

УДК [622.822.7:614.842.611]–519

А.А. Пилипенко¹,
И.Ф. Дикенштейн¹,
С.А. Алексеенко², канд. техн. наук, доц.

1 – Научно-исследовательский институт горноспасательного дела и пожарной безопасности, г. Донецк, Украина, e-mail: niigd@ukrpost.ua

2 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: alekseenkoso@mail.ru

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ОГНЕТУШАЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОРОШКА В ПРИЗАБОЙНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ЭЖЕКЦИОННО-РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СХЕМЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ

А.А. Pilipenko¹,
I.F. Dikenshteyn¹,
S.A. Alekseyenko², Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

1 – Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work and Fire Safety “Respirator”, Donetsk, Ukraine, e-mail: niigd@ukrpost.ua

2 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: alekseenkoso@mail.ru

PROCESS OF CREATION OF THE EXTINGUISHING CONCENTRATION OF DRY POWDER IN MINING FACE SPACE WITH EJECTION-AND-RE-CIRCULATION VENTILATION SCHEME

Цель. Определение условий для эффективного тушения пожара в призабойном пространстве тупиковой выработки при эжекционно-рециркуляционной схеме проветривания.

Методика. Теоретический метод исследования динамики турбулентных струй, в частности воздушно-порошковой смеси, с учетом ранее полученных экспериментальных данных.

Результаты. Результатами исследований являются: определение места расположения автоматического порошкового огнетушителя в призабойном пространстве тупиковой выработки; разработка математической модели образования огнетушащей концентрации порошка в тупиковом забое при эжекционно-рециркуляционной схеме проветривания; время образования огнетушащей концентрации порошка при использовании эжекционной насадки на вентиляционном трубопроводе сокращается на 10–15% по сравнению с аналогичным временем при ее отсутствии.

Научная новизна. Научная новизна исследований состоит в том, что впервые раскрыта закономерность образования огнетушащей концентрации порошка в тупиковой забое при эжекционно-рециркуляционной схеме проветривания на основании решения дифференциального уравнения баланса масс порошка с учетом их поступления в призабойное пространство, вынесения из него воздушным потоком, осаждения и прилипания на поверхности выработки, а также ее геометрических параметров.

Практическая значимость. Результаты исследований использованы при выборе типа и определении параметров автоматического порошкового огнетушителя, создание и внедрение которого позволит сократить затраты на ведение аварийно-спасательных работ, ущерб шахт, а, следовательно, увеличить добычу угля.

Ключевые слова: тупиковая выработка, призабойное пространство, пожар, порошок, огнетушащая концентрация, эжекционная насадка, вентиляционный трубопровод

Проблема и ее связь с практическими задачами. Особую пожарную опасность представляют тупиковые выработки газообильных шахт, имеющие геологические нарушения, пустоты за крепью, купола в

призабойной зоне, суфляры. Воспламенение метана в них не сразу обнаруживается из-за отсутствия горнорабочих в забое после ведения взрывных работ, пожар активизируется и его ликвидация затруднительна из-за высокой температуры и задымленности. Применяемые в настоящее время средства локализации взрывов и по-

давления всплеск метана при взрывных работах, основанные на распылении ингибирующих составов (порошка, воды, пены), экономически невыгодны и недостаточно надежны, так как их датчики не различают взрыв и пожар, реагируя на любую вспышку.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности защиты тупиковых выработок является создание легко переносимых автономных автоматических устройств, которые подавали бы порошок непосредственно в призабойное пространство. Эти устройства должны размещаться на определенном расстоянии от забоя, с целью сохранения их от осколков горной массы при взрывных работах, и находиться в постоянной готовности к срабатыванию в случае возникновения пожара.

Поскольку задание определить месторасположение возможного очага возгорания в призабойном

пространстве и, соответственно, сориентировать направление порошковой струи невозможно, необходимо добиться равномерного распыления порошка по всему объему призабойного пространства с огнетушащей концентрацией.

Анализ последних исследований и публикаций. Ранее, в 80-х годах прошлого столетия, предложен следующий способ подачи порошка из автоматического огнетушителя.

Огнетушитель должен располагаться в тупиковой выработке таким образом, чтобы при его срабатывании порошковая струя попадала бы в поток воздуха, выходящий из вентиляционного трубопровода. При этом происходит дополнительное распыление порошка, что обеспечивает создание огнетушащей концентрации и объемное тушение пожара в забое (рис. 1).

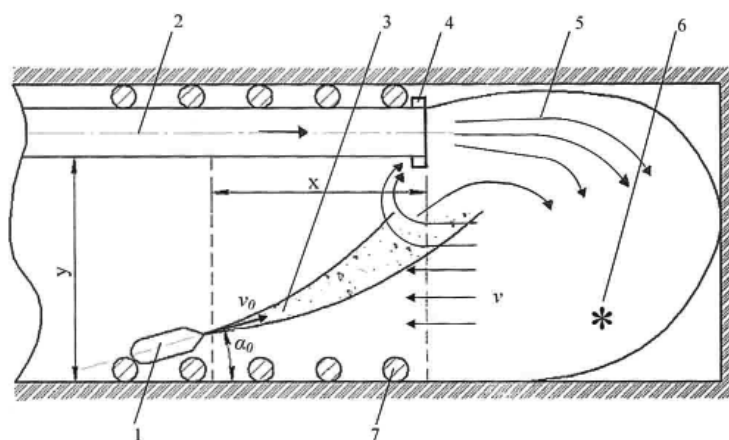


Рис. 1. Схема расположения огнетушителя в тупиковом забое: 1 – огнетушитель; 2 – вентиляционный трубопровод; 3 – струя порошка; 4 – эжекционная насадка; 5 – вентиляционный поток; 6 – очаг пожара; 7 – стойка

Для случая нагнетательного проветривания тупиковой выработки определены условия создания огнетушащей концентрации в призабойном пространстве, определены интенсивность и необходимое время подачи порошка для ликвидации очага пожара.

Цель работы. Определение условий для эффективного тушения пожара в призабойном пространстве тупиковой выработки при эжекционно-рециркуляционной схеме проветривания.

При решении этой задачи считаем, что режим течения воздушно-порошковой смеси в призабойном пространстве турбулентный, а тонкодисперсный порошок равномерно распределяется по объему.

Изложение основного материала. Призабойное пространство тупиковой выработки при нагнетательном способе проветривается свободной струей воздуха. Рядом экспериментальных работ установлено, что закономерности поведения свободной струи в ограниченном пространстве, в том числе и в призабойном пространстве тупиковой выработки, существенно отличаются от закономерностей, полученных в работе [1]. Большое влияние на струю оказывают окружающие стенки выработки, плоскость забоя и высоко-турбулентное движение воздуха. За счет этого струя меняет характер поведения и обладает сле-

дующими отличительными особенностями по отношению к свободной струе, истекающей в неограниченное пространство.

1. Выходящая из трубопровода струя воздуха до некоторой плоскости расширяется, затем расширение ее прекращается, границы становятся почти параллельными стенкам выработки.

2. Углы расширения струи оказываются несимметричными в различных продольных плоскостях сечения.

3. Струя имеет тенденцию „налипать“ на ближайшую ограждающую поверхность. До встречи с последней струя расширяется. Дальше плоскости встречи границы ее остаются почти параллельными стенкам выработки. Поперечное сечение сжимается и из круглого переходит в эллиптическое.

Для увеличения количества воздуха, циркулирующего в призабойной части выработки, на конце нагнетательного вентиляционного трубопровода монтируется эжекционная насадка. За счет эжектирующего действия струи, выходящей из вентиляционного трубопровода, часть воздуха, поступающего из забоя, подсасывается в насадку после смешивания с чистым воздухом и вновь направляется в призабойную часть выработки.

Рециркуляционный способ проветривания широко применяется в зарубежной практике, например, в ЮАР, Великобритании. Отечественный опыт невелик и, в основном, накоплен в горно-рудничной промышленности.

Рассмотрим процесс создания огнетушащей концентрации порошка в призабойном пространстве для такой схемы проветривания выработки.

Количество порошка G_1 , кг/с, которое вносится воздухом, поступающим из вентиляционного трубопровода без эжекции, равно (количеством воздуха, поступающего из огнетушащего устройства вместе с порошком, пренебрегаем)

$$G_1 = Q \mu_0, \quad (1)$$

где Q – расход воздуха из вентиляционного трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$; μ_0 – концентрация воздушно-порошковой смеси у выхода из вентиляционного трубопровода, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Этой же струей часть порошка выносится из призабойного пространства. Вынос порошка производится ядром постоянной массы струи, куда частицы порошка попадают за счет турбулентной диффузии. Если концентрация смеси в призабойном пространстве в данный момент времени равна $\mu(t)$, то струей воздуха в единицу времени выносится количество порошка, G_2 , кг/с, равное

$$G_2 = Q \mu k_1, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент турбулентной диффузии двухфазной воздушно-порошковой струи.

Коэффициент турбулентной диффузии равен

$$k_1 = k + (1 - k)\mu_0 / \mu. \quad (3)$$

Здесь k – коэффициент турбулентной диффузии свободной воздушной струи.

С учетом (1, 2) и эжектирования воздуха общее количество порошка, поступающего в единицу времени в призабойное пространство тупиковой выработки, составляет

$$G_1^{об} = Q \mu_0 + \delta_y \cdot Q \cdot \mu \cdot k_1, \quad (4)$$

где $\delta_y = Q_y / Q$ – коэффициент эжекции; Q_y – объем эжектируемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

Концентрация смеси в призабойном пространстве уменьшается также за счет осаждения и налипания частиц порошка на поверхности выработки.

Количество порошка G_3 , кг/с, осаждающегося на почве, стенках и кровле выработки в единицу времени, определяется выражением

$$G_3 = S_B \mu v M, \quad (5)$$

где S_B – площадь поверхности призабойного пространства выработки, м^2 ; μ – средняя концентрация порошка в выработке в данный момент времени, $\text{кг}/\text{м}^3$; M – вероятность прилипания частицы порошка; v – средняя скорость набегания частиц порошка на поверхность выработки, $\text{м}/\text{с}$.

Так как скорость v пропорциональна средней скорости потока, то выражение (5) можно представить в следующем виде

$$G_3 = \varphi S_B \mu v_0 M \quad (6)$$

или

$$G_3 = \varphi \frac{S_B}{S_0} \mu Q M, \quad (7)$$

где $\varphi = v/v_0$ – отношение средней скорости набегания потока на стенку к средней скорости потока в начальном сечении струи; $S_0 = (\pi d^2)/4$ – площадь выходного сечения струи, м^2 ; d – диаметр вентиляционного трубопровода, м .

Составим уравнение баланса масс. За время dt в призабойное пространство поступает количество порошка, равное $G_1^{об} dt$, а из него выносится и оседает $(G_2 + G_3) dt$. Предположим, что за это время в объеме призабойного пространства создается избыток порошка, равный $V d\mu$, то есть

$$V d\mu = (G_1^{об} - G_2 - G_3) dt, \quad (8)$$

где $V = S_B \cdot l$ – объем призабойного пространства, м^3 ; l – длина призабойного пространства (от конца вентиляционного трубопровода до груди забоя), м .

Решение уравнения (8) позволит определить минимальную интенсивность и время подачи порошка в тупиковую выработку, необходимые для создания огнетушителей концентрации смеси. Используя выражение (3)–(7), представим уравнение (8) в виде

$$\left[Q \mu_c + \delta_y Q \cdot \mu \cdot k_1 - Q \cdot \mu \cdot k_1 - \varphi \frac{S_B}{S_0} \mu \cdot Q \right] dt = V d\mu$$

или

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{Q}{V} \left\{ \left[\mu_0 \left(\delta_y + k(1 - \delta_y) \right) - \mu \left[k(1 - \delta) + \varphi \frac{S_B}{S_0} \mu \right] \right] \right\}. \quad (9)$$

Определим некоторые величины, входящие в уравнение (9).

При столкновении воздушно-порошковой струи с ограждающими тупиковую выработку поверхностями (кровлей, боками, почвой, грудью забоя) происходят два физических процесса:

1) частицы порошка ударяются о поверхность, скользят на ней, в зависимости от угла падения, и снова возвращаются в поток;

2) частицы оседают на поверхности, прилипают к ней и не возвращаются в поток.

В работе [2] предлагаются следующие условия прилипания

$$v \leq \frac{2}{Kr} \sqrt{\frac{3R_a F_a}{\pi r \rho}}, \quad (10)$$

где v – скорость набегания воздушно-порошковой струи на отражающую поверхность, $\text{м}/\text{с}$; K – коэффициент восстановления скорости частицы после удара о поверхность; r – средний радиус частиц порош-

ка, м; ρ – плотность материала порошка, кг/м^3 ; R_a – радиус действия сил адгезии, м; F_a – сила адгезии, Н.

Согласно ранее полученным данным, $R_a \sim 1 \cdot 10^{-6}$ м, $F_a \sim 1 \cdot 10^{-8}$ Н, а для серийно выпускаемых огнетушителей порошков ($r \sim 7 \cdot 10^{-5}$ м, $\rho \sim 1 \cdot 10^3$ кг/м^3) величина $k \approx 0.1$.

Тогда условие (10) принимает вид $v \leq 1.05$,

а величина M , м/с

$$M = \begin{cases} 0, & \text{если } v > 1,05 \text{ м/с} \\ 1, & \text{если } v \leq 1,05 \text{ м/с} \end{cases} \quad (11)$$

Для призабойного пространства получено изменение скорости движения вентиляционной струи в призабойном пространстве тупиковой выработки (рис. 2).



Рис. 2. Изменение скорости движения вентиляционной струи в горизонтальной плоскости по мере удаления от конца трубопровода (расположение трубопровода в центре выработки на высоте 1,22 м от почвы, между концом трубопровода и забоем 8,08 м)

Вблизи забоя $v = 0,7 \div 0,8$ м/с, т.е. условие (11) выполняется, значит можно считать, что $M=1$.

Осевая скорость в круглой свободной струе определяется согласно [1] выражения

$$v/v_0 = 0,96/(a/R_0 + 0,29),$$

где a – коэффициент, выражающий влияние структуры потока на угол расширения струи, величина которого определяется экспериментально и изменяется от 0,0066 для потоков с малой турбулентностью до 0,27 для потоков за турбулизирующей решеткой; R_0 – радиус начального сечения струи, м.

Принимая во внимание значительное расстояние вентиляционных труб от груди забоя, большую турбулентность потока, а также тот факт, что $l/d > 10$, имеем

$$v \approx 0,48v_0d / \alpha \cdot l.$$

Отсюда $\phi \approx 0,48d / \alpha \cdot l.$

Тогда решение уравнения (9) имеет вид

$$\mu(t) = \mu_0 \frac{K(1-\delta_s) + \delta_s}{K_H} \left(1 - e^{-\frac{QK_H t}{S_B l}} \right), \quad (12)$$

где
$$K_H = K(1-\delta_s) + \frac{1,92S_B}{\pi\alpha \cdot ld} \quad (13)$$

Из выражения (12) с учетом (13) получим

$$t = -\frac{S_B l}{QK_H} \ln \left(1 - \frac{K_H \mu}{[K(1-\delta_s) + \delta_s] \mu_0} \right). \quad (14)$$

Время, за которое концентрация воздушно-порошковой смеси в призабойном пространстве выработки станет огнетушащей, определяется из выражения

$$\tau = -\frac{S_B l}{QK_H} \ln \left(1 - \frac{K_H \mu_{огн}}{[K(1-\delta_s) + \delta_s] \mu_0} \right). \quad (15)$$

Заменяв логарифмическую функцию (14), уравнение (15) примет вид

$$\tau = -\frac{S_B l}{QK_H} \sqrt[3]{1 - \frac{K_H \mu_{огн}}{[K(1-\delta_s) + \delta_s] \mu_0}}. \quad (16)$$

Время создания огнетушащей концентрации без эжекционной насадки ($\delta_s = 0$), $\tau_{б.н}$, с, равно

$$\tau_{б.н} = \frac{S_B l}{QK_H} \sqrt[3]{1 - \frac{K_H^1 \mu_{огн}}{K \mu_0}}, \quad (17)$$

где
$$K_H^1 = K + \frac{1,92S_B}{\pi\alpha \cdot ld} \quad (18)$$

Сравнивая (16) и (17) с учетом (18), получим
$$\frac{\tau}{\tau_{б.н}} = \sqrt[3]{\frac{1 - \frac{K_H \mu_{огн}}{[K(1-\delta_s) + \delta_s] \mu_0}}{1 - \frac{K_H^1 \mu_{огн}}{K \mu_0}}} = \sqrt[3]{\frac{1 - \frac{[K(1-\delta_s) + \frac{1,92S_B}{\pi\alpha \cdot ld}] \mu_{огн}}{[K(1-\delta_s) + \delta_s] \mu_0}}{1 - \frac{(K + \frac{1,92S_B}{\pi\alpha \cdot ld}) \mu_{огн}}{K \mu_0}}}. \quad (19)$$

Результаты исследований противопылевых вентиляционных режимов на рудниках показывают, что $K = 0,3 \div 0,8$, $\delta_3 = 0,4 \div 1,0$. Принимая средние их значения $K = 0,6$, $\delta_3 = 0,8$, получим

$$\frac{\tau}{\tau_{б.н}} = 0,87.$$

Таким образом, время создания огнетушащей концентрации, согласно (19), при использовании эжекционной насадки с вышеприведенными исходными данными и объеме горной выработке 100 м^3 сокращается на 10–15%.

Выводы:

1. Для определения огнетушащей концентрации порошка в призабойном пространстве тупиковой выработки, проветриваемой эжекционно-рециркуляционным способом, получено и решено уравнение баланса масс с учетом поступающего в призабойное пространство, выносимого из него, осаждаемого и прилипающего на поверхности выработки порошка.

2. Время создания огнетушащей концентрации порошка в призабойном пространстве объемом 100 м^3 , в случае использования эжекционной насадки, сокращается на 10–15% по сравнению с аналогичным временем при отсутствии насадки.

Список литературы / References

- Соболев В.А. Интенсификация проветривания тупиковых выработок / В.А. Соболев, Э.М. Шейман, Г.К. Мартенюк // Уголь – М., 1997. – №12. – С. 59–60.
Sobolev, V.A., Sheyman, E.M. and Martenyuk, G.K. (1997), "Intensification of ventilation of blind drifts", *Ugol*, Moscow, no. 12, pp. 59–60.
- Сериков В.В. Автоматические быстродействующие системы пожарной защиты / В.В. Сериков, В.А. Карпенко, И.В. Сериков. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1996. – 260 с.
Serikov, V.V., Karpenko, V.A. and Serikov, I.V. (1996), *Avtomaticheskiye bystrodeystvuyushchiye sistemy pozharной zashchity* [Automatic High-Performance Fire Protection Systems], SevGTU, Sevastopol, Ukraine.

Мета. Визначення умов для ефективного гасіння пожежі в призабойному просторі тупикової виробки при ежекційно-рециркуляційній схемі провітрювання.

Методика. Теоретичний метод досліджень динаміки турбулентних струменів, зокрема повітряно-порошкових сумішей, з урахуванням раніше отриманих експериментальних даних.

Результати. Результатами досліджень є: визначення місця розташування автоматичного порошкового вогнегасника в призабойному просторі тупикової виробки; розробка математичної моделі утворення вогнегасної концентрації порошку в тупиковому заборі при ежекційно-рециркуляційній схемі провітрювання; час утворення вогнегасної концентрації

порошку при використанні ежекційної насадки на вентиляційному трубопроводі зменшується на 10–15% порівняно з аналогічним часом при її відсутності.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в тому, що вперше розкрито закономірність утворення вогнегасної концентрації порошку в тупиковому заборі при ежекційно-рециркуляційній схемі провітрювання на підставі рішення диференційного рівняння балансу мас порошку, що поступають у призабойний простір, виносяться із нього повітряним потоком, осідають і прилипають на поверхні виробки, а також її геометричних параметрів.

Практична значимість. Результати досліджень використані при виборі типу й визначенні параметрів автоматичного порошкового вогнегасника, створення та використання якого дозволить скоротити витрати на ведення аварійно-рятувальних робіт, збитки шахт, а, відповідно, збільшити видобуток вугілля.

Ключові слова: тупикова виробка, призабойний простір, пожежа, порошок, вогнегасна концентрація, ежекційна насадка, вентиляційний трубопровід

Purpose. Determination of conditions for the effective fire extinguishing in the face area of the blind drift with the ejection-and-recirculation ventilation scheme.

Methodology. The theoretical method of investigation of dynamics of turbulent flows, in particular of air-and-powder mixtures, taking into account the experimental data received before.

Findings. The optimal location of the automatic dry powder fire extinguisher in the face area of the blind drift has been determined; the mathematical model of formation of the fire extinguishing dry powder concentration in the dead end of the working with the ejection-and-recirculation ventilation scheme has been designed; time of formation of the fire extinguishing dry powder concentration reduces by 10–15% by the use of the ejection nozzle on the ventilation pipeline.

Originality. The laws of formation of the fire extinguishing dry powder concentration in the dead end with the ejection-and-recirculation ventilation scheme have been established for the first time on the basis of the solution of the differential balance equation of the dry powder masses taking into account their arrival into the face area with the air flow and removal from it, precipitation and adhesion on the surface of the mine working, as well as taking into account geometrical parameters of the working.

Practical value. The research results have been used for selection of the most efficient type and determination of the parameters of the automatic fire extinguisher, in order to reduce expenditures on the rescue operations, lowering the damages, and increasing the coal output, therefore.

Keywords: blind drift, face area, fire, dry powder, fire extinguishing concentration, ejection nozzle, ventilation pipeline

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Голінком. Дата надходження рукопису 14.02.12.