

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ОБЪЁМА ВОДЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА ПОСЛЕ МАССОВОГО ВЗРЫВА В КАРЬЕРЕ

Наведені результати теоретичних досліджень по вирішенню задачі прогнозування необхідного об'єму води для пригнічення пилової хмари при масових вибухах в кар'єрах.

Приведены результаты теоретических исследований по решению задачи прогнозирования требуемого объёма воды для подавления пылевого облака при массовых взрывах в карьерах.

Theoretical studies to address the problem of forecasting the required amount of water to suppress dust cloud with mass explosions in mines.

**Введение.** Наиболее широко распространенным методом пылеподавления является орошение запылённой атмосферы в месте образования пылевого облака. В частности, при массовом взрыве в карьере в атмосфере образуется пылегазовое облако, состоящее из смеси пыли и взрывных газов. Высота подъёма облака зависит от мощности взрыва и может достигать 1,5 км [1]. Интенсивность образования пыли зависит от удельного расхода ВВ, изменяется в широких пределах и для условий Кривбасса составляет от 10 до 150 кг/м<sup>3</sup>. Концентрация пыли в облаке при этом составляет до 4000 мг/м<sup>3</sup>.

**Постановка задачи.** При подавлении пылевого облака путём его орошения прежде всего необходимо установить необходимый объём воды, который необходимо доставить и разбрызгать над ним. В этой работе представлены результаты теоретических исследований по решению этой задачи.

**Изложение материала исследований.** Основным параметром орошения пылевого облака является эффективность пылеподавления, которая в общем случае определяется способностью улавливания пылевых частиц диспергированной водой [2, 3, 4] Эта способность характеризуется коэффициентом захвата пылинок сферической каплей воды.

В результате теоретических исследований нами получено аналитическое выражение для расчёта эффективности подавления пылевого облака путём его орошения в виде [5]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} m \frac{\omega}{g} \frac{H}{d_k} \eta_{\Sigma}\right), \quad (1)$$

где  $\eta = \frac{\Delta C}{C}$  - эффективность подавления пылевого облака;  $\Delta C$  - часть пыли облака, захваченная каплями воды, мг/м<sup>3</sup>;  $C$  - начальная концентрация пыли в облаке, мг/м<sup>3</sup>;  $m = \frac{V_k}{V_o}$  - показатель орошения облака, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $V_k$  - объём капель орошаемой жидкости, м<sup>3</sup>;  $V_o$  - объём пылевого облака, м<sup>3</sup>;  $\omega = u - g$  относительная скорость движения пылевой частицы и капли воды, м/с;  $u, g$  - скорость осаждения пылевой частицы и капли воды соответственно, м/с;  $H$  - высота

“прочёсывания” пылевого облака каплями воды, м;  $d_k$  – диаметр капли воды, м;  $\eta_\Sigma$  – коэффициент захвата пылинок сферической каплей воды.

В результате проведенных теоретических исследований установлены значения коэффициента захвата для частиц железорудной пыли различных фракций и диаметров водяных капель. Установлено, что значение коэффициента захвата для тонкодисперсной железорудной пыли имеет максимальное значение при диаметре капель воды 1–1,5мм и равен 0,488. Для грубодисперсной железорудной пыли коэффициент захвата при этих диаметрах капель воды изменяется от 0,815 до 0,996. Таким образом, подтверждается то положение, что чем больше диаметр частиц витающей пыли, тем выше коэффициент захвата её каплями орошаемой жидкости.

В пылегазовом облаке сразу после взрыва в результате воздействия на пылевые частицы динамического фактора выброса из очага взрыва продуктов детонации и термического фактора из-за их высокой температуры пыль движется вверх. Причём высота подъёма частиц зависит также от их диаметра и плотности. При уравнивании сил, вызывающих движение частицы вверх, и сил сопротивления движению пылевая частица останавливается. И затем частица начинает движение вниз под действием силы тяжести  $F_g = mg$ , где  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение земной тяжести, м/с<sup>2</sup>. Противодействует движению частицы вниз выталкивающая сила Архимеда  $F_A = \rho_0 Vg$ , где  $\rho_0$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объём частицы, м<sup>3</sup>, а так же сила трения среды, которая при ламинарном режиме движения среды пропорциональна скорости движения частицы. Сила трения среды может быть выражена как  $F_{тр} = K \vartheta$  [6], где  $K$  – коэффициент сопротивления для области течения, Нс/м,  $\vartheta$  – скорость осаждения пылевой частицы, м/с.

Скорость осаждения частиц пыли определится по выражению

$$\vartheta = \frac{g\rho d^2}{18\mu}. \quad (2)$$

Выражение (2) является формулой Стокса для определения скорости осаждения пылевых частиц в воздухе под действием сил гравитации [7,8]. Однако ввиду принятых допущений область её применения ограничивается как по числу Рейнольдса, так и по размеру частиц. Значительные отклонения от формулы Стокса возникают в том случае, когда диаметр частиц соизмерим с длиной свободного пробега молекул газа. Хорошее совпадение формула даёт при числах Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_0 \vartheta d}{\mu} < 1 \quad (3)$$

С ростом числа  $Re$  на поверхности частицы возникают проскальзывания газа, то есть свойства газа начинают отличаться от свойств сплошной среды. В кормовой области за частицей возникают вихревые зоны. Пограничный слой на поверхности частицы турбулизируется. При  $Re > 10^2$  образуются так называемые

мые дорожки Кармана, состоящие из оторвавшихся вихрей. Сопротивление трения заметно возрастает. Величина инерционных сил в области  $Re > 10^4$  становится соизмеримой с силами вязкости. В этом случае сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости и определяется по выражению [6]

$$F_c = \xi 0,5 \rho_0 g^2 \pi r^2,$$

где  $\xi = f(Re)$  - коэффициент сопротивления частицы, определяемый в общем случае по экспериментальным данным и зависящий от режима обтекания;  $r$  - радиус пылевой частицы, м.

Весь диапазон значений  $Re$  можно разделить на несколько областей, в пределах которых зависимость  $\xi = f(Re)$  можно аппроксимировать простыми формулами:

Так, в области действия закона Стокса для  $Re$  от 0,01 до 1  $\xi = \frac{24}{Re}$ .

В диапазоне  $Re = 10 \dots 10^3$  приемлема формула  $\xi = \frac{12}{\sqrt{Re}}$ .

В области развитого турбулентного течения, где  $Re > 10^4$ , коэффициент сопротивления практически не зависит от изменения числа  $Re$  и для сферы равен  $\xi = 0,45$ .

Для оценки загрязнения прилегающих к карьере территорий необходимо знать скорость осаждения пылевых частиц в гравитационном поле. Кроме этого, при решении вопросов пылеподавления с помощью орошения облака важно иметь данные о скорости осаждения капель воды. Установлено, что скорость оседания частиц железорудной пыли находится в диапазоне от 0,00012 до 0,995 м/с [9].

Для повышения эффективности мокрого пылеподавления капли орошаемой жидкости должны иметь значительно больший диаметр и, соответственно, значительно большую скорость осаждения. При этом обеспечивается "прошивание" облака каплями орошаемой жидкости. Капли воды имеют скорость оседания, равную скорости оседания крупнодисперсной железорудной пыли, при диаметре 400 мкм. С учётом результатов исследований коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при их орошении, которые приведены в работе [9], для эффективного подавления облака железорудной пыли диаметр капель воды должен быть 1000–1500 мкм. При этом скорость осаждения капель воды составляет 4,5–6,5 м/с, которая значительно выше скорости частиц пыли, в том числе и крупнодисперсной. Такие диаметры капель имеет вода при самодиспергировании в процессе осаждения в атмосферном воздухе под действием сил гравитации [2].

Проведенные теоретические исследования позволили установить:

1. Максимальный диаметр аэрозольных частиц, для определения скорости осаждения которых правомочно применить закон Стокса, для частиц железорудной пыли составляет 50 мкм, а для капель воды – 80 мкм.

2. Обоснованный диаметр капель воды, при котором обеспечивается наиболее эффективное пылеподавление при орошении облака железорудной пыли, составляет 1–1,5 мм, скорость осаждения которых в гравитационном поле составляет 4–6 м/с. Этим достигается превышение в несколько раз скорости осаждения даже крупнодисперсной железорудной пыли и обеспечивается “прошивание” облака пыли каплями воды.

Согласно (1), эффективность пылеулавливания повышается при увеличении суммарного коэффициента захвата частиц сферической каплей  $\eta_{\Sigma}$ , высоты контакта жидкости с облаком  $H$ , относительной скорости движения капли и пылевой частицы  $\omega$ , показателя орошения пыли  $m$ .

Техническими методами можно повышать эффективность пылеулавливания за счет повышения суммарного коэффициента захвата пылевых частиц сферической каплей и показателя орошения пыли, который определяется возможностями средств доставки жидкости. Остальные параметры в выражении (1) обусловлены технологией разрушения горного массива и аэродинамическими параметрами атмосферного воздуха.

Для выполнения поставленной в этой работе задачи по определению необходимого количества воды для достижения эффективной очистки пылегазового облака от пыли при его орошении из выражения (1) найдём значение показателя орошения пылегазового облака:

$$m = \ln \frac{1}{1 - \eta} \left( \frac{3 \omega H}{2 g d_k} \eta_{\Sigma} \right)^{-1}. \quad (4)$$

При этом оптимальным диаметром капель воды можно считать  $d_k = 1000$ – $1500$  мкм (1,0–1,5 мм), так как в этом случае суммарный коэффициент захвата мелкодисперсной (респирабельной) пыли является максимальным [5].

Далее рассчитаем необходимый показатель орошения облака для заданных значений эффективности пылеулавливания. Затем для известного объёма пылегазового облака можно рассчитать необходимый объём воды для орошения облака.

Проиллюстрируем предложенную методику на конкретном примере. Расчёт необходимого количества воды для орошения пылевого облака производился для массового взрыва мощностью 500 т украинита. При расчёте используем исходные данные:

- диаметр капель разбрызгиваемой воды  $d_k = 1000 \cdot 10^{-6}$  м;
- суммарный коэффициент захвата пылевых частиц  $\eta_{\Sigma} = 0,488$ ;
- объём пылегазового облака  $V_o = B \cdot L \cdot H = 18 \cdot 1900 \cdot 100 = 3420000$  м<sup>3</sup>;
- средняя концентрация пыли в облаке  $C = 1400$  мг/м<sup>3</sup>;
- скорость осаждения тонкодисперсной пыли  $u = 0,00012$  м/с [5];
- скорость осаждения капель воды  $g = 4,31$  м/с [5];
- относительная скорость движения капель воды  $\omega = 4,31$  м/с.

Зададимся рядом значений эффективности улавливания пыли каплями воды  $\eta$  от 0,1 до 0,9. Далее по выражению (4) для этих значений эффективно-

сти пылеулавливания рассчитываем необходимый показатель орошения пылевого облака  $m$ . Результаты расчётов сводим в табл.1.

Таблица 1

Зависимость требуемого показателя орошения облака от эффективности пылеулавливания

$\eta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$m \cdot 10^6$	0,00143	0,00305	0,0049	0,00698	0,00947	0,0125	0,0164	0,022	0,0315

По этим данным, исходя из определения показателя орошения облака, объём воды для орошения облака определится как  $V_{жс} = m \cdot V_0$ .

Более информативным показателем является удельный расход воды для достижения желаемой эффективности пылеподавления  $V_{уд}$ , кг/кг. Он может быть определён как частное от деления требуемого расхода воды на общий выброс тонкодисперсной пыли при массовом взрыве. Результаты расчётов сводим в табл. 2.

Таблица 2

Требуемый объём воды для орошения облака при принятых значениях эффективности пылеулавливания

$\eta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$V_{жс}, M^3$	4,89	10,43	16,76	23,87	32,39	42,75	56,09	75,24	107,73
$V_{уд}, кг/кг$	0,130	0,278	0,447	0,637	0,865	1,141	1,497	2,010	2,875

На рис.1 представлена зависимость требуемого удельного расхода воды для подавления тонкодисперсной пыли при массовом взрыве мощностью 500т украинита при различных значениях эффективности пылеулавливания, которая описывается аналитическим выражением  $V_{уд} = 0,1291^{3,5534\eta}$ .

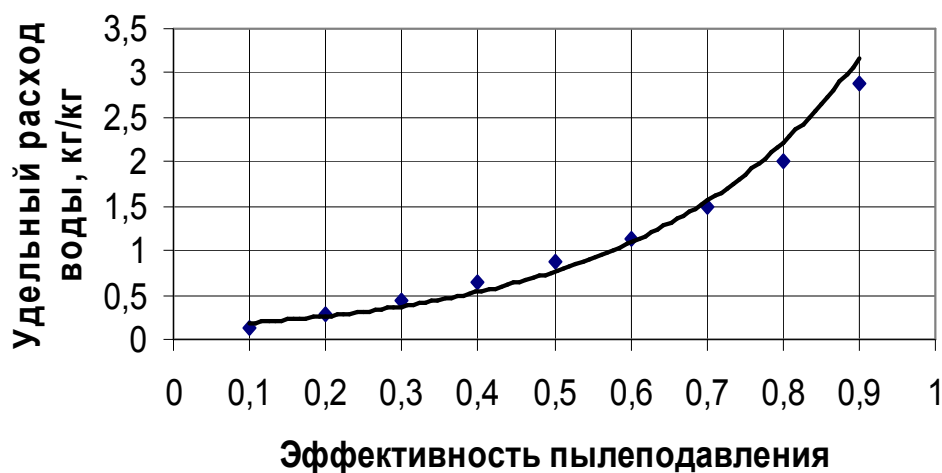


Рис. 1. Требуемый удельный расход воды для подавления тонкодисперсной пыли при различных значениях эффективности пылеулавливания

Уменьшить расход воды можно путём повышения коэффициента захвата пылевых частиц при добавлении в воду для орошения поверхностно активных веществ (ПАВ).

**Выводы.** Подавление пылевого облака после массового взрыва в карьере путём его орошения представляет собой весьма сложную задачу, так как для этого требуется доставка и разбрызгивание над ним больших объёмов орошаемой жидкости. Установлено, что для подавления пылевого облака, содержащего 1 кг железорудной пыли, необходимо над ним разбрызгать 2,87 кг воды. Для подавления пылевого облака, которое образовалось после массового взрыва мощностью 500т украинита в условиях Кривбасса, необходимый объём воды составляет 107,7м<sup>3</sup>. При этом обеспечивается снижение запылённости атмосферы на 90%, благодаря чему достигается значительное снижение экологической опасности массовых взрывов в карьерах.

#### Список литературы

1. Дриженко А. Ю., Козенко Г. В., Рыкус А. А. Открытая разработка железных руд Украины. Состояние и пути совершенствования. - Полтава: "Полтавский литератор", 2009. - 451с.
2. Берлянд М. Е. Прогноз регулирования загрязнения атмосферы. –Л.: Гидрометеиздат, 1985, - 272с.
3. Способ борьбы с загрязнением атмосферы карьеров продуктами взрывов / П.В. Бересневич, В.Г. Наливайко, В.В. Ежов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1988. № 5, - С. – 44 – 46.
4. Наливайко В.Г. Расчёт эффективности пылеподавления мелкодисперсным дождеванием после массовых взрывов в карьерах // Борьба с опасными и вредными производственными факторами на горнорудных предприятиях: Отр. темат. сб. / М – во метал. СССР. Ин – т ВНИИБТГ. – М.: Недра, 1991. – С. 62-64.
5. Юрченко А.А. Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении // Збірник наукових праць НГУ. №39, 2012. -С.187-194.
6. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. –М.: Metallurgia, 1988.–256с.
7. Фукс Н. А. Механика аэрозолей / Фукс Н. А. –М.: Изд-во АН СССР, 1955. -351с.
8. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Пер. с англ. под ред. д-ра хим. наук Н.А. Фукса. Изд. 2-е, стереотип. –Л.: Из-во «Химия», 1972.–427с.
9. Юрченко А.А. Обоснование степени диспергирования воды при орошении облака железорудной пыли после массовых взрывов в карьерах. // Збірник наукових праць НГУ. №40, 2013. -С.209-215.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голіньком В.І.  
Надійшла до редакції 18.09.2014*