериментальные данные позволяют выделить диапазоны изменения температуры среды, при которых последовательно преобладают процессы питания микрофлоры, гидролиза и деструкции растительной массы. С 70...80 °С тепловыделение в увлажненной массе связано в основном с гидролизом. Существенную роль при 143 °С играет термическая деструкция растительной массы. Эти процессы при возможности дальнейшего разогревания массы приводят к возгоранию. Отмечено также, что начинающееся с 50...60 °С влияние интенсификации поглощения теплоты (за счет испарения влаги) во многих случаях будет препятствовать достижению режима теплового взрыва. Основным результатом этих работ является теоретическое описание процессов микробиологического самонагрева [3].

Расчетные методы, основанные на определении критической температуры, применяют при оценке возможности перехода микробиологического самонагрева к режиму неконтролируемого роста температуры с последующим возгоранием хранимого продукта. Критические условия такого перехода оценивают для очагового самовозгорания в соответствии с методикой обеспечения пожарной безопасности складирования самовозгорающихся материалов [4].

Все компоненты зерновых культур, комбикормов, особенно травяная мука и отруби, чрезвычайно насыщены микроорганизмами. Установлено, что при влажности больше нормативной и при температуре больше 10 °С, независимо от видового и количественного состава микроорганизмов, начинается процесс самонагрева. Каждый вид микроорганизма имеет свой температурный интервал, а образуемая теплота изменяет популяцию микроорганизмов на более термофильную. В зависимости от того, удаляется ли из продукта или накапливается в нем метаболическая или дистилляционная вода, появляющаяся в результате деятельности плесеней, самонагревание может постепенно прекратиться или перейти в следующую фазу с участием термофильных грибов, способных довести температуру до 75...83 °С, ряд из которых развивается даже при 95 °С. Большая скважистость рассыпной (60...90 %) и гранулированной (50...70 %) растительной массы обеспечивает запас воздуха, необходимого для интенсивного развития аэробной грибной флоры.

При наличии в сырье живых компонентов растительной массы происходит накопление теплоты за счет их дыхания. При этом наблюдают процесс диссимиляции сложных органических веществ до простых с освобождением аккумулированной в них энергии. Этот процесс состоит из нескольких этапов. Первый этап – дыхание, который в растительной массе осуществляется с участием кислорода воздуха – аэробно и сопровождается расщеплением белков, жиров, полисахаридов и полинуклеотидов на мономеры по схеме:

Белки – аминокислоты

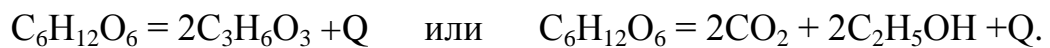
Жиры – глицерин + жирные кислоты

Полисахариды (крахмал, целлюлоза) – моносахариды (глюкоза)

Полинуклеотиды – нуклеотиды

Аэробное дыхание сопровождается потерями сухих веществ растительной массы (убылью массы), увеличением в нем количества гигроскопической влаги (повышением влажности), изменением состава воздуха межзерновых пространств и образованием большого количества теплоты в растительной массе.

Второй этап – гликолиз – протекает без кислорода и является началом расщепления и окисления глюкозы по схеме молочно-кислого или спиртового брожения:



Третий этап – окисление до диоксида углерода (CO_2) и воды в присутствии кислорода и выделение большого количества теплоты:



Первый (аэробный) тип дыхания считается основным. Он осуществляется при нормальном хранении растительных масс, достаточном доступе к ним воздуха. Второй (анаэробный) тип дыхания является приспособительным к возникающим в процессе хранения материалов неблагоприятным условиям окружающей среды, заключающимся в недостатке или полном отсутствии кислорода в межзерновых пространствах. Диоксид углерода, образующийся в результате дыхания, постепенно вытесняет из растительной массы воздух, содержащий кислород, и вынуждает клетки зерна перейти с аэробного на анаэробное дыхание.

При хранении товарных продуктов растительного происхождения, предназначенного для переработки, наибольшее значение имеет не вид дыхания, а его интенсивность, которая в свою очередь зависит от влажности, температуры и степени аэрации зерновой массы [5].

Проведенный в работах [6, 7] анализ показал, что для раннего обнаружения процессов термической активности растительного вещества может быть использован не только постоянный мониторинг температурного режима, но и контроль состава компонентов газовой среды в местах хранения сырья.

Цель настоящей работы – исследование состава газов, образующихся при термоокислительной деструкции растительных веществ, на основе экспериментально полученных и известных литературных данных и связь их с температурой теплового самонагрева.

Результаты исследований. Как отмечалось ранее, микроорганизмы при температуре около $100\text{ }^\circ\text{C}$ погибают, однако повышение температуры в веществе не прекращается, так как некоторые органические соединения в это время уже обугливаются. Образующийся при этом пористый уголь имеет свойство адсорбировать пары и газы, что сопровождается выделением теплоты.

В случае малой теплоотдачи уголь нагревается до начала процесса окисления и температура растительных веществ повышается, достигая 200 °С. Это приводит к разложению клетчатки, дальнейшему обугливанию массы и выделению горючих газов. Процесс окисления пористого угля интенсифицируется, в результате чего температура растёт и возникает горение.

В процессе самовозгорания и горения растительного сырья, выделяющиеся горючие газы скапливаются в пустотах и свободном пространстве хранилища, нередко образуя с воздухом пожароопасную газоздушную смесь [2].

Для лабораторных исследований НИИГД выбрана методика, принцип которой заключается в пропускании воздуха с определенной скоростью сквозь нагретое до заданной температуры вещество и отборе газовой пробы на анализ.

При термоокислительной деструкции растительного сырья в основном регистрируют выделение горючих (H_2 , CO , CH_4) и негорючих (CO_2) газов, состав и количество которых изменяется в зависимости от состояния очага в массе продукта [6-8]. В исследованиях НИИГД, кроме распространенных газов, определяли оксид серы, сероводород и кислород, а также контролировали потерю массы образца в процессе деструкции.

В качестве объектов исследования выбраны опилки древесные (2,5...1 мм), мука ржаная (0,5...0,25 мм), зерно овса размолотое (0,5...0,25 мм).

Лабораторные исследования проведены на установке термического разложения вещества (рис. 1).

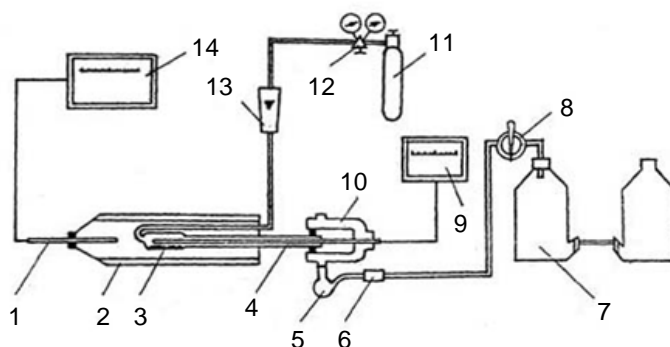


Рис. 1. Схема установки термического разложения твердых веществ и материалов:

- 1, 4 – термоэлектрические преобразователи; 2 – печь; 3 – реакционный сосуд;
 5 – сборник смолистых веществ; 6 – дымный фильтр; 7 – сборник газовой смеси;
 8 – кран; 9 – милливольтметр; 10 – холодильник; 11 – баллон с воздухом;
 12 – редуктор; 13 – ротаметр; 14 – потенциометр

В реакционный сосуд из кварцевого стекла помещали предварительно высушенное исследуемое вещество массой не более 0,5 г и пропускали воздух в течение 20 мин со скоростью 0,2 дм³/мин. Нагревали сосуд с помощью печи, в которую вставляли его при заданной температуре. Газообразные продукты

после прохода сборника смолистых веществ и дымного фильтра поступали в камеру отбора проб, представляющую две стеклянных емкости, одна из которых заполнена насыщенным раствором хлорида натрия. Расход воздуха контролировали ротаметром. Газовую смесь отбирали при температурах 80, 200 и 300 °С. Количественный анализ выбранных газов проводили с помощью газоанализаторов типа ГХМ.

В результате лабораторных исследований при всех температурах деструкции веществ количественно определены CO, CO₂ и O₂ (см. таблицу). При температуре 300 °С в газообразных продуктах термодеструкции муки ржаной обнаружена объемная доля сероводорода и оксида серы, равная 1,5 и 0,5 % соответственно, зерна овса – объемная доля сероводорода 1,5 %.

Термодеструкция растительных веществ

| Растительное вещество | Температура, °С | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------------|--------|-----------------|----------------|-----|-----------------|----------------|
| | 80 | | | 200 | | | 300 | | |
| | Объемная доля газа, % | | | | | | | | |
| | CO | CO ₂ | O ₂ | CO | CO ₂ | O ₂ | CO | CO ₂ | O ₂ |
| Опилки древесные | 0,0006 | 0,12 | 17,5 | 0,0009 | 0,10 | 10,2 | 1,1 | 1,2 | 17,2 |
| Зерно овса размолотое | 0,0005 | 0,5 | 14,5 | 0,2 | 0,2 | 19 | 10 | 0,8 | 12,2 |
| Мука ржаная | 0,0002 | 0,3 | 12,8 | 0,0009 | 0,19 | 13,2 | 0,6 | 0,7 | 10,0 |

Исследуемые образцы растительного вещества при температуре 300 °С меняют внешний вид: наблюдали обугливание, а для размолотого зерна овса – спекание. Потеря массы образцов при этой температуре составила более 70 %.

Для дальнейшего анализа рассмотрим CO, так как выделение CO₂ может происходить не только в процессе нагревания сырья, но и при нормальной температуре в результате дыхания растительной массы.

Экспериментально полученные значения объемного выхода газов, образующихся при тепловом самонагревании растительных веществ, таких, как опилки древесные, мука ржаная и зерно овса, хорошо согласуются с опубликованными данными для пшеницы, шрота подсолнечного [6] и хлопкового [2]. Все результаты получены при термоокислительной деструкции растительного вещества, но отличаются скоростью пропускания воздуха сквозь нагретый образец, однако, как видно из рис. 2, наблюдаем общую тенденцию резкого увеличения концентрации CO после 200 °С.

Анализ концентрации монооксида углерода, образующегося в результате термоокислительной деструкции растительного сырья, при изменении температуры показывает, что выделение объемной доли газа 0,1 % и более может служить сигналом достижения температуры внутри скопления, равной

200 °С. Таким образом, контроль СО позволит выявить и предотвратить распространение очага самовозгорания растительной массы.

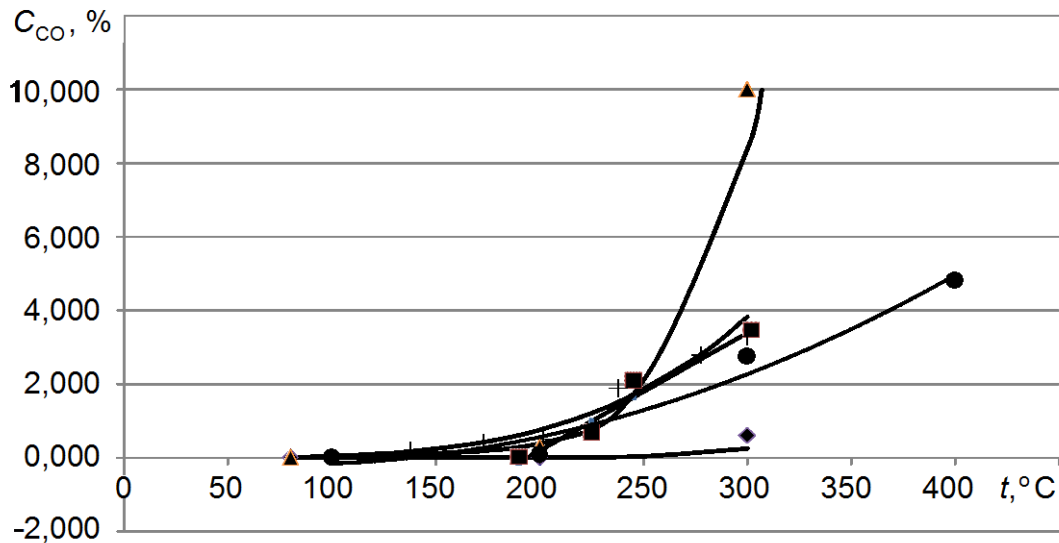


Рис. 2. Результаты определения объемного выхода СО при различной температуре:

■ – пшеница; ◆ – мука ржаная; ● – шрот хлопковый; + – шрот подсолнечный;
▲ – зерно овса размолотое

Выводы. Получены экспериментальные значения объемной доли газов, образующихся в результате теплового самонагрева растительных веществ при различной температуре. Установлена возможность использования монооксида углерода в качестве индикаторного газа при установлении температуры самонагрева растительных веществ.

Список литературы / References

1. Беяева В.В. Математическое моделирование процесса самонагрева насыпи растительного сырья // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Механіка». – 2014. – Вип.18, т. 1, № 5. – С. 12 – 16.

Belyayeva, V.V. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessa samonagrevaniya nasypi rastitel'nogo syr'ya* [The mathematical modelling of the process of the spontaneous heating of the vegetable feed fill]. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo universytetu. Serii "Mekhanika"* [Bulletin of the Dnipropetrovsk University. Series "Mechanics"]. 2014, issue 18, vol. 1, no. 5, pp. 12 – 16.

2. Дегтярев А.Г. Научные основы обнаружения самовозгорания и горения растительного сырья: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1998. – 448 с.

Degtyaryev, A.G. *Nauchnyye osnovy obnaruzheniya samovozgoraniya i gorennya rastitel'nogo syr'ya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The scientific grounds of

detection of the spontaneous heating and burning of the vegetable feed. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1998, 448 p.

3. Гаврилов А.В., Корольченко И.А. Способ оценки возможности микробиологического самовозгорания продукции на объектах хранения / Известия МГТУ «МАМИ», 2012. – Т. 4, № 2(14). – С. 219 – 228.

Gavrilov, A.V., Korol'chenko, I.A. *Sposob otsenki vozmozhnosti microbiologicheskogo samovozgoraniya produktsii na obyektakh khraneniya* [Method of assessment of the possibility of the microbiological spontaneous ignition of the products on the storage objects]. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Proceedings of the MGTU "MAMI"]. 2012, vol. 4, no. 2(14), pp. 219 – 228.

4. Корольченко И.А. Тепловое самовозгорание насыпей и отложений твердых дисперсных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2007. – 472 с.

Korol'chenko, I.A. *Teplovoye samovozgoraniye nasypey i otlozheniy tvyerdykh dispersnykh materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The thermal spontaneous ignition of fills and deposits of the solid dispersed materials. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2007, 472 p.

5. Зберігання і переробка продукції рослинництва / Г.І. Подпрятюв, Л.Ф. Скалецька, А.М. Сеньков, В.С. Хилевич. – Київ: Мета, 2002. – 495 с.

Podpriatov, G.I., Skalets'ka, L.F., Sen'kov, A.M., Khylevych, V.S. *Zberigannia i pererobka produktsii poslynnnystva* [Storing and processing of the plant cultivation products]. Kyiv, Meta Publ., 2002, 495 p.

6. Откідач Д.М., Альбоший В.М. Вибухобезпека зберігання та перероблення продукції сільськогосподарського виробництва. Теорія та практика. – Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2006. – 288 с.

Otkidach, D.M., Al'boshchy, V.M. *Vybukhobezpeka zberigannia ta pereroblennia produktsii sil's'kogospodars'kogo vyrobnystva. Teoriia ta praktyka* [Explosion safety of the storing and processing of the agricultural manufacture products. Theory and practice]. Kyiv, UkrNDIPB MChS Ukrainy, 2006, 288 p.

7. Совершенствование методов раннего обнаружения очагов самонагревания и самовозгорания растительного сырья в хранилищах силосного типа / Л.П. Вогман, В.А. Зуйков, Б.А. Болодурин, А.А. Михайлов // Пожарная безопасность. – 2006. – № 4. – С. 86 – 90.

Vogman, L.P., Zuykov, V.A., Bolodurin, B.A., Mikhaylov, A.A. *Sovershenstvovaniye metodov rannego obnaruzheniya ochagov samonagrevaniya i samovozgoraniya rastitel'nogo syr'ya v khranilishchakh silosnogo tipa* [Improvement of the methods of early detection of the spontaneous heating and spontaneous ignition hearths of the vegetable feed in the storages, silo type]. *Pozharnaya bezopasnost'* – Fire safety, 2006, no. 4, pp. 86 – 90.

8. Вогман Л.П., Дегтярёв А.Г. Математическая модель процесса самонагревания насыпи растительного сырья // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – С. 21 – 28.

Vogman, L.P., Degtyaryev, A.G. *Matematicheskaya model' protsessa samonagrevaniya nasypi rastitel'nogo syr'ya* [The mathematical model of the

process of the spontaneous heating of the vegetable feed fill]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire-and-explosion safety*, 1993, pp. 21 – 28.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 09.03.2016

Victoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-13-52

THE GAS ANALYSIS OF ORGANIC SUBSTANCES BY THE THERMAL-OXIDATIVE BREAK-DOWN

Purpose. Investigation of the composition of gases being generated in the process of the spontaneous heating of vegetable substances on the basis of the experimentally received and known literature data and their relationship with the temperature of an accumulation of the vegetable substances.

Methods. Experimental investigation of the gas environment by the thermal-oxidative break-down of the vegetable feed, analysis and generalization of the data received and literature data.

Results. The laboratory analysis of gaseous components being generated as a result of the thermal-oxidative break-down of the samples of the vegetable substances at various temperatures is fulfilled. It is shown on the grounds of the experimental data received and literature data that the intensity of emission of gases increases at a temperature of 200 °C for all the substances being investigated. It is proposed to use carbon monoxide characterizing the beginning of the thermal break-down of the vegetable substances as the indicator gas. It is ascertained that the temperature inside the accumulation of the vegetable feed reaches the defined value by detection of the volume recovery of carbon monoxide that it equal to 0.1 %.

Scientific novelty. The possibility of the use of carbon monoxide as the indicator gas was ascertained by determination of the temperature of the spontaneous heating of the vegetable substances.

Practical value. The results received may be used for the early warning of the processes of thermal activity of the vegetable feed in the process of its storing.

Keywords: *gas analysis; thermal-oxidative break-down; spontaneous heating; indicator gas; vegetable substances.*

III. Охрана труда

УДК 622.235.3:622.817

Николай Романович Шевцов, д-р техн. наук, замзавкафедрой; e-mail: rubljovali@gmail.com;

Иван Владимирович Купенко, канд. техн. наук, доцент; e-mail: ivk1978@gmail.com;

Донецкий национальный технический университет;

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 337-17-33

ПАРАМЕТРЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛАХ

Цель. Совершенствование автоматической системы локализации взрыва в вертикальных стволах и методики ее расчета.

Методы. Анализ и обобщение материалов по локализации (подавлению) взрывов (вспышек) в горных выработках.

Результаты. Обобщены данные по взрывозащите угольных шахт с применением автоматической системы. Показана возможность использования системы «Заслон АВП-1» с линейным взрывоподавитель, основанной на взрывном способе распыления взрывоподавляющего порошка. Конкретизирована методика расчета локализующей эффективности линейного взрывоподавителя.

Новизна. Впервые рассмотрены условия и предложены средства локализации взрывов в начальной стадии развития в вертикальных шахтных стволах.

Практическая значимость. Предложены конструктивные усовершенствования известной автоматической системы «Заслон АВП-1» и методики определения ее взрывозащитных параметров применительно к вертикальным стволам при проведении взрывных работ.

Ключевые слова: *автоматическая система; линейный взрывоподавитель; взрыв; взрывные работы; вертикальный ствол; методика расчета.*

Введение. Наиболее тяжелым по своим последствиям по-прежнему остается воспламенение метана и угольной пыли, которое в большинстве случаев носит характер катастроф. В мировом масштабе взрывы и вспышки газопылевоздушных смесей исчисляются тысячами [1-2]. Такого рода аварии имеют место и в вертикальных стволах. Вот один из примеров. В Якутии, на руднике «Удачный» вертикальный ствол проходили в условиях нефтепроявлений. Поэтому при взрывных работах на глубине порядка 500 м наблюдали интенсивное выделение горючих газов, напоминающее суфлярное выделение метана. Перед взрыванием шпуровых зарядов взрывчатого вещества (ВВ) призабойный участок заполняют низкократной пеной. В качестве ВВ использовали ВВ III класса – аммонит 5ЖВ. Имели место при выполнении взрывных работ воспламенения газозвудушных смесей (даже водная эмульсия горела). Например, только в 2007 г. произошло три таких аварии с массовыми разрушениями ствола. Все воспламенения происходили с временной задержкой по отношению к взрыванию шпуровых зарядов ВВ и охватывали порядка 150 м ствола, считая от его забоя.

Водовоздушная смесь, образовавшаяся в результате разрушения пены взрывом шпуровых зарядов, надежно флегматизировала взрывоопасную смесь

в призабойном участке ствола. Однако с течением времени (по мере расширения такой предохранительной среды вдоль ствола) концентрация капель жидкости оказывалась ниже флегматизирующей, в результате чего шахтный воздух в стволе снова становится взрывоопасным. Наиболее вероятным источником ее воспламенения служил очаг пламени, который образовался у забоя ствола после выполнения взрывных работ.

В принципе такого рода авария возможна и при вскрытии особо выбросоопасных угольных пластов в вертикальном стволе. В этих условиях возникновение взрыва возможно в результате самовоспламенения угольной пыли [3-4].

Наряду с предупреждением воспламенений газозащитных смесей не менее важной задачей взрывозащиты угольных шахт является локализация (подавление) воспламенения в начальной стадии его развития. Эта задача в действующих выработках решается путем создания на пути движения фронта пламени так называемой буферной (пламегасящей) среды за счет принудительного распыления в заданный момент времени гасящего вещества. Для этой цели во всех странах мира разрабатывают автоматические системы (заслоны).

Сложность создания автоматических систем для локализации взрыва в призабойном участке выработки при взрывных работах состоит, в первую очередь, в том, что они, размещаясь в зоне отброса взорванной горной массы, с одной стороны должны обладать высоким быстродействием, чтобы успеть вовремя создать пламегасящую среду, а с другой стороны – обладать высокой ударостойкостью. Первой в мировой практике серьезной попыткой разработки такого рода автоматических систем явилась система «Заслон АВП-1», созданная в 1985 г. МакНИИ совместно с ИГД им. А.А. Скочинского [2].

Система «Заслон АВП-1» состоит из состыкованных инфракрасного датчика пламени и линейного взрывоподавителя, подвешенных с помощью роликовых опор на монорельсовой дорожке. «Заслон АВП-1» циклического действия: датчик пламени включается только на время проведения взрывных работ – в остальное время производственного цикла система бездействует.

Взрывоподаватель в системе «Заслон АВП-1» построен в виде модулей (секций) длиной 1,4 м. Соединяя такие модули, создают установки различной взрывозащитной эффективности. «Заслон АВП-1» состоит из линейных контейнеров трехжелобчатого профиля, размещенных в призматическом решетчатом корпусе, окна которого закрыты лепестковыми клапанами из прорезиненной ленты. Все желобчатые полости контейнера заполнены взрывоподавляющим порошком ПСБ-ТМ в шланговой упаковке общей линейной плотностью 30 кг/м. Вдоль оси контейнера в каждой полости проложено по три нити детонирующего шнура (ДШ). По одной нити ДШ из каждой полости вводят в специальную камеру, где их соединяют с электродетонатором, проводники которого подключают к датчику пламени. Наружный диаметр снаряженного контейнера равен 225 мм (без наружного

корпуса) [2]. В процессе промышленной эксплуатации более чем в 22 шахтах система «Заслон АВП-1» показала способность стабильно функционировать в призабойном участке горных выработок (7...20 м от забоя), проводимых буровзрывным способом, т.е. в условиях высоких механических нагрузок и давлений, высокой влажности и агрессивности шахтного воздуха, не мешая основному производству и не загромождая при этом поперечное сечение выработок [1-2].

Целью данной работы является совершенствование системы «Заслон АВП-1» и применение ее в вертикальных стволах при проведении взрывных работ.

Результаты. В ходе приемочных испытаний установочной серии системы «Заслон АВП-1» вскрыт ряд технологических и конструктивных недостатков, до устранения которых массовый выпуск системы временно приостановлен.

Заложив в конструкцию более прогрессивные технические решения отдельных узлов системы, можно добиться значительного ее усовершенствования, сделать более компактной и удобной для применения при строительстве вертикальных шахтных стволов. Для этого необходимо изъять из комплекта системы монорельсовую дорогу. Для снижения степени доступности к детонирующему шнуру корпус взрывоподавителя следует выполнить трубчатым, изготовленным из ударопрочных хрупких пластмасс, как, например, сосуды для водяных заслонов (рис. 1). Это позволит, в частности, порошковый флегматизатор применять расфасованным не в трудноформируемые полиэтиленовые шланги, а в обычные «бытовые» пакеты или даже использовать в насыпном виде, снаряжая тем самым взрывоподавитель по принципу зарядки шпуров с помощью забойника.

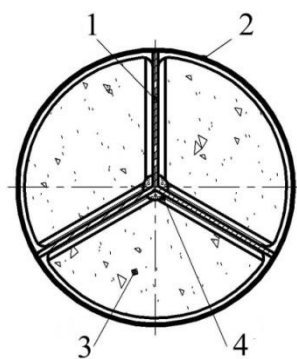


Рис. 1. Поперечный разрез линейного взрывоподавителя модернизированной системы «Заслон АВП-1»:

- 1 – трехжелобчатый контейнер; 2 – трубчатый корпус; 3 – распыляющий ВВ заряд;
4 – флегматизатор ПСБ-ТМ в полиэтиленовой упаковке

Система «Заслон АВП-1» должна подвешиваться вдоль оси ствола вместо отвеса (функции последнего будет выполнять современная система лазерного

нивелирования). Причем при проведении взрывных работ она будет висеть ниже проходческого полка на расстоянии 10...15 м от забоя, а при других операциях проходческого цикла – над полком (рис. 2, а).

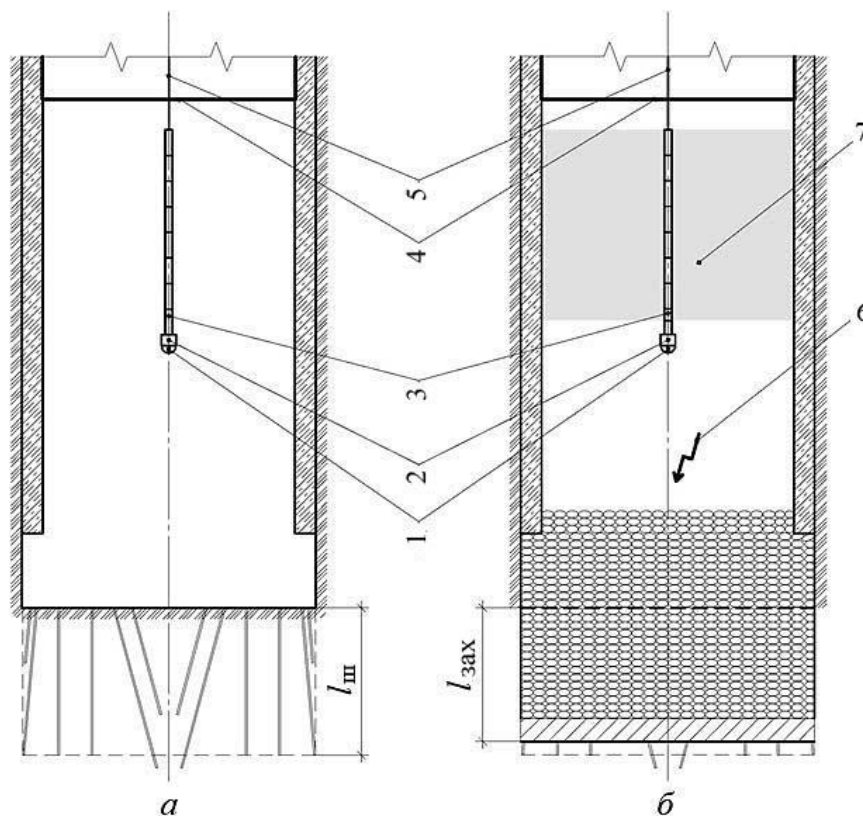


Рис. 2. Схема размещения системы «Заслон АВП-1» в призабойном пространстве вертикального ствола при проведении взрывных работ:

а – до взрывания шпуровых зарядов ВВ; *б* – после выполнения взрывных работ; $l_{ш}$ – глубина шпуров; $l_{зах}$ – длина заходки; 1 – датчик пламени; 2 – взрывная камера для электродетонатора и отрезков детонирующего шнура (ДШ); 3 – линейный взрывоподавитель; 4 – опалубка; 5 – подвесной канат; 6 – источник воспламенения взрывоопасной смеси; 7 – пламегасящая среда

Учитывая, что длина заходки в стволах 4 м (эквивалентна высоте опалубки), то после взрывания шпуровых зарядов передний конец заслона будет отстоять на 6...11 м от вновь сформировавшегося забоя. При таком расположении заслона будут отсутствовать горнорабочие в зоне его действия, что исключает отрицательное психологическое воздействие на людей, на возможность несанкционированного («ложного») срабатывания взрывоподавителя. Вместе с тем несанкционированные и принудительные срабатывания системы в процессе приемочных испытаний подтвердили ее высокую безопасность по отношению к человеку: при взрыве девяти нитей ДШ общей длиной 76...126 м не возникало травмирующих факторов при нахождении людей не только на расстоянии 25 м от взрывоподавителя, но и в непосредственной близости (на расстоянии 0,5 м) от него.

Такая схема установки дает основание, кроме того, упростить конструкцию датчика пламени путем перевода системы с циклического на дежурный режим работы, т.е. на режим постоянного включения.

Принцип работы системы следующий. При возникновении воспламенения датчик пламени регистрирует его и выдает импульс тока в цепь электродетонаторов. Взрывом последнего инициируется ДШ. Под действием энергии взрыва ДШ разрывается труба и происходит распыление порошка в стволе в направлении перпендикулярно его оси одновременно по всей длине взрывоподавляющего устройства (рис. 2, б).

Эффективные параметры линейного взрывоподавителя установлены по известной методике [2], но интерпретированной применительно к рассматриваемым условиям решения технической задачи.

В основу расчета положена так называемая критическая дальность разлета высокотемпературных продуктов взрыва, т.е. дальность, за пределами которой взрывчатая метановоздушная смесь не способна воспламениться L_k .

Длина линейного взрывоподавителя $l_{вп}$ определяется исходя из следующего условия:

$$l_{вп} \geq L_k. \quad (1)$$

Расчетное уравнение для определения критической дальности установлено экспериментально и имеет следующий вид:

$$L_k = 6,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{Q_t}{\eta}}, \quad (2)$$

где Q_t – количество теплоты, выделившейся при взрыве (тепловая мощность взрыва), Дж/с;

η – относительный показатель теплофизической эффективности веществ (за эталон принят воздух).

Параметр Q_t определяют общепринятым методом, а именно:

$$Q_t = qU_c S_{св}, \quad (3)$$

где $S_{св}$ – площадь поперечного сечения ствола в свету, m^2 ;

q – удельная теплота взрыва (для стехиометрической метановоздушной смеси равна $3,381 \cdot 10^6$ Дж/м³);

U_c – средняя скорость распространения ударной волны до встречи с буферной средой, м/с.

Неизвестным параметром в формуле (3) является скорость распространения пламени до встречи с пламегасящей средой, формируемой в стволе после срабатывания взрывоподавителя. Установим ее исходя из

следующих соображений. При проходке стволов применяют для взрывных работ непридохранительное ВВ (II класс), как правило, аммонал скальный № 1, прессованный. Для обеспечения безопасности в этих условиях забой ствола затапливают водой на высоту не менее 20 см. Поэтому детонирующий заряд как источник воспламенения исключен.

При проходке вертикальных стволов шахт используют параллельно-ступенчатую схему соединения электродетонаторов. При этом у забоя ствола на деревянных кольях закрепляют (друг над другом) два кольца антенных неизолированных медных проводов длиной 20...30 м каждое, к которым подсоединяют все детонаторные провода, а также гибкий магистральный кабель НГШМ для подачи электрического тока.

Следовательно, наиболее вероятным источником воспламенения взрывоопасной смеси в стволах может быть электрическое искрение, возникающее после разрыва антенных проводов. Опасность такой ситуации усугубляется тем, что для инициирования шпуровых зарядов применяют электродетонаторы мгновенного, короткозамедленного и замедленного (до 2 с) действия. Вероятность такого вида воспламенения значительно увеличивается при взрывании шпуровых зарядов не от стандартного прибора СВПТ-1М, а от сети переменного тока, если электродетонаторов более 100.

Согласно принятой схеме размещения автоматической системы в стволе, к моменту встречи с пламегасящей средой воспламенится смесь на участке ствола диаметра 6...11 м. Это означает, что гашение пламени линейным взрывоподавителью будет осуществляться в пределах зоны, в которой горение происходит от нескольких метров до нескольких десятков метров в секунду (в зоне воспламенения) [2]. Из работы [2] следует, что при воспламенении нестехиометрической метановоздушной смеси (ее можно отождествить с частично зафлегматизированной частицами породы и каплями воды стехиометрической смесью) время развития пламени в пределах участка выработки длиной 8 м равно 0,89 с, т.е. средняя скорость распространения пламени до встречи с пламегасящей средой 9 м/с.

Исходя из изложенного для расчета параметра Q_t по формуле (3) принимаем $U_c = 9$ м/с.

В работе [2] было найдено модельно-эмпирическое решение, при котором в качестве параметра, определяющего теплофизические свойства пламегасящей среды, было принято удельное теплопоглощение и ее плотность. Полученная эмпирическая формула имеет вид

$$\eta = 10,8 \cdot 10^{-9} C_n^{1,07} \lambda^{1,4} + 1,11, \quad (4)$$

где C_n – начальная концентрация флегматизатора в стволе в месте расположения взрывоподавителя, численно равная пламегасящей концентрации – минимальной концентрации, при которой достигается локализация взрыва в пределах участка ствола, равного $\ell_{вп}$, кг/м³;

λ – удельное теплопоглощение взрывоподавляющего вещества (рассчитывают общепринятыми методами или устанавливают экспериментально, например, по методике, приведенной в работе [5]).

Для состава ПСБ-ТМ экспериментально установлено, что $\lambda = 2,012 \cdot 10^6$ Дж/кг [5]. Полагая, что в процессе гашения пламени принимает участие вся распыленная навеска флегматизатора, получим

$$C_n = \frac{C_v}{S_{ст}} = \frac{30}{S_{ст}}, \quad (5)$$

где $C_v = 30$ кг/м – линейная плотность флегматизатора ПСБ-ТМ во взрывоподавительной системе «Заслон АВП-1».

Подставив значения Q_t и η в формулу (2), определим критическую дальность распространения раскаленных продуктов взрыва в данной пламегасящей среде в стволах различного диаметра (см. таблицу).

Результаты расчета системы «Заслон АВП-1»

| Параметры ствола | | $Q_t \cdot 10^{-8}$, Дж/с | η | L_k , м | Протяженность взрывоподавителя | | M_{ϕ} , кг |
|------------------|---------------------------|-------------------------------|--------|--------------|-----------------------------------|---------------|--------------------|
| $D_{св}$, м | $S_{св}$, м ² | | | | ℓ_3 , м | Кол-во секций | |
| 6 | 28,3 | 8,28 | 8,80 | 5,95 | 5,6 | 4 | 168 |
| 7 | 50,5 | 14,78 | 5,25 | 10,30 | 9,8 | 7 | 294 |
| 8 | 67,2 | 19,66 | 4,16 | 13,30 | 12,6 | 9 | 378 |

Учитывая, что при расчетах принимали определенные запасы по безопасности, принимаем исходя из неравенства (1) несколько меньшую по сравнению с L_k протяженность линейного взрывоподавителя, увязывая это значение с длиной его секций.

Общую массу распыляемого флегматизатора M_{ϕ} , кг, рассчитывают по формуле

$$M_{\phi} = 30 \ell_{вп}. \quad (6)$$

Локализация взрыва в начальной стадии его развития наиболее сложна. Это объясняется тем, что буферная среда в этом случае будет представлять собой неустойчивую дисперсную систему со взрывчатой дисперсионной средой. А это в свою очередь означает, что в результате снижения концентрации флегматизатора (дисперсной фазы) в шахтном воздухе буферная среда может стать с течением времени взрывчатой системой.

Таким образом, при локализации взрыва в загазованном призабойном участке ствола накладывается дополнительное условие: прежде чем тушить

пламя на заданном участке выработки (в пределах буферной среды), необходимо превратить в его пределах взрывчатую метановоздушную смесь в невзрывчатую систему, т.е. выполнить условие

$$C_t \geq C_\phi, \quad (7)$$

где C_ϕ – флегматизирующая концентрация – минимальная концентрация, при которой взрывчатая смесь, становится невзрывчатой системой; для флегматизатора ПСБ-ТМ $C_\phi = 0,02 \text{ кг/м}^3$ [5];

C_t – концентрация флегматизатора в буферной среде в заданный момент процесса гашения пламени, кг/м^3 .

В работе [2] обосновано, что при формировании в горной выработке пламегасящей среды взрывом заряда ВВ (в данных условиях – взрывом девяти нитей детонирующего шнура) концентрация флегматизатора в шахтном воздухе будет уменьшаться во времени по закону расширения облака в неограниченном пространстве (на открытой площадке) – отраженные частицы увеличивают концентрацию только вблизи стенок выработки, а законы гравитации начинают играть существенную роль только после полного прекращения расширения облака.

Следовательно, среднюю фактическую концентрацию C_t , кг/м^3 , в пламегасящей среде в любой момент времени после срабатывания линейного взрывоподавителя следует рассчитывать по формуле

$$C_t = \frac{C_L}{S_t} = \frac{30}{S_t}, \quad (8)$$

где S_t – площадь поперечного сечения цилиндра пламегасящей буферной среды в заданный момент процесса гашения пламени, м^2 .

Для повышения надежности вывода по выполнению условия (7) считаем, что за величины S_t и C_t следует принять их предельные значения, т.е. $S_{\text{пр}}$ и $C_{\text{пр}}$ соответственно. Скоростной киносъемкой установлено, что предельный радиус пламегасящего облака, формируемого описанной конструкцией взрывоподавителя, равен 6,8 м (через 2 с после начала распыления). Тогда $S_{\text{пр}} = 145,2 \text{ м}^2$. Подставив это значение в формулу (8), получим, что $C_{\text{пр}} = 0,21 \text{ кг/м}^3$.

Сравнение $C_{\text{пр}}$ и C_ϕ показывает, что взрывное распыление флегматизатора из линейного взрывоподавителя системы «Заслон АВП-1» и сам тип флегматизатора обеспечивают создание эффективной невзрывчатой пламегасящей среды, так как условие (7) выполняется с запасом на целый порядок. В этом плане следует отметить, при применении для локализации взрыва в этих условиях инертной пыли, которая используется в угольных шахтах для осланцевания горных выработок и формирования сланцевых заслонов, флегматизирующая концентрация которой равна $C_\phi = 0,788 \text{ кг/м}^3$ [5], потребовалась бы подвеска в стволе четырех расположенных параллельно друг

другу заслонов ($0,788:0,21 = 3,8$) примерно такой же протяженности (для ствола диаметром 7 м $\eta = 6,0$; $L_k = 9,6$ м).

Выводы

1. Модернизированная система «Заслон АВП-1» способна обеспечивать локализацию взрывов и вспышек в начальной стадии развития при выполнении взрывных работ в вертикальных стволах по следующим принципиальным соображениям: непылящий и нетоксичный флегматизатор ПСБ-ТМ обладает не только высокими ингибирующими свойствами, но и значительной теплопоглощающей эффективностью; при взрывном способе распыления флегматизатора происходит его дополнительное измельчение и активизация поверхности молекул и атомов; распыление порошка в направлении, перпендикулярном оси ствола, обеспечивает быстрое действие системы.

2. Линейный взрывоподаватель длиной 5,6, 9,8 и 12,6 м для стволов диаметром 6, 7 и 8 м соответственно при линейной концентрации порошка, равной 30 кг/м, обеспечивает локализацию взрыва в начальной стадии его развития при удалении заслона от забоя на 10...15 м.

Будет продолжена разработка (в передвижном варианте) на базе модернизированного «Заслона АВП-1» автоматической системы для защиты горноспасателей от вредных последствий взрывов, которые возможны при ликвидации аварии.

Список литературы / References

1. Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов, А.С. Голиков, Д.Ю. Палеев, Н.Р. Шевцов. – М.: Недра, 1990. – 286 с.

Umnov, A.Ye., Golikov, A.S., Paleyev, D.Yu., Shevtsov, N.R. *Preduprezhdeniye i lokalizatsiya vzryvov v podzemnykh usloviyakh* [Prevention and localization of explosions under underground conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 286 p.

2. Шевцов Н.Р. Взрывозащита горных выработок. – 2-е изд. перераб. и доп. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – 280 с.

Shevtsov, N.R. *Vzryvozashchita gornyykh vyrabotok. 2-ye izd. pererab. i dop.* [Explosion protection of mine workings. The 2nd revised and supplemented edition]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2002, 280 p.

3. Физика горения и взрыва метановоздушной смеси и угольной пыли / Л.И. Гречихин, Н.Р. Шевцов, И.В. Купенко, Н.Г. Куць // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. горно-геологічна. – 2014. – Вып. 20 (1). – С. 104 – 111.

Grechikhin, L.I., Shevtsov, N.R., Kupenko, I.V., Kuts', N.G. *Fizika goreniya i vzryva metanovozdushnoy smesi i ugol'noy pyli* [Physics of combustion and explosion of the methane-air mixture and coal dust]. *Naykovi pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universytetu. Seriya gorno-geologicheskaya*

[Scientific works of the Donetsk National Technical University. Mining-and-geological series]. 2014, issue 20 (1), pp. 104 – 111.

4. Калякин С.А. Пожаровзрывобезопасность угля и пылегазовых смесей в шахтах // Вести Донецкого горного института. – 2013. – Вып. № 1 (32). – С. 127 – 145.

Kalyakin, S.A. *Pozharovzryvobezopasnost' uglya i pylegazovykh smesey v shakhtakh* [Fire- and explosion safety of coal and dust-gas mixtures in mines]. *Vesti Donetskogo gornogo instituta* [News of the Donetsk Mining Institute]. 2013, issue no. 1 (32), pp. 127 – 145.

5. Шевцов Н.Р. Экспериментальные данные по предотвращению воспламенений метановоздушной смеси взрывом заряда ВВ // Сб. науч. тр. / ДонГТУ. Сер. горно-геологическая. – 2001. – Вып. 23. – С. 32 – 36.

Shevtsov, N.R. *Eksperimental'nyye dannyye po predotvrashcheniyu vosplamneniy metanovozdushnoy smesi vzryvom zaryada vzryvchatogo veshchestva* [Experimental data on prevention of ignitions of the methane-air mixture with the explosion of the explosive charge]. *Sb. nauch. tr. DonGTU. Ser. gorno-geologicheskaya* [Collected scientific papers of the Donetsk State Technical University. Mining-and-geological series]. 2001, issue 23, pp. 32 – 36.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 18.04.2016

*Nikolay Romanovich Shevtsov, Dr. Sci. (Tech.), deputy head of subdepartment;
e-mail: rubljovali@gmail.com;*

*Ivan Vladimirovich Kupenko, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: ivk1978@gmail.com;
The Donetsk National Technical University;
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 337-17-33*

PARAMETERS OF THE AUTOMATIC SYSTEM OF LOCALIZATION OF EXPLOSIONS IN VERTICAL MINE SHAFTS

Purpose. Improvement of the automatic system of localization of the explosion in the vertical mine shafts and methods of its calculation.

Methods. Analysis and generalization of materials on localization (suppression) of the explosions (outbursts) in mine workings.

Results. The data concerning the explosion protection of the coal mines with the use of the automatic system are generalized. The possibility of the use of the “Заслон АВП-1” system with a line explosion suppressor based on the explosion methods of dispersion of the explosion suppression powder is shown. The methods of calculation of the localizing activity of the line explosion suppressor are made more specific.

Novelty. The conditions are considered for the first time, and the means of localization of the explosions at the initial stage of development in the vertical mine shafts are proposed.

Practical value. The constructive improvements of the “Заслон АВП-1” automatic system known and methods of determination of its explosion protection parameters with regard to the vertical mine shafts by firing operations are proposed.

Keywords: *automatic system; line explosion suppressor; explosion; firing operations; vertical mine shaft; methods of calculation.*

УДК [622.868.42:691.5]:69.057.52

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

Владислав Анатольевич Чернышев, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-3@mail.ru;

Элеонора Геннадиевна Чайковская, ведущий инж.; e-mail: niigd.osmas-4@mail.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-12-00

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАРКАСНЫХ ОПАЛУБОК МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

Цель. Определить основные параметры разрабатываемых каркасных опалубок и геометрические характеристики сечения профиля несущей конструкции.

Методика. Аналитические исследования и расчеты для определения параметров.

Результаты. Определены тип профиля стоек разрабатываемых каркасных опалубок и геометрические характеристики его сечения; вычислены нормальное и касательное напряжения выбранного сечения; определены расчетные напряжения.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют рассчитать конструктивные параметры быстровозводимых каркасных опалубок многоразового использования для их применения при возведении взрывоустойчивых перемычек в горных выработках шахт во время проведения аварийно-спасательных работ, что значительно повысит эффективность ведения изоляционных работ.

Ключевые слова: шахта; пожар; перемычка; опалубка; стойка.

Постановка проблемы. Пожары продолжают занимать значительную часть общего количества аварий в шахтах [1]. Немалая доля – пожары, основным способом тушения которых является изоляция перемычками. По функциональному назначению и сроку службы изолирующие перемычки условно делят на временные, постоянные, взрывоустойчивые и водоупорные. На шахтах, опасных по взрывам газа, пожарные участки изолируют только взрывоустойчивыми перемычками [2], которые должны выдерживать действие ударной волны при взрыве метановоздушной смеси и угольной пыли.

Взрывоустойчивые перемычки возводят на участках выработок с наиболее стойкими породами на безопасном расстоянии с помощью агрегатов «Монолит» («Пневмолит») и их аналогов гидромеханическим способом из материалов на основе гипсового вяжущего [3].

Один из основных элементов гипсовой взрывоустойчивой перемычки – опалубка. Сооружение опалубки – трудоёмкий процесс при возведении монолитной перемычки гидромеханическим способом. Большие затраты времени связаны с тем, что ее возводят в основном из шахтных лесоматериалов.

Эффективность опалубки определяется возможностью ее быстрой видоизменяемости в соответствии с формой поперечного сечения горной выработки, легкостью и простотой демонтажа. Опалубочные системы для возведения изолирующих сооружений в шахтах должны отвечать предъявляемым к ним требованиям по конструктивной прочности, надежности и долговечности, также точности изготовления.

Анализ последних исследований [2, 3] показал, что необходимо совершенствование конструкций каркасных опалубок, которые можно использовать многократно.

Цель работы – определить основные параметры разрабатываемых каркасных опалубок и геометрические характеристики сечения профиля несущей конструкции.

Материалы и результаты исследования. Для создания легкой и мобильной конструкции опалубки в первую очередь необходимо подобрать тип профиля и поперечное сечение стоек, при которых разрабатываемая каркасная опалубка способна была бы выдержать давление слоя гипсовой смеси в жидкой фазе.

Скорость заливания раствора ограничена производительностью оборудования для приготовления и перекачивания раствора и равна (10 ± 2) м³/ч, а время схватывания быстротвердеющих растворов из строительных гипсов зависит от различных факторов и равно 5...15 мин. Стойки выполнены раздвижными телескопическими и соединены между собой стяжками на расстоянии 1 м. На стойках закреплены ограждение из металлической сетки и штора из полипропиленовой или джутовой ткани, удерживающие застывающий гипсовый раствор. Исходя из конструктивных особенностей разрабатываемой опалубки можно вычислить толщину слоя незастывшего гипсового раствора и поперечную нагрузку на стойку. Надо отметить, что в месте возведения опалубки выполняют вруб по периметру выработки.

Разрабатываемый комплект опалубки должен позволять возводить перемишки в выработках с площадью поперечного сечения 4...30 м² толщиной соответственно 1,6...4,5 м согласно требованиям существующей нормативной документации.

При равномерной подаче раствора и постоянном объеме жидкой фазы гипсовой смеси очевидно, что наибольшая высота слоя незастывшего раствора и соответственно давление на каркас опалубки будут при наименьших площадях сечений и толщине перемишки, т.е. 4 и 1,6 м, и высоте стойки 2 м. Расчеты показали, что максимальный момент сопротивления W_y , прямо пропорциональный высоте стойки L , исходя из которого будем выбирать параметры стоек, в нашем случае будет наибольшим при высоте стойки 2 м (рис. 1).

Рассчитаем нагрузку на стойку.

Определим объем незастывшего раствора V , м³, по формуле

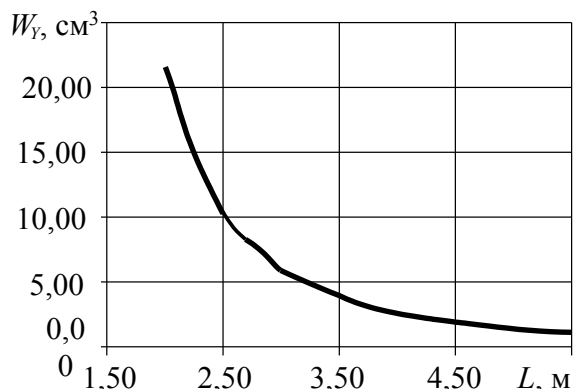


Рис. 1. Зависимость максимального момента сопротивления от высоты стойки

$$V = Qt/60 = 3,0, \quad (1)$$

где Q – максимальная подача гипсового раствора; $Q = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$;

t – максимальное время застывания раствора; $t = 15 \text{ мин}$.

Высота слоя незастывшего раствора, оказывающего давление на опалубку h , м:

$$h = V/(ld) = 0,938, \quad (2)$$

где l – ширина перемычки; $l = 2 \text{ м}$;

d – толщина перемычки; $d = 1,6 \text{ м}$.

Давление незастывшего раствора на стойку ограничено площадью S , м²:

$$S = hl_c = 0,938,$$

где l_c – расстояние между стойками; $l_c = 1 \text{ м}$.

Вычислим силу давления F , кН, действующую со стороны незастывшего раствора на площадь S .

Согласно работе [4] при условии, что на свободной поверхности давление атмосферное, элементарная сила давления, приложенная к бесконечно малой площадке dS :

$$dF = pdS = \rho gh dS,$$

где p – давление жидкости, МПа;

ρ – объемная масса гипсового раствора; $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$;

g – ускорение свободного падения; $g = 9,81 \text{ м/с}$.

Для определения полной силы F проинтегрируем полученное выражение по всей площади S :

$$F = \rho g \int_S h dS = \rho g \sin \alpha \int_S y dS,$$

где α – угол наклона стойки относительно горизонта, ...°; $\alpha = 90^\circ$;

y – координата площадки dS .

Полученный интеграл представляет собой статический момент площади S относительно оси Ox и равен произведению этой площади на координату ее центра тяжести ($y_c = h/2$):

$$\int_S y dS = y_c S.$$

Отсюда

$$F = \rho g \sin \alpha y_c S = 6,90.$$

Расчет будем вести при приложении бокового давления раствора к середине стойки, так как наибольший изгибающий момент возникает в точке, равноудаленной от опор.

Для нахождения максимальных изгибающего момента и поперечной силы проведем построение эпюр. Исходные данные: $F = 6,90$ кН; точка приложения нагрузки $Y_1 = 1,0$ м; полная длина балки $L = 2$ м (рис. 2).

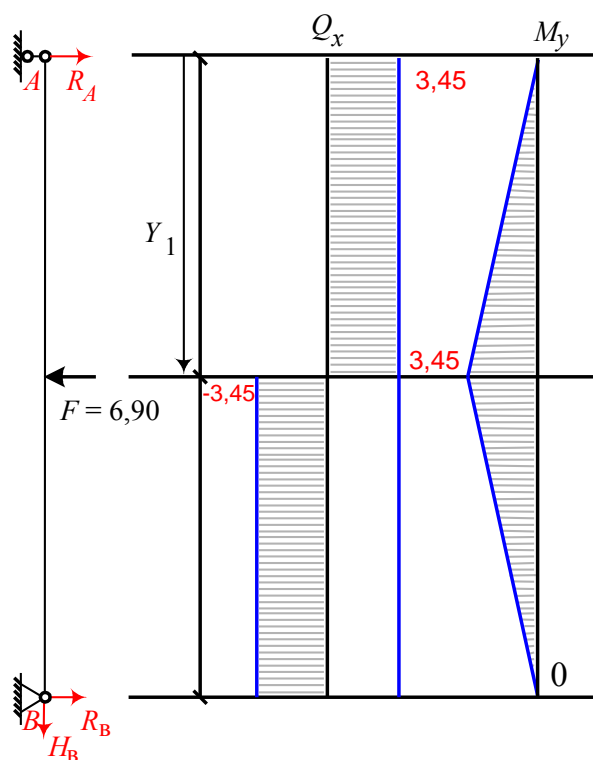


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов и поперечных сил

Далее проведем подбор параметров сечения нижней секции стойки как наиболее нагруженной.

Из эпюры изгибающих моментов M определяем, что $M_{\max} = 3,45$ кН·м.

Из эпюры поперечных сил Q определяем, что $Q_{\max} = 3,45$ кН.

Условие прочности по нормальным напряжениям при изгибе [5]:

$$\sigma_{\max} = M_{\max}/W_y \leq [\sigma], \quad (3)$$

где W_y – момент сопротивления относительно оси Oy , см^3 ;

$[\sigma]$ – допустимое нормальное напряжение, МПа.

По ГОСТ Р 52857.1-2007 для углеродистых и низколегированных сталей $[\sigma] = 160$ МПа.

Из формулы (3) получим:

$$W_y \geq M_{\max}/[\sigma] = 21,56 .$$

Выберем тип сечения стойки. Среди всего сортамента профилей выбрана труба квадратного сечения, широко применяемая в строительстве при возведении колонн, вышек, опор. Являясь альтернативой балке, швеллеру, уголку, труба квадратного сечения обладает достаточной конструктивной жесткостью и прочностью при меньшей массе и материалоемкости. По сравнению с круглой трубой легко складывается и более компактна при перевозке. Из труб разных сечений можно делать телескопические раздвижные стойки.

Исходя из расчетного значения момента сопротивления по ГОСТ 30245-2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия» подбираем профиль – профильная квадратная труба 80×80×3.

Геометрические характеристики выбранного сечения (рис. 3)

Момент сопротивления относительно оси Ox : $W_y = 21,95$ см³.

Высота сечения: $h = 8$ см.

Ширина сечения: $b = 8$ см.

Толщина стенки: $t_s = 0,3$ см.

Средняя толщина полки: $t_f = 0,3$ см.

Статический момент полусечения относительно оси Oy : $S_y = 12,9$ см³.

Осевой момент инерции относительно оси Oy : $I_y = 87,81$ см⁴.

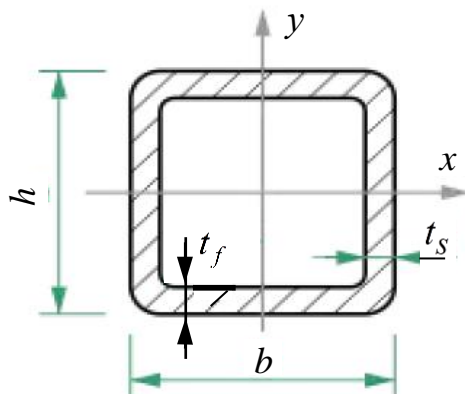


Рис. 3. Поперечное сечение профильной квадратной трубы

Вычислим нормальные и касательные напряжения выбранного сечения и сделаем проверку по третьей теории прочности, отображающей наступление текучести в материале.

Допустимое касательное напряжение [5]

$$[\tau] = [\sigma]/\sqrt{3} = 100 \text{ МПа.}$$

Нормальные напряжения σ_i , МПа, вычислим по формуле

$$\sigma_i = \frac{W_{max}}{I_y} x_i \leq [\sigma], \quad (4)$$

где y – расстояние от центра тяжести сечения до выбранной точки, см.

Касательные напряжения τ_i , МПа, вычислим по формуле

$$\tau_i = \frac{Q_{max} S_y^{отс}}{b(x) I_y} \leq [\tau], \quad (5)$$

где $S_y^{отс} = A^{отс} x_c$ – статический момент отсечённой части сечения выше выбранной точки относительно оси Y , см³;

x_c – координата центра тяжести отсечённой части сечения, относительно оси Y , см;

$A^{отс} = b t_f$ – площадь отсечённой части сечения, лежащей выше выбранной точки, см².

Выберем для проверки четыре точки в поперечном сечении:

1-я точка – с координатой $x_1 = h/2$, см, статический момент $S_y (x = h/2) = 0$ см³;

2-я точка – с координатой $x_2 = h/2 - t_s$, см;

3-я точка – с координатой $x_3 = h/2 - t_f$, см. Статический момент такой же, как и для второй точки;

4-я точка – в центре сечения, с координатой $x_4 = 0$ см.

Для 1-й точки: $x = h/2$. Из формулы (4) получим

$$\sigma_1 = \frac{M_{max}}{I_y} \frac{h}{2} = 157,16.$$

Статический момент отсечённой части $S_y = 0$, так как $A_{отс} = 0$. Из формулы (5) получим

$$\tau_1 = \frac{Q_{max} S_y^{отс}}{b(x) I_y} = 0.$$

Для 2-й точки: $x_2 = \frac{h}{2} - t_f$, см; из формулы (4) получим

$$\sigma_2 = \frac{M_{max}}{I_y} \left(\frac{h}{2} - t_f \right) = 145,37;$$

$$x_c = \frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} = 3,85;$$

$$S_y^{отс} = 9,24.$$

Из формулы (5) получим

$$\tau_2 = \frac{Q_{max} S_y^{отс}}{b(x) I_y} = 0,45.$$

Для 3-й точки: $x_3 = \frac{h}{2} - t_s$, см; из формулы (4) получим

$$\sigma_3 = \frac{M_{max}}{I_y} \left(\frac{h}{2} - t_s \right) = 145,37;$$

$$x_c = \frac{h}{2} - \frac{t_s}{2} = 3,85;$$

$$S_y^{отс} = 9,24.$$

Из формулы (5) получим

$$\tau_3 = \frac{Q_{max} S_y^{отс}}{b(x) I_y} = 12,1.$$

Для 4-й точки: $x_4 = 0$. Из формулы (4) получим

$$\sigma_4 = \frac{M_{max}}{I_y} \cdot 0 = 0.$$

Статический момент $S_y(x = 0)$ равен статическому моменту полусечения $S_y = 12,9 \text{ см}^3$. Из формулы (5) получим

$$\tau_4 = \frac{Q_{max} S_y^{отс}}{b(x) I_y} = 16,9.$$

По третьей теории прочности:

$$\sigma^{\text{пр}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma], \quad (6)$$

где $\sigma^{\text{пр}}$ – расчетное или приведенное напряжение, МПа.

Из формулы (6) получим

$$\sigma_1^{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau_1^2} = 157,16 < 160;$$

$$\sigma_2^{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_2^2 + 4\tau_2^2} = 145,37 < 160,$$

$$\sigma_3^{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_3^2 + 4\tau_3^2} = 147,05 < 160;$$

$$\sigma_4^{\text{пр}} = \sqrt{\sigma_4^2 + 4\tau_4^2} = 33,79 < 160.$$

Условия проверок по нормальным и касательным напряжениям выполняются, т.е. расчетные напряжения менее допустимых. Проведенная проверка подтверждает выбор – профильная квадратная труба 80×80×3.

Вывод. В результате аналитических исследований и проведенных расчетов определены основные параметры разрабатываемых каркасных опалубок и геометрические характеристики сечения профиля несущей конструкции. Эти данные помогут рассчитать конструктивные параметры быстровозводимых каркасных опалубок многоразового использования для их применения при возведении взрывоустойчивых перемычек в горных выработках во время проведения аварийно-спасательных работ.

Список литературы / References

1. Смоланов С.Н., Голинько В.И., Мартиненко М.С. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 261 с.

Smolanov, S.N., Golin'ko, V.I., Martinenko, M.S. *Izolyatsionnyye, ventilyatsionnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Isolation, ventilation and explosion-stable stoppings]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye Publ., 2002, 261 p.

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

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

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

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

4. Башта Т.М., Руднев С.С. Гидравлика, гидромашины и гидропривод. – М.: Машиностроение, 1982. – 243 с.

Bashta, T.M., Rudnev, S.S. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivod* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982, 243 p.

5. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Соппротивление материалов. – 7-е изд. – М.: Высш. шк., 2009. – 560 с.

Aleksandrov, A.V., Potapov, V.D., Derzhavin, B.P. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. 7th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009, 560 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 31.05.2016

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

Vladislav Anatol'yevich Chernyshyev, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate;

e-mail: niigd.osmas-3@mail.ru;

Eleonora Gennadiyevna Chaykovskaya, advanced engineer, e-mail: niigd.osmas-4@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-12-00

DETERMINATION OF PRINCIPAL PARAMETERS OF REUSABLE FRAME SHEATHINGS FOR ERECTION OF ISOLATING STRUCTURES

Purpose. To determine the principal parameters of the frame sheathings being developed and geometrical characteristics of the section of the bearing structure profile.

Methods. Analytical investigations and calculations to determine the parameters.

Results. The type of the profile of posts of the frame sheathings being developed and geometrical characteristics of its section are determined; the normal and shearing stresses of the section chosen are determined; the design stresses are estimated.

Practical value. The results received permit to calculate the design parameters of the rapidly erected reusable frame sheathings for their application by the building of explosion-stable stoppings in mine workings of mines during carrying-out the emergency-and-rescue operations what will significantly improve the effectiveness of carrying-out the isolation works.

Keywords: mine; fire; stopping; sheathing; post.

УДК 614.894.7

Руслан Сергеевич Плетенецкий, нач. отд.; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-73

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПАТРОНА

Цель. Исследование процессов регенерации в изолирующем дыхательном аппарате с химически связанным кислородом для повышения его эффективности.

Методика. Экспериментальные методы исследований массообменных процессов в дыхательном аппарате на лабораторных стендах.

Результаты. Проведенные исследования показали возможность увеличения времени защитного действия дыхательного аппарата с химически связанным кислородом.

Новизна. Экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности ресурса регенеративного продукта в изолирующем дыхательном аппарате методом равномерного распределения газовой воздушной смеси.

Практическая значимость. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют увеличить ресурс регенеративного патрона при разработке конструкций новых дыхательных аппаратов.

Ключевые слова: *изолирующие аппараты; защита органов дыхания; респиратор; химически связанный кислород; надпероксид калия; регенеративный патрон; регенерация; эффективность; ресурс.*

Постановка проблемы. При протекании регенеративного процесса в изолирующем дыхательном аппарате, снаряженном кислородсодержащим веществом на основе надпероксида калия KO_2 , использование регенеративного потенциала химического продукта происходит не полностью.

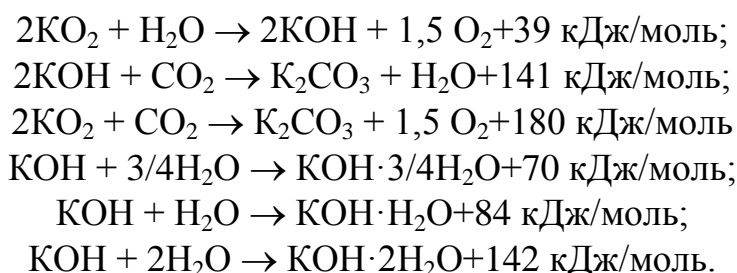
Это обусловлено следующими факторами:

- при реакции с парами воды и диоксидом углерода надпероксид калия имеет тенденцию к образованию расплава на поверхности гранул, который затрудняет диффузию газа к поверхности непрореагировавшего вещества;
- плавление гранул вызывает спекание размещенной в патроне шихты регенеративного продукта, что снижает проницаемость слоя и уменьшает поверхность контакта «газ-твердое тело»;
- обеспечение необходимой прочности гранул требует увеличения давления прессования при производстве, что, в свою очередь, приводит к увеличению плотности гранул и снижению пористости и соответственно к снижению диффузии в гранулах.

В результате эффективность использования регенеративного продукта, по данным его разработчика, снижается и на практике не превышает 50...70 % [1]. Однако, внося изменения в конструкцию регенеративного патрона, можно более полно использовать регенеративный потенциал химического продукта.

Анализ последних исследований. Существуют исследования, согласно которым форма регенеративного патрона напрямую не влияет на рабочий процесс дыхательного аппарата и не может привести к увеличению динамической активности кислородсодержащего продукта. Также считается, что, если сопротивление фильтрации изотропно, время защитного действия определяется только режимом дыхания и объемом патрона [2].

Однако подобная ситуация предполагается лишь в математических моделях, изотропное сопротивление патронов которых обеспечивает равновероятную сорбцию по всем направлениям. К тому же подобная модель учитывает лишь конечный результат реакции, не принимая во внимание, что увеличение скорости проскока CO_2 на вдохе может привести к окончанию времени защитного действия аппарата до истощения им своего полного регенеративного потенциала. В реальных условиях реакция поглощения диоксида углерода и влаги и выделения кислорода протекает неоднозначно и зависит от температуры сорбента, количества поступающей в патрон влаги и т.д. Поэтому в регенеративном патроне имеет место параллельное протекание нескольких химических реакций, вклад каждой из которых в процесс регенерации определяют конкретные условия. Основные из этих реакций следующие:



Кроме указанных, возможно протекание реакций с образованием бикарбонатов калия и гидратов карбоната калия.

Таким образом, на сорбцию и как следствие на достижение предельных значений CO_2 на вдохе влияет форма патрона, которая в реальных условиях не обеспечивает изотропности сопротивления, и размер вклада каждой из протекающих реакций в процесс регенерации.

Цель исследований. Цель исследований процессов регенерации в изолирующем дыхательном аппарате с химически связанным кислородом – повышение эффективности регенеративного продукта.

Результаты исследований. В ходе исследований возможности создания модульного дыхательного аппарата с химически связанным кислородом разработана принципиальная схема аппарата, предусматривавшая возможность изменения его технических характеристик путем применения патронов с различным временем защитного действия: 1, 2 и 4 ч.

При исследованиях выполнен поиск оптимальной конструкции регенеративного патрона с временем защитного действия 1 ч. Поскольку ранее

респираторы разрабатывали согласно ДСТУ 3856 «Респираторы регенеративные» (который регламентирует время защитного действия данного типа аппарата 240 и 120 мин), регенеративные патроны для респиратора с временем защитного действия 1 ч не создавали. Согласно проведенным ранее исследованиям, масса регенеративного продукта, равная 1 кг, является минимальной, при которой возможно применение круговой схемы дыхания [4]. Поэтому проведены экспериментальные исследования нескольких вариантов регенеративного патрона 1-часового действия, чтобы добиться максимальной отработки продукта (см. таблицу).

Результаты испытаний регенеративных патронов различной конструкции

| Тип регенеративного патрона | Масса регенеративного продукта, г | Время защитного действия, мин |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Вариант № 1 | 1080 | 60 |
| Вариант № 2 | 1100 | 83 |
| Вариант № 3 | 1200 | 80 |
| Вариант № 4 | 1197 | 53 |
| Вариант № 5 | 1140 | 73 |
| Вариант № 6 | 1150 | 101 |

В экспериментах применяли регенеративные патроны, которые отличались от исходных (2-часового действия) лишь высотой обечайки, затем, ввиду неполной отработки регенеративного продукта, их конструкцию изменили. Так, на внутреннюю поверхность крышки был приварен металлический бортик (вариант конструкции № 4), который должен заставить газоздушный поток огибать бортик, тем самым препятствуя проскоку диоксида углерода вдоль крышки патрона и способствуя более равномерному его распределению в толще регенеративного продукта. Поскольку данная конструкция всё же не обеспечила полной отработки продукта, было принято решение создать дополнительные перфорации на обечайке патрона и на линии перехода обечайки в дно. Последнюю конструкцию патрона испытывали с различными вариантами крышек (с дополнительным бортиком на внутренней поверхности – вариант № 5; и с ровной внутренней поверхностью, которая во избежание проскока диоксида углерода была проложена слоем стекловолокна – вариант № 6).

Максимального времени защитного действия удалось достичь в конструкции патрона, которая ограничивала проскок углекислоты вдоль крышки благодаря использованию стекловолокна и с дополнительными перфорациями во внутренней обечайке (вариант № 6), что обеспечивало более изотропное сопротивление сорбента и, как следствие, равномерное распределение газоздушного потока в продукте (рис. 1).

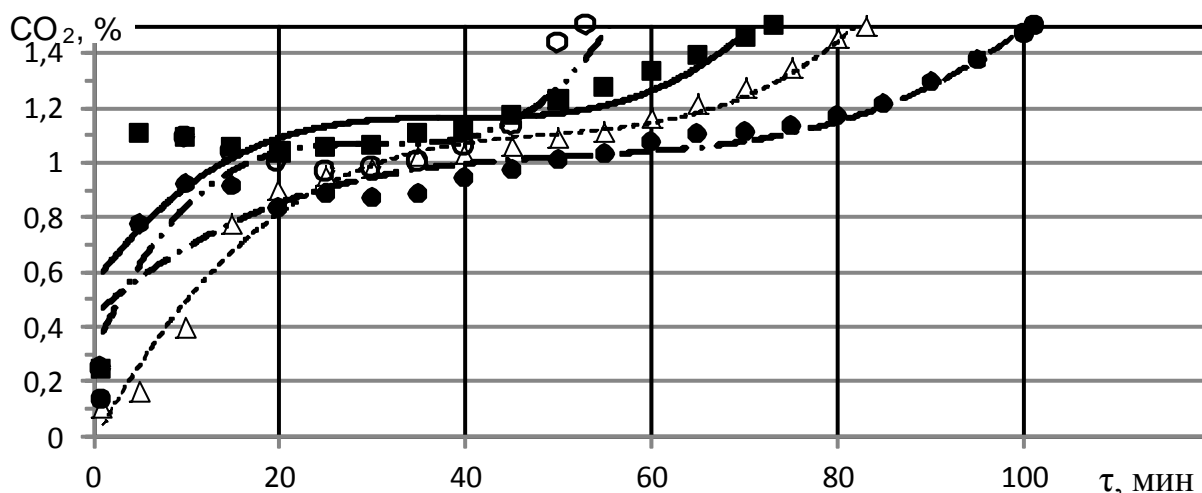


Рис. 1. Объемная доля диоксида углерода в регенеративных патронах с временем защитного действия 1 ч:

- — патрон с бортиком на внутренней поверхности крышки;
- — патрон с бортиком на внутренней поверхности крышки и дополнительной перфорацией;
- Δ— — патрон без бортика со стекловолокном;
- — патрон без бортика со стекловолокном и дополнительной перфорацией

Анализ результатов исследований показывает, что наименьшая скорость нарастания объемной доли диоксида углерода во вдыхаемом воздухе наблюдалась в патронах, в которых использовали стеклоткань для предотвращения проскока диоксида углерода вдоль крышки (варианты № 3 и 6). Одновременно с этим наибольшее использование регенеративного потенциала продукта отмечено в патронах с дополнительной перфорацией обечайки (варианты № 5 и 6). В патронах без дополнительной перфорации регенеративный продукт обрабатывал в основном вокруг центрального патрубка на длину около $2/3$ радиуса патрона, оставшаяся часть продукта, которая находилась у периферии (у обечайки), в реакциях регенерации не участвовала.

Также в зависимости от площади лобового слоя регенеративного продукта в патронах с различным временем защитного действия отличались начальные концентрации диоксида углерода и кривые их нарастания (рис. 2). Это было обусловлено, помимо различий в массе регенеративного продукта, еще тем, что на единицу площади лобового слоя приходился больший относительный объем диоксида углерода.

Таким образом, установлено, что конструкция регенеративного патрона влияет на скорость нарастания и начальные значения диоксида углерода во вдыхаемом воздухе, что способно изменить степень использования регенеративного потенциала продукта.

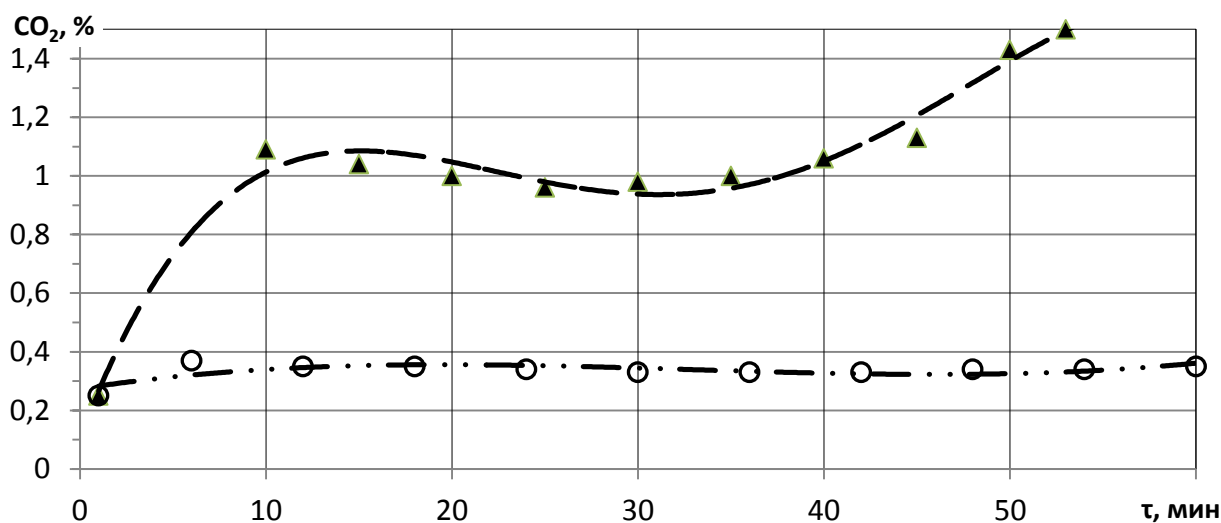


Рис. 2. Объемная доля CO₂ во вдыхаемом воздухе в регенеративных патронах с временем защитного действия 1 и 2 ч:

—○— — патрон с временем защитного действия 2 ч;
 —▲— — патрон с временем защитного действия 1 ч

Выводы. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили повысить эффективность регенеративного патрона за счет более полного использования потенциала сорбента.

Список литературы / References

1. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление / Н.Ф.Гладышев, Т.В.Гладышева, С.И. Дворецкий и др. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 156 с.

Gladyshev, N.F., Gladysheva, T.V., Dvoretzkiy, S.I. etc. *Regenerativnyye produkty novogo pokoleniya: tekhnologiya i apparaturnoye oformleniye* [Regenerative products of the new generation: technology and instrument figuration]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2007, 156 p.

2. Єхилевський С.Г. Підвищення ресурсу дихальних апаратів на хімічно пов'язаному кисні. – Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Дніпропетровськ, 2002. – 35 с.

Yekhylevs'kyi, S.G. *Pidvyshchennia resursu dykhal'nykh aparativ na khimichno pov'yazanomu kysni*. Diss. dokt. tech. sci. [Increase of the resource of breathing apparatus, chemical oxygen type. Dr. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2002, 35 p.

3. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования / С.В. Гудков, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин, В.П. Таров. – М.: Машиностроение, 2008. – 188 с.

Gudkov, S.V., Dvoretzkiy, S.I., Putin, S.B., Tarov, V.P. *Izoliruyushchiye dykhatel'nyye apparaty i osnovy ikh proyektirovaniya* [Self-contained breathing apparatus and grounds of their designing]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008, 188 p.

4. Шевченко Ю.А., Инденбаум Т.Е. Сравнительный анализ круговой и маятниковой схем циркуляции воздуха в регенеративных дыхательных аппаратах // Вопросы защиты органов дыхания в горноспасательном деле. – М., 1970. – С. 80 – 85.

Shevchenko, Yu.A., Indenbaum, T.Ye. *Sravnitel'nyy analiz krugovoy i mayatnikovoy skhem tsirkulyatsii vozdukha v regenerativnykh dykhatel'nykh apparatakh* [The comparative analyses of the closed-circuit type and pendulum type of breathing schemes in the regenerative breathing apparatus]. *Voprosy zashchity organov dykhaniya v gornospatel'nom dele* [Problems of protection of breathing organs in the mine-rescue work]. Moscow, 1970, pp. 80 – 85.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 14.04.2016

Ruslan Sergeyeovich Pletenetskiy, head of department; e-mail: zoloto-rusland@yandex.ru;
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-39-73

INCREASE OF EFFECTIVENESS OF THE REGENERATIVE RESOURCE OF THE OXYGEN-CONTAINING PRODUCT

Purpose. Investigation of regeneration processes in the self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type, to increase its effectiveness.

Methods. Experimental methods of investigations of the mass exchanged processes in the breathing apparatus at laboratory test benches.

Results. The investigations carried out showed the possibility of increase of the duration of the self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type.

Novelty. The possibility of increase of the effectiveness of the resource of the regenerative product in the self-contained breathing apparatus by means of the uniform distribution of the gas-air flow was confirmed by experiment.

Practical value. The results of the experimental investigations received permit to increase the resource of the regenerative cartridge by development of the constructions of new breathing apparatus.

Keywords: *self-contained apparatus; protection of breathing organs; breathing apparatus; chemical oxygen; potassium superoxide; regenerative cartridge; regeneration; effectiveness; resource.*

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 раньше 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 15 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; имена, отчества и фамилии авторов (не более четырех), сведения об ученой степени, должности, адрес электронной почты; наименование организации, почтовый адрес её, номер телефона; 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 в аннотации 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. Рекомендуется, 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. Статья на бумажном носителе – с визой начальника отдела.

Заявление о соблюдении редакционной этики

Редакционная коллегия журнала определяет для себя следующие правила профессиональной этики.

Для авторов

1. Соблюдать нормы авторского права.
2. Фальсификацию данных, плагиат рассматривать как нарушение кодекса чести.
3. Не представлять в редакцию ранее опубликованные работы.
4. Обеспечивать возможность проверки полученных результатов другими исследователями путем понятного изложения аргументации поставленного вопроса, а также методов (способов, подходов).

Для редакторов

1. Ориентироваться на интересы читателей и авторов.
2. Обеспечивать высокое качество редактирования, оформления и представления публикуемых материалов.
3. Содействовать свободному выражению мнений на страницах журнала.
4. Следовать принципам открытости, научной честности и независимости по отношению к авторам, рецензентам и читательской аудитории.

Для рецензентов

1. Выполнять принятые на себя обязательства по рецензированию рукописей добросовестно, в установленные сроки и только в пределах профессиональной компетенции.
2. При написании рецензии следовать принципам объективности, конструктивности, непредубежденности и корректности.
3. Соблюдать конфиденциальность рецензии и не допускать возможности использования информации, полученной в ходе рецензирования, в каких-либо целях (за исключением целей, связанных с публикацией).
4. Избегать любых возможных конфликтов интересов.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2016, № 3 (53)

На русском и английском языках

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» МЧС ДНР

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 31.08.2016.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 311-69-52; 311-31-47

Объем 4,8 Мб

E-mail: niigd@mail.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата публикации выпуска 7 сентября 2016 г.