

А.А. Юрченко, А.А. Литвиненко

## ПОДАВЛЕНИЕ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА ПОСЛЕ МАССОВОГО ВЗРЫВА В КАРЬЕРЕ ПУТЕМ ЕГО ОРОШЕНИЯ

*Приведены результаты теоретических исследований захвата пылевых частиц каплями воды при орошении, требуемой степени диспергирования воды, а также расчета необходимого количества воды для подавления пылевого облака после массового взрыва в карьере.*

---

### ПРИДУШЕННЯ ПИЛОВОЇ ХМАРИ ПІСЛЯ МАСОВОГО ВИБУХУ В КАР'ЄРІ ШЛЯХОМ ЙОГО ЗРОШЕННЯ

*Наведені результати теоретичних досліджень захвату пилових часток каплями води при зрошуванні, потрібного ступеня диспергування води, а також розрахунків необхідної кількості води для придушення пилової хмари після масового вибуху в кар'єрі.*

---

### DUST SUPPRESSION AFTER HUGE BLAST IN QUARRY BY MEANS OF SPRINKLING

*Theoretical studies capture dust particles, droplets of water for irrigation, the desired degree of dispersion of water, and the calculation of the required amount of water to suppress dust cloud following the massive explosion in the quarry.*

---

Технологические процессы многих отраслей промышленности сопровождаются значительным пылеобразованием. Наиболее широко распространенным методом пылеподавления является орошение запыленной 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 подъема 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>. По дисперсному составу частицы с диаметром до 1,4 мкм составляют

около 11%. На долю частиц с диаметром 1,4-4 мкм приходится до 12%, с диаметром 4-15 мкм – до 27%. Крупнодисперсная пыль с диаметрами частиц от 15 до 100 мкм представлена до 50% от общей концентрации пыли [2]. Химический состав пыли зависит от вида взрываемого горного массива.

При этом основным параметром орошения является эффективность пылеподавления, которая в общем случае определяется способностью улавливания пылевых частиц диспергированной водой [3, 4, 5] Эта способность характеризуется коэффициентом захвата пылинок сферической капли воды. При решении вопросов борьбы с пылегазовым облаком путем его орошения с целью снижения загрязнения атмосферы и прилегающих территорий не-

обходимо установить требуемую степень диспергирования воды, при которой капли воды будут оседать быстрее пылевых частиц и тем самым обеспечивать «прочесывание» ими пылевого облака. Кроме этого, важнейшим вопросом для организации орошения облака является определение необходимого количества орошаемой жидкости, чаще всего воды, для достижения желаемой эффективности пылеподавления.

При орошении пылевого облака возникает совместное движение капель жидкости и твердых частиц. При этом на них действуют силы тяжести и инерции, а также аэродинамические силы. При сближении пылинки с каплей на расстоянии 3-4 радиусов последней начинают действовать электростатические силы, а для мелких пылинок (менее 5 мкм) при небольших скоростях движения проявляются диффузионные силы.

Для эффективного улавливания витающих частиц диспергированной жидкостью необходимо выполнение четырех последовательных стадий:

- встреча пылинки с каплей на пути своего движения;
- соприкосновение пылинки с каплей;
- смачивание и захват пылинки каплей;
- соединение капли с уловленными пылинками.

Все эти процессы комплексно учитывает коэффициент захвата пылевой частицы сферической каплей жидкости, который может быть определен как отношение числа частиц пыли, соударяющихся с каплей жидкости, к числу частиц, которые соударялись бы, если линии тока не отклонялись бы каплей.

В результате теоретических исследований нами получено аналитическое выражение для расчета эффективности подавления пылевого облака путем его орошения в виде:

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

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>;

$m = \frac{V_k}{V_{ПГО}}$  – показатель орошения облака, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$V_k$  – объем капель орошаемой жидкости, м<sup>3</sup>;

$V_{ПГО}$  – объем пылевого облака, м<sup>3</sup>;

$\omega = u - \vartheta$  – относительная скорость движения пылевой частицы и капли воды, м/с;

$u, \vartheta$  – скорость осаждения пылевой частицы и капли воды соответственно, м/с;

$H$  – высота «прочесывания» пылевого облака каплями воды, м;

$d_k$  – диаметр капли воды, м;

$\eta_{\Sigma}$  – коэффициент захвата пылинок сферической каплей воды.

Выражение (1) позволяет для желаемой эффективности пылеподавления рассчитать значения коэффициента захвата для частиц пыли различных фракций и диаметров водяных капель. Установлено, что значение коэффициента захвата для тонкодисперсной железорудной пыли имеет максимальное значение при диаметре капель воды 1-1,5 мм и равно 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 витающей пыли, тем выше коэффициент захвата ее 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. Причем высота подъема 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,  $\text{м/с}^2$ .

Противодействует движению частицы вниз выталкивающая сила Архимеда

$$F_A = \rho_0 V g,$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ ,

а так же сила трения среды, которая при ламинарном режиме движения среды пропорциональна скорости движения частицы.

Сила трения среды может быть выражена как

$$F_{mp} = K v,$$

где  $K$  – коэффициент сопротивления для области течения,  $\text{Нс/м}$ ;

$v$  – скорость осаждения пылевой частицы,  $\text{м/с}$  [6].

Скорость осаждения частиц пыли определится по формуле Стокса [6].

Однако ввиду принятых допущений область ее 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 дает при числах Рейнольдса  $Re < 1$ . С ростом числа  $Re$  на поверхности частицы возникают проскальзывания газа, то есть свойства газа начинают отличаться от свойств сплошной среды. В этом случае в надстоксовской области сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости и определяется по выражению

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

где  $\xi = f(Re)$  – коэффициент сопротивле-

ния частицы, определяемый в общем случае по экспериментальным данным и зависящий от режима обтекания;

$r$  – радиус пылевой частицы, м.

Для оценки загрязнения прилегающих к карьере территорий необходимо знать скорость осаждения пылевых частиц и капель воды в гравитационном поле. Нами рассчитаны скорости осаждения частиц железорудной пыли и капель воды в стоксовской и надстоксовской областях. При этом скорость оседания частиц железорудной пыли находится в диапазоне от 0,00012 до 0,995  $\text{м/с}$ , а капель воды – от 0,003 до 7,83  $\text{м/с}$ .

Для повышения эффективности пылеподавления капли орошаемой жидкости должны иметь значительно больший диаметр и, соответственно, значительно большую скорость осаждения. При этом обеспечивается «прошивание» облака каплями орошаемой жидкости. С учетом результатов исследований коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при их орошении для эффективного подавления облака железорудной пыли диаметр капель воды должен быть 1000-1500  $\mu\text{м}$ . При этом скорость осаждения капель воды составляет 4,5-6,5  $\text{м/с}$ , 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 [3].

Согласно (1), эффективность пылеулавливания повышается при увеличении 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) найдем значение показателя орошения пылегазового облака:

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

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

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

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

– диаметр капель разбрызгиваемой воды  $d_k = 1000 \cdot 10^{-6}$  м;

– суммарный коэффициент захвата пылевых частиц  $\eta_{\Sigma} = 0,488$ ;

– объем пылегазового облака  $V_{ПГО} = B \cdot L \cdot H = 18 \cdot 1900 \cdot 100 = 3420000 \text{ м}^3$ ;

– средняя концентрация пыли в облаке  $C = 1400 \text{ мг/м}^3$ ;

– скорость осаждения тонкодисперсной пыли  $u = 0,00012 \text{ м/с}$ ;

– скорость осаждения капель воды  $v = 4,31 \text{ м/с}$ ;

– относительная скорость движения капель воды  $\omega = 4,31 \text{ м/с}$ .

Зададимся рядом значений эффективности улавливания пыли каплями воды  $\eta$  от 0,1 до 0,9. Далее по выражению (2) для этих значений эффективности пылеулавливания рассчитываем необходимый показатель орошения пылевого облака  $m$ . По этим данным, исходя из определения показателя орошения облака, объем воды для орошения облака определится как  $V_{жс} = m \cdot V_{ПГО}$ .

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

В результате проведенных расчетов установлено, что для 90% подавления пылевого облака при массовом взрыве с вышеприведенными параметрами необходимо для его орошения  $107,7 \text{ м}^3$  воды. При этом удельный расход воды составляет 2,8 л на 1 кг пыли.

Таким образом, в результате теоретических исследований установлено, что для подавления облака железорудной пыли при массовом взрыве мощностью 500 т украинита путем его орошения требуемый объем воды составляет  $107,7 \text{ м}^3$ . При этом оптимальный диаметр капель воды при диспергировании находится в диапазоне 1,0-1,5 мм.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дриженко, А.Ю. Открытая разработка железных руд Украины. Состояние и пути совершенствования [Текст] / А.Ю. Дриженко, Г.В. Козенко, А.А. Рыкус. – Полтава: «Полтавский литератор», 2009. – 451 с.

2. Тыщук, В.Ю. Проблемы экологии при ведении открытых горных работ [Текст] / В.Ю. Тыщук // Материалы науч.-практ. конф. «Проблемы экологии – 97», 12 – 14 ноября 1997 г., С.-Петербург. – С.-Петербург: НИЦЭБ РАН, БГТУ, 1997. – С. 458.

3. Берлянд, М.Е. Прогноз регулирования загрязнения атмосферы [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

4. Бересневич, П.В. Способ борьбы с загрязнением атмосферы карьеров продуктами взрывов [Текст] / П.В. Бересневич, В.Г. Наливайко, В.В. Ежов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1988. – № 5. – С. 44-46.

5. Наливайко, В.Г. Расчет эффективности пылеподавления мелкодисперсным дождеванием после массовых взрывов в карьерах [Текст] / В.Г. Наливайко // 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.

6. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / В.В. Белоусов. – М.: Metallurgia, 1988. – 256 с.

## ОБ АВТОРАХ

Юрченко Аннета Анатольевна – к.т.н., доцент кафедры экологии Национального горного университета.

Литвиненко Анатолий Арсентьевич – к.т.н., доцент кафедры аэрологии и охраны труда Национального горного университета.