

Ю.Ф. Булгаков, И.Ф. Дикенштейн, Д.В. Докукин

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Анализ аварийности показывает, что в течение последних 5 лет количество пожаров в тупиковых горных выработках остается на прежнем уровне и составляет примерно 12...13 % от общего количества подземных пожаров по Минуглепрому Украины.

Активное тушение пожаров в тупиковых выработках, особенно пройденных по газоносным угольным пластам, – крайне опасная операция ввиду того, что в любой момент может произойти вспышка или взрыв метановоздушной смеси. Опасность возникновения взрывов значительно усложняет ведение аварийных работ, препятствует эффективному использованию традиционных огнетушащих средств (воды, пены), создает угрозу здоровью и жизни горноспасателей. По этой причине более половины пожаров, возникающих в тупиковых горных выработках, ликвидируют способом изоляции – путем возведения взрывоустойчивых перемычек на дальних подступах к очагу пожара, с последующим затоплением аварийного участка. Это наносит огромный моральный и материальный ущерб угольным предприятиям, приводит к срыву планов развития горных работ, консервации дорогостоящего оборудования и подготовленных к выемке запасов угля. В связи с этим проблема совершенствования активных способов тушения пожаров этого класса весьма актуальна.

Как показали исследования, проведенные в НИИГД, наиболее перспективным и эффективным является способ дистанционного тушения пожаров в тупиковых выработках тонкодисперсным огнетушащим порошком, транспортируемым к очагу пожара по вентиляционным трубам энергией вентиляционного потока, создаваемого вентилятором местного проветривания (ВМП). Частицы тонкодисперсного (П-2АП) и супертонкодисперсного (П-4АП) огнетушащего порошка, созданного в НИИГД, обладают хорошими аэродинамическими свойствами (низкой скоростью витания, малым коэффициентом аэродинамического сопротивления), что позволяет легко транспортировать их по вентиляционным трубопроводам.

Дистанционное тушение порошком, который подают по вентиляционному трубопроводу в крутых и крутонаклонных тупиковых выработках, проветриваемых сверху вниз, возможно при нормальном проветривании выработки и длине ее не более 300 м. В восстающих тупиковых выработках с углом наклона до 30° расстояние эффективного дистанционного тушения порошком не превышает 120 м.

Для создания огнетушащей концентрации порошка (1...1,2 кг/с) в забое тупиковой выработки нужно подавать воздушно-порошковую смесь с концентрацией в 3...5 раз большей, чем огнетушащая, поскольку часть порошка будет вынесена из забоя исходящей струей и конвективными потоками, а часть – осядет и прилипнет к почве, стенкам и кровле выработки.

При этом транспортирование порошка по вентиляционному трубопроводу приводит к дополнительной потере напора ВМП, вследствие чего дальность подачи порошка весьма ограничена.

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден тот факт, что пламя обладает собственным электрическим полем. Источники возникновения пламени заряженных частиц – ионов и электронов – являются, по-видимому, химические реакции, происходящие в зоне горения. Из-за различия в коэффициентах диффузии частиц вокруг пламени создается электрическое поле. В этой связи представляется возможным увеличить эффективную дальность подачи огнетушащего порошка за счет силы притяжения разноименно заряженных частиц порошка и пламени.

Как известно, эффективность тушения пожаров огнетушащими порошками тем выше, чем больше их удельная поверхность, то есть чем меньше радиус частиц порошка при неизменном массовом расходе огнетушащего вещества. Однако такая возможность оправдана лишь в том случае, когда устройство выброса порошка расположено непосредственно в пламени. При тушении же извне мелкие частицы не могут проникнуть в глубь области горения, так как они, во-первых, легко уносятся восходящими конвективными газовыми потоками пламени, и, во-вторых, очень быстро тормозятся в газовой струе.

Изменение вертикальной составляющей скорости частицы  $V_z$  при ее попадании в пламя описывается уравнением

$$m \frac{dV_z}{dt} = -mg + \frac{\rho_*}{2}(U_* - Vr)^2 \pi r^2, \quad (1)$$

где  $m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3$  - масса частицы порошка, кг;  $t$  - время, с;  $\rho$  - плотность ее вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_*$  - плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $r$  - радиус частицы, м;  $U_*$  - вертикальная составляющая скорости, м/с.

Если, помимо силы тяжести, в притяжении частицы в зону пламени участвуют силы электростатического взаимодействия, то уравнение (1) принимает вид

$$m dV_z = -mg + \frac{\rho_*}{2}(U_* - V_z)^2 \pi r^2 - E_q, \quad (2)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля пламени, В/м;  $q$  - заряд частицы порошка, Кл.

Очевидно, что для того чтобы частица не поднималась вверх, динамический напор конвективных газовых потоков должен быть уравновешен силами тяжести и электростатического взаимодействия, т.е.

$$U_*^2 - \left( \frac{8\rho r g}{3\rho_*} + \frac{2Eq}{\rho_* r^2} \right) \leq 0, \quad (3)$$

или

$$r_{np} + \frac{3Eq}{4\rho g r^2} \geq \frac{3\rho_* U_*^2}{8\rho g}.$$

Принимаем  $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$  (порошок П-2АП);  $\rho_* = 1,0 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 50 \text{ В/м}$ ;  $q = 9,8 \cdot 10^{18} \text{ Кл}$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  и рассчитываем предельные значения радиусов заряженных и незаряженных частиц порошка. При  $r \geq r_{np}$  порошок не выносится из пламени (табл.1).

Таблица 1

$U_*$ , м/с	0,5	1,0	1,5	2,0	5,0	10,0
$r_{np}$ , мм (частица не заряжена)	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	0,5	2,0
$r_{np}$ , мм (частица заряжена до $q=9,8 \cdot 10^{18} \text{ Кл}$ )	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$11,7 \cdot 10^{-3}$	$12,8 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, при условии зарядки частиц даже микронных размеров ( $r = 1 \dots 20 \text{ мкм}$ ) они втягиваются за счет силы электростатического взаимодействия в зону горения. Тем самым снимается негативное влияние конвективных потоков пламени, отсутствует вынос частиц порошка из зоны горения и, следовательно, открывается путь к дальнейшему возможному снижению размеров частиц, повышению эффективности и сокращению времени тушения пожара. Для сравнения, при мощных конвективных потоках продуктов горения ( $U_* = 2 \dots 10 \text{ м/с}$ ) предельный радиус незаряженных частиц порошка достигает миллиметровых размеров ( $r_{np} = 0,08 \dots 2 \text{ мм}$ ).

Таким образом, в пламени происходит разделение частиц: легкие уносятся потоком вверх, тяжелые – опускаются вниз. Для каждого конкретного пламени имеется свой оптимальный набор размеров частиц, связанных со средним значением величины  $U_*$ , который приводит к наиболее быстрому срыву пламени. Очевидно, что плотность распределения частиц по размерам должна быть максимальной в области значений, близких к  $r = r_{np}$ .

С другой стороны, траектория подачи порошка практически горизонтальная и именно в этом направлении происходит резкое торможение частиц. Для незаряженных частиц имеем:

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{3\rho_*}{8\rho_r}(V_x - U_x)^2 - \frac{9}{2r^2\rho}(V_x - U_x), \quad (4)$$

где  $\eta$  - динамическая вязкость газовой среды, Па·с;  $U_x$  - эжектируемая струей порошка скорость газового потока, м/с.

Из уравнения (4) получаем:

$$V_x = U_x + \eta \frac{\rho_*}{\rho_x r} \frac{V_o - U_x}{V_o - U_x + \eta \frac{\pi}{\rho_x r}} \cdot \frac{\exp(-\frac{9}{2\rho r^2} t)}{1 - \frac{V_o - U_x}{V_o - U_x + 12 \frac{\pi}{\rho_* r}} \cdot \exp(-\frac{9}{2\rho r^2} t)}, \quad (5)$$

где  $V_o$  - начальная горизонтальная скорость частицы, м/с.

Интегрируя выражение (5), получаем

$$X = U_x t + \frac{8}{3} r \frac{\rho}{\rho_*} l_n \left[ 1 + \frac{\rho_* r}{12 \eta} (V_o - U_x) \left( 1 - e^{-\frac{9}{2} \frac{\eta}{\rho r^2} t} \right) \right]. \quad (6)$$

Последнее выражение определяет дальность продвижения переднего фронта огнетушащего вещества в глубь зоны горения в случае стационарного режима тушения. Второй член в выражении (6) в пределе стремится к значению

$$X_o = \frac{8}{3r} \cdot \frac{\rho}{\rho_x} l_n \left[ 1 + \frac{\rho_x r}{12 \eta} (V_o - U_x) \right]. \quad (7)$$

На этом расстоянии от места выброса огнетушащего порошка скорость частиц фактически становится равной  $U_x$  и двухфазный поток в первом приближении можно рассматривать как стационарный.

Для заряженных частиц уравнение (4) принимает вид

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{3 \rho_*}{8 \rho_r} (V_x - U_x)^2 - \frac{9}{2} \frac{\eta}{r^2 \rho} (V_x - U_x) + \frac{3Eq}{4\pi r^3}. \quad (8)$$

Интегрируя выражение (8), получим

$$\frac{(V_x - U_x + 0,5p - \sqrt{0,25p^2 - q'}) (V_o - U_x + 0,5p + \sqrt{0,25p^2 - q'})}{(V_x - U_x + 0,5p + \sqrt{0,25p^2 - q'}) (V_o - U_x + 0,5p - \sqrt{0,25p^2 - q'})} = l^{a\sqrt{p^2 - 4q'}}, \quad (9)$$

где обозначены:

$$p = \frac{12\eta}{\rho_* r}; \quad q' = -\frac{2Eq}{\pi \rho_* r^2}; \quad a = -\frac{3\rho_*}{8\rho_r}. \quad (10)$$

Дальнейшее интегрирование уравнения (9) в квадратурах с целью получения выражения для дальности продвижения огнетушащего фронта  $L=L(t)$  связано со многими трудностями. Поэтому выражение (9) было проинтегрировано на ПЭВМ с использованием стандартного метода Рунге-Кутты.

$$\bar{L} = \frac{L}{x_o}; \quad \bar{\tau} = \frac{t}{t_a}; \quad \text{где } t_a = \frac{1}{a\sqrt{p^2 - 4q'}}. \quad (11)$$

Как видно из расчетов, при прочих равных условиях, дальность фронта продвижения заряженных частиц превышает аналогичное значение для незаряженных частиц на 30...40 %.