

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТЛОЖЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В. Е. Колесник, докт. техн. наук (Национальный горный университет)

Отримано математичні моделі поширення пилу та пилівідкладення у гірничих виробках, що враховують безперервне надходження пилу.

Ключові слова: пилівідкладення, гірничі виробки, моделювання, контроль.

Получены математические модели распространения пыли и пылеотложения в горных выработках, учитывающие непрерывное поступление пыли.

Ключевые слова: пылеотложение, горные выработки, моделирование, контроль.

The mathematical models of dust distribution and dust deposit in mine workings that take into account continuous dust intake are obtained.

Ключові слова: dust deposit, mine workings, modelling, control.

Постановка задачи. Существующий контроль пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт по уровню пылеотложения осуществляется трудоемким сбором пыли на подложки или портативными приборами, измеряющими массу осевшей пыли в отдельных точках выработки. Такое решение нельзя считать оптимальным из-за низкой производительности, оперативности и достоверности результатов точечных измерений пылевого осадка. Более достоверные результаты можно получить на основе контроля пылеотложения по содержанию пыли в воздухе с использованием системы парных датчиков [1]. Один из способов определения интенсивности пылеотложения – одним измерителем содержания пыли в воздухе, установленным в выбранном сечении запыленного потока – базируется на знании закономерности оседания пыли из потока [2]. Для этого, в частности, можно использовать серийно выпускаемый измеритель запыленности шахтной атмосферы (ИЗША, ОАО Красный металлист, г. Конотоп). Последний метод предполагает вычисление пылеотложения с использованием математической модели изменения концентрации пыли C по длине выработки l , то есть функции $C = f(l)$.

Анализ известных зависимостей $C = f(l)$ показал, что все они имеют одинаковый характер и описываются простой экспонентой, согласно которой концентрация пыли постепенно снижается практически до нуля по мере удаления от источника с коэффициентом затухания, определяемым интенсивностью оседания частиц в воздушном потоке. Принципиально их можно использовать для вычисления интенсивности пылеотложения. Однако в ряде случаев необходимо учитывать ранее не рассматривавшиеся режимы работы источников пыли и вентиляции горных выработок, в частности непрерывное поступление пыли в выработку по всей ее длине, например при работе конвейеров или при наличии вторичного взметывания уже осевшей пыли под действием вентиляционного потока воздуха. Взметывание наблюдается в любых достаточно сухих вентиляционных выработках угольных шахт с

высокой запыленностью воздушного потока. В связи с изложенным автором ставилась задача построения математической модели процесса отложения взрывоопасной угольной пыли с учетом ее поступления по длине горных выработок.

Результаты работы. Математическая модель поступления и распространения пыли по длине горной выработки в наиболее общем случае представляет собой экспоненту с отличной от нуля асимптотой [3]:

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{\sigma}{u}l\right) + \frac{\check{N}}{\sigma} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{u}l\right)\right], \quad (1)$$

где C_0 – запыленность в точке, принятой за начальную, мг/м³, например, в пункте загрузки конвейера; l – расстояние от точки отсчета по ходу вентиляционной струи, м; u – скорость потока воздуха, м/с; \check{N} – мощность непрерывно действующего в выработке источника пыли, мг/м³с; σ – коэффициент, определяющий скорость оседания пыли из потока, с⁻¹.

Если осуществить замену $b = \frac{\sigma}{u}$; $c = \frac{\check{N}}{\sigma}$, зависимость (1) можно представить в общем виде как

$$C = (C_0 - c) \exp(-b \cdot l) + c. \quad (2)$$

Согласно этой модели результирующая концентрация пыли по мере перемещения по ходу вентиляционной струи от основного источника асимптотически приближается к величине $c = \frac{\check{N}}{\sigma}$. На наличие асимптоты c указывают и известные экспериментальные данные, приведенные, например, в [4], и тот факт, что концентрация пыли в работающей шахте практически никогда не падает до нуля. По полученным нами данным параметр c , например, в конвейерной выработке может изменяться в довольно широких пределах – от $0,05C_0$ до $0,3C_0$.

На основе модели (2) можно получить модель пылеотложения на единице длины горной выработки, которая в дифференциальной форме известна как $P_l = -\frac{dC}{dl}q$, где $q = u \cdot S \cdot t$ – количество воздуха, прошедшее через поперечное сечение выработки S за время t .

Продифференцировав (2) по l , полагая, что значения b и c не зависят от расстояния, то есть постоянны, получим искомую модель интенсивности отложения пыли в виде

$$P_l = (C_0 - c) \cdot b \cdot q \cdot \exp(-b \cdot l). \quad (3)$$

Ее можно преобразовать для описания интенсивности пылеотложения в единице объема:

$$P = \frac{P_l}{S \cdot t} = (C_0 - c) \cdot b \cdot u \cdot \exp(-b \cdot l). \quad (4)$$

Получить значение C_0 на практике при помощи измерителя запыленности не всегда представляется возможным. В случае же произвольного расположения измерителя по длине выработки его средние показания \bar{C} будут определяться зависимостью (2), откуда

$$C_0 - c = (\bar{C} - c) \exp(b \cdot l). \quad (5)$$

Если подставить выражение (5) в (4), получим искомое выражение в виде

$$P = (\bar{C} - c) \cdot b \cdot u,$$

которое удобно преобразовать к виду

$$P = \bar{C} \cdot \tilde{b} \cdot u, \text{ мг/м}^3\text{с} \quad \text{или} \quad P = 86,4 \cdot \bar{C} \cdot \tilde{b} \cdot u, \text{ г/м}^3\text{сутки}, \quad (6)$$

где $\tilde{b} = b \cdot \left(1 - \frac{c}{\bar{C}}\right)$ – условный коэффициент оседания пыли на единице длины выработки, м^{-1} , использование которого позволяет оперировать одним параметром вместо двух с учетом фактической значимости соотношения c/\bar{C} .

Как видим, по средним показаниям измерителя запыленности воздуха и скорости потока можно вычислить интенсивность пылеотложения в том сечении горной выработки, где установлен этот измеритель. При этом вычисляемый по априорным данным коэффициент b должен быть скорректирован с учетом фактического значения соотношения c/\bar{C} , что является существенным отличием предложенной модели от уже известных. Причем значение \tilde{b} можно сделать реальным, выполнив оперативную идентификацию модели (2) по результатам измерения содержания пыли в двух подобранных по длине выработки точках. Примечательно, что для углепородной пыли упомянутый коэффициент, по полученным нами данным, изменяется в пределах $0,015 \dots 0,03 \text{ м}^{-1}$, возрастая с увеличением плотности вещества пыли и размеров частиц.

Очевидно, что процесс взметывания уже осевшей несвязанной пыли, как дополнительный непрерывный ее источник, тоже влияет на характер изменения концентрации и способен снизить суточную интенсивность пылеотложения на примыкающих к источнику пыли участках, что должно влиять и на сроки противопопылевых мероприятий [5].

В связи с отмеченным проанализируем процесс взметывания пыли и его возможное влияние на зависимость $C = f(l)$ и, соответственно, на модели пылеотложения.

Критическая скорость воздуха $u_{кр}$, при которой начинается процесс сдувания пыли со стенок выработки, зависит от площади поперечного сечения выработки S , м^2 и определяется как $u_{кр} \geq 10,1/S$ [1]. Удельная же масса сдувания пыли с единицы поверхности зависит от квадрата скорости потока воздуха и определяется выражением [5]

$$P = a(u_{cp} - u_{кр})^B, \quad (7)$$

где $a = 1,85$, $B = 2$ – опытные коэффициенты; $u_{кр}$ – критическая скорость взметывания, принятая 1,8 м/с.

Если учесть, что процесс взметывания пыли начинается при скорости воздушного потока, превышающей 2 м/с, то количество пыли, взметнувшееся в каком-либо сечении выработки в единицу ее объема, составит

$$\gamma(l) = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{cp} < u_{кр} \\ \frac{P_B}{S_B} a (u_{cp} - u_{кр})^2, & \text{если } u_{кр} \leq u_{cp}. \end{cases} \quad (8)$$

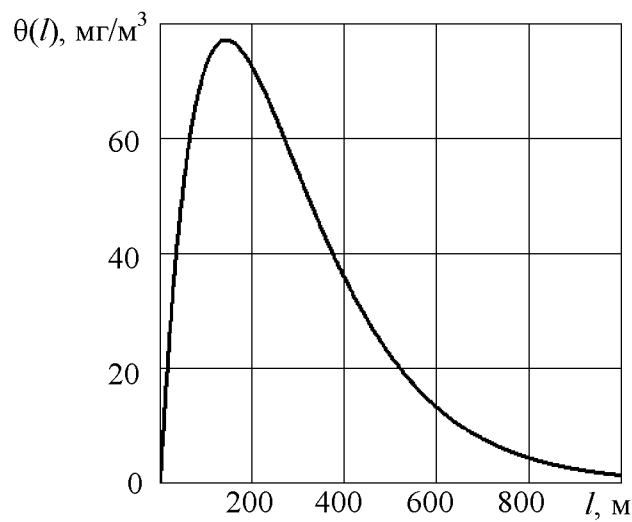
В каждом сечении выработки пыль взметывается согласно (8), и одновременно в это же сечение вместе с потоком воздуха поступает пыль, взметнувшаяся в предыдущих сечениях, причем вся взметнувшаяся пыль тоже стремится осесть. Наблюдается известный процесс массопереноса пыли, который описывается уравнением [3]

$$\frac{dC}{dt} + D \frac{d^2C}{dl^2} + u_{кр} \frac{dC}{dl} + \delta C = f(t), \quad (9)$$

где интенсивность поступления пыли $f(t)$ определяется зависимостью (8), то есть источником поступления пыли выступает взметываемая пыль, которая перед этим осела по всей длине выработки. Опустив выкладки, приведем решение этого уравнения, описывающее изменение концентрации пыли в воздухе по длине выработки из-за ее взметывания:

$$\theta(l) = \gamma(l) \frac{l}{u_{cp}} \exp(-bl). \quad (10)$$

Уравнение (10) справедливо при скорости потока, превышающей критическую для данной выработки, которая, как правило, превышает значение ~1,8 м/с. Эта величина может возрастать в зависимости от влажности. Вид зависимости (10) на участке 1000 м по длине типовой для угольных шахт выработки с площадью сечения 6,8 м², периметром 5,4 м, скоростью воздуха около 4 м/с представлен на рисунке.



Изменение содержания пыли, поступающей в воздух в результате вторичного взметывания, по длине горной выработки

Представленная зависимость характеризует содержание пыли в воздухе в том случае, когда в выработке не ведутся горные работы, и при наличии достаточного количества несвязанной пыли на стенках и подошве выработки. В рассмотренном случае максимальная концентрация взметнувшейся пыли наблюдается на удалении ~ 150 м от источника пыли. Очевидно, что это расстояние может изменяться в зависимости от скорости вентиляционной струи в выработке, но в небольших пределах.

Таким образом, модель (4) с учетом взметывания уже осевшей пыли можно представить в виде

$$C = (C_0 - c)\exp(-b \cdot l) + c + \theta(l), \quad (11)$$

которую следует использовать при повышенной (более 2 м/с) скорости потока. Причем ощутимая прибавка концентрации наблюдается при скорости 3...4 м/с.

Взметываемая в выработке пыль вторично оседает. Поэтому для получения полной картины пылеотложения на участке до 400 м необходимо исследовать динамику оседания взметнувшейся пыли. Так, изменение отложения взметнувшейся пыли Π_l на бесконечно малом участке по длине горной выработки составит

$$\Pi_l = \frac{d\theta(l)}{dl} q.$$

Если учесть, что дифференциал функции $\theta(l)$ определяется как

$$\frac{d\theta(l)}{dl} = \gamma(l) \frac{bl-1}{u_{\text{ср}}} \exp(-bl),$$

то интенсивность пылеотложения взметнувшейся пыли Π_l по длине горной выработки составит

$$\Pi_l = q \cdot \gamma(l) \frac{bl-1}{u_{\text{кр}}} \exp(-bl). \quad (12)$$

Полная интенсивность пылеотложения представляет собой сумму первичного (3) и вторичного (12) пылеотложения.

Выводы

Подводя итоги, отметим, что при наличии в горной выработке постоянно действующих источников пыли, распределенных по ее длине, в частности при работе конвейера или в результате вторичного взметывания пыли, которое возрастает с ростом скорости воздушного потока, простая экспоненциальная зависимость все более искажается. Происходит перераспределение интенсивности пылеотложения по длине выработки. При работе конвейера на некотором расстоянии от погрузочного пункта получим примерно постоянный уровень пылеотложения, который определяется упомянутой асимптотой. Если же учитывать взметывание пыли, которое можно рассматривать как распределенный по длине выработки источник пыли, то наибольшее количество отложившейся пыли в условиях высоких (более 2 м/с) скоростей воздушного потока уже приходится не на начало, а на более удаленные участки выработки. Это происходит за счет взметывания оседающей пыли по зависимости, имеющей экстремум (максимум), удаленный от первичного источника пыли. Следовательно, повышение скорости воздушного потока способствует снижению отложения пыли в начале выработки, но вместе с тем может привести к опасным скоплениям пыли на более удаленных от ее источника участках, хотя протяженность этих участков больше, а масса пылевого осадка на единице поверхности – меньше. Эти скопления не могут быть обнаружены общепринятым методом сбора пыли на подложки в 10 м от лавы. Поэтому для определения количества отложившейся пыли необходим контроль пылеотложения и в более удаленных точках выработки.

1. *Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах* / П. М. Петрухин, М. И. Нецепляев, В. Н. Качан, В. С. Сергеев. – М.: Недра, 1974. – 304 с.
2. *Голинько В. И., Колесник В. Е.* Оценка пылевзрывобезопасности горных выработок угольных шахт по содержанию пыли в воздухе // Уголь Украины. – 2001. – № 6. – С. 24–26.
3. *Колесник В. Е.* Моделирование процесса распространения пыли по длине горной выработки при постоянно действующем источнике // Науковий вісник НГА України. – 2001. – № 2. – С. 49–52.
4. *Ксенофонтова А. И. Бурчаков А. С.* Теория и практика борьбы с пылью в угольных шахтах. – М.: Недра, 1965. – 231 с.
5. *Кирип Б. Ф., Ушаков К. З.* Рудничная и промышленная аэрология. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1983. – 256 с.
6. *Дьяков В. В., Ковалев В. И.* Противопылевые вентиляционные режимы на рудниках. – М.: Недра, 1984. – 200 с.