

Безопасность труда

В. И. ГОЛИНЬКО, доктор техн. наук, **В. Е. КОЛЕСНИК**, канд. техн. наук
(Национальная горная академия Украины)

ОЦЕНКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВЫРАБОТОК ПО СОДЕРЖАНИЮ ПЫЛИ В ВОЗДУХЕ

Одна из причин аварий на шахтах, сопровождавшихся взрывами метана и пыли, — недостаточный контроль пылегазового режима [1]. При оценке взрывоопасного состояния выработок главной задачей является контроль пылеотложения, который должен выполняться согласно Инструкции по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли ДНАОП 1, 1.30—5.25—96 [2]. Проанализируем показатели пылеотложения и существующие методы его контроля.

В практике горного дела наиболее важна масса осевшей пыли в расчете на единицу объема выработки PV или в единицу времени P . Первый показатель характеризует условную концентрацию, т. е. плотность облака, когда вся отложившаяся пыль окажется во взвешенном состоянии. Он может быть использован при расчете необходимого количества инертной пыли для осланцевания. Второй характеризует скорость накопления пыли в объеме выработки и определяет периодичность применения противопылевых мероприятий. Показатель P называется интенсивностью пылеотложения и выражается так:

$$P = \frac{P_V}{t} = \frac{P_L}{tS} = \frac{P_S B}{tS}, \quad (1)$$

где B — периметр выработки, м;

t — время пылеотложения, с;

P_V и P_S — масса пыли, осевшая на единице длины и поверхности выработки, $г/м$ и $г/м^2$;

S — площадь поперечного сечения выработки, $м^2$.

Пылеотложение на стенках выработок контролируется визуально по цвету их поверхности или по наличию сухой угольной пыли. Визуальный способ носит лишь оценочный характер. Он не только субъективен, но и весьма трудоемок, поскольку протяженность выработок, подлежащих осмотру, составляет десятки километров. По этой причине на практике контроль ведется формально.

Кроме визуального существуют и такие методы контроля, как сбор пыли на подложки, измерение портативными приборами и другие [3]. Общая особенность контроля осевшей пыли в выбранных точках. Точечный принцип при горизонтальном размещении подложек или площадок для сбора обуславливает значительную ошибку измерений, поскольку пыль осаждается не только под действием силы тяжести, а и вследствие пульсаций турбулентного потока, приводящих к ее осаждению по всему периметру выработок. При этом гравитационная составляющая существенно зависит от размера частиц пыли.

На характер турбулентной диффузии запыленного потока тоже существенно влияют условия и аэродинамические параметры контролируемой выработки. Учитывая это, упомянутые средства нельзя считать оптимальными вследствие низкой достоверности результатов точечных измере-

ний. Достоверность контроля можно было бы повысить, обмерив всю поверхность вентиляционного канала или выработки с каким-то определенным шагом по периметру и длине, но это неприемлемо в производственных условиях. Кроме того, любые косвенные методы оценки массы пылевого осадка, например радиоизотопный, имеют свою достаточно большую погрешность, а результаты зависят еще и от опытности оператора.

Наиболее реальный метод — определение пылеотложения по изменению средней концентрации пыли, витающей в воздухе. Сущность его заключается в том, что пылеотложение устанавливается по разности концентраций, измеренных на границах участка с движущимся запыленным потоком [3]. В первую очередь вычисляют пылеотложение по длине выработки:

$$P_T = (C_1 - C_2)q/(l_1 - l_2), \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — концентрация пыли соответственно в двух сечениях на границах выбранного участка выработки, г/м³; l_1 и l_2 — расстояние от источника пылеобразования до указанных сечений по длине выработки, м; q — объем воздуха, прошедший между выбранными сечениями выработки, м³.

Достоинства метода — высокая точность и надежность полученных результатов. Однако при его применении необходимы длительные замеры запыленности воздуха одновременно в двух точках с определением скорости движения. Это требует разработки надежных средств непрерывного контроля содержания пыли в воздухе, а также установления по априорным данным (путем непосредственных измерений) объемного расхода или скорости запыленных потоков, т. е. создания системы автоматизированного контроля запыленности воздуха в выработках, которая решала бы и задачу пылевзрывобезопасности по фактору пылеотложения. Такая система для шахт по сравнению с базирующейся на датчиках пылеотложения [1, 4] более предпочтительна, так как предусматривает и другие вопросы пылевого контроля.

Из формулы (2) следует, что пылеотложение пропорционально количеству пыли, поступающей в атмосферу выработки за смену (сутки), т. е. зависит от пылевой нагрузки (подобно применяемой для гигиенической оценки условий труда шахтеров), которую тоже можно рассматривать как один из косвенных методов контроля. Поэтому в качестве оперативной меры возможна оценка портативными приборами или устройствами, контролирующими концентрацию пыли в воздухе. Развитие метода предполагает определение количества пыли, попавшей в течение смены в выработку, по данным измерения концентрации в одном выбранном ее сечении, и далее вычисление пылеотложения с учетом степени осаждения пыли в выработке. Реализация предполагается на основе использования портативного измерителя запыленности шахтной атмосферы ИЗША [5], который требует доработки, а именно, в нем должно накапливаться среднее значение концентрации пыли за смену или сутки:

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^n C_i / n, \quad (3)$$

где n — число текущих дискретных показаний концентрации C_i , которые прибор запоминает за сутки.

Если запоминается один отчет 4-разрядного десятичного значения концентрации примерно каждые 5 с, как предусмотрено в ИЗША, то за сутки $n = 86\,400/5 = 17\,280$ отчетов, что соответствует 259,2 кбит информации, для хранения которой потребуется 33,75 кбайт оперативной программымируемой памяти (из расчета два байта на каждое значение концентрации). Это довольно большой объем даже по меркам, учитывающим современный уровень общепромышленной электроники. Радикально сократить требуемый объем памяти позволяет рекуррентный алгоритм накопления текущей средней концентрации пыли, при которой в памяти хранится только она, номер и текущее среднее значение, рассчитанное для предыдущего отчета концентрации [6]:

$$\bar{C}_i = \bar{C}_{i-1} + (C_i - \bar{C}_{i-1})/i \text{ при } i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Для реализации такого алгоритма накопления средних в портативном приборе потребуется всего как минимум три ячейки оперативной памяти.

Следующий момент — учет степени осаждения пыли в условиях конкретной выработки. Для этого надо знать закономерность осаждения пыли на любом расстоянии l от ее источника по длине выработки. Выражение (2) представим в дифференциальной форме:

$$P_T = qdc/dl, \quad (5)$$

Из него следует, что интенсивность пылеотложения определяется изменением концентрации пыли в воздухе по длине выработки, т. е. функцией $C=f(l)$. Зависимость может быть получена теоретическим путем, что требует учета факторов, связанных с пылединамикой, поэтому более удобны для инженерных расчетов эмпирические формулы. Так, в условиях шахт Донбасса изменение запыленности воздуха в вентиляционных штреках описывается [7] формулой

$$C = C_0 / (1 + 0,03l_m), \quad (6)$$

где C_0 — концентрация пыли на сопряжении штрека с лавой, мг/м³;

l_m — расстояние по штреку от лавы, м.

Данная зависимость характеризует общее изменение концентрации пыли по длине выработки, так как получена для средних значений параметров пыли, штреков и потоков в них. Поэтому она не годится для практических расчетов.

Более универсально выражение, приведенное в работе [8]:

$$C = C_0 \exp\left[-m\sqrt{S/Q^3}l\right], \quad (7)$$

где m — опытный коэффициент, учитывающий свойства пыли и поверхности осаждения, (м/с)^{3/4};

$Q = ql \Rightarrow S$ — количество воздуха, проходящего по выработке в единицу времени, м³/с;

q — скорость движения воздуха, м/с.

Формулу (7) можно переписать в виде

$$C = C_0 \exp(-bl), \quad (8)$$

где $b = m\sqrt{S/Q^3}$ — коэффициент, характеризующий снижение концентрации пыли в воздухе при удалении от источника, м⁻¹.

Обратная величина коэффициента b равна расстоянию, на котором концентрация пыли снизится в $e = 2,7$ раза и которое на практике можно считать областью интенсивного пылеотложения. При постоянном значении b выражение (8) носит характер, подобный характеру формулы (6), но позволяет явно учитывать возможные изменения сечения выработки, скорости воздуха, а также свойства пыли и поверхности осаждения. Поскольку сечение и скорость потока определить для конкретной выработки в режиме эксплуатации несложно, то основное внимание следует обратить на коэффициент m , меняющийся при перемещении источника пыли. Его значение для вентиляционных штреков комбайновых лав, т. е. в наиболее сложном случае при движущемся источнике пыли, изменяется примерно от 0,042 до 0,07–0,08 в зависимости от положения комбайна в лаве [9], причем большие значения получены при расположении комбайна вблизи сопряжения с вентиляционным штреком, а средневзвешенное во времени $m=0,048$. Для подготовительных выработок при проходке по утлю $m=0,052$. На практике можно принять $m=0,05$, тогда для штрека с типовой площадью сечения $6,8 \text{ м}^2$ и скоростью воздуха около $1,2 \text{ м/с}$ получим $b=0,016 \text{ м}^{-1}$. Выражение (8) примет эмпирический вид

$$C = C_0 \exp(-0,016l). \quad (9)$$

Подстановка общей зависимости (8) после ее дифференцирования в формулу (5) обуславливает математическую модель изменения отложения пыли по длине выработки:

$$P_l = C_0 b q \exp(-bl). \quad (10)$$

Перейдем от этой модели к интенсивности пылеотложения согласно формуле (1) и того, что $q = vS$. Получим

$$P = C_0 b v \exp(-bl). \quad (11)$$

Следующая задача реализации метода — выбор места подвески измерителя запыленности в выработке на время рабочей смены. Наиболее достоверные результаты расчетов ожидаются при размещении измерителя в области интенсивного пылеотложения, граница которого, как отмечалось, определяется расстоянием $l=1/b$ и составляет для вентиляционного штрека от 0 до 62,5 м от лавы. Кроме того, принямая во внимание экспоненциальный характер формулы (11), следует проводить измерения в области наибольшей крутизны экспоненты, т. е. поближе к лаве, где указанная зависимость имеет минимальную чувствительность к вариации параметра b .

Инструкцией ДЦАОП 1.1.30-5.25—96 также предусмотрен контроль пылеотложения в вентиляционном штреке вблизи лавы на расстоянии 10 м от нее. Полученная для этого места интенсивность пылеотложения должна использоваться для расчета периодичности мероприятий на участке штрека, примыкающем к лаве, протяженностью 50 м; для последующих 150 м штрека она уменьшается в 3,5 раза.

Таким образом, измеритель запыленности воздуха необходимо размещать в 10 м от лавы и, очевидно, в точке средней концентрации пыли по сечению выработки, которая в незагроможденной типовой выработке находится примерно на расстоянии 0,8 м от стенки и на высоте 1,5 м. При этом средние показания будут несколько ниже, чем требуемое C_d

и с учетом формулы (8) при $l=10$ м составит $\bar{C} = C_0 \exp(-b \cdot 10)$, откуда

$$C_0 = \bar{C} \exp(10b). \quad (12)$$

Теперь определим интенсивность пылеотложения по показанном измерителя, подвешенного в выработке в 10 м от лавы на всю смену подобно манометру. Подставим в формулу (11) выражение (12): $P = C b v \text{ мг/(м}^3 \cdot \text{с)}$ или $P = 86,4 \bar{C} b v \text{ г/(м}^3 \cdot \text{сут)}$. Вычисления выполняются вручную или с помощью микропроцессора, встроеного в ИЗША. Отметим, что среднесуточная концентрация может быть получена усреднением значений, накапливаемых измерителем аппаратно согласно формуле (4) за каждую смену. Дальнейшие расчеты периодичности мероприятий по обеспечению пылевзрывобезопасности следует проводить по Инструкции [2].

В заключение уместно рассмотреть предложения по корректировке Инструкции в части расчета периодичности мероприятий. Учитывая монотонно убывающий характер интенсивности пылеотложения по мере удаления от источника пыли (в данном случае от лавы), можно сделать вывод, что расчеты, предусмотренные для 50 м и последующих 150 м вентиляционного штрека, примыкающего к лаве, опираются на несколько завышенные интенсивности пылеотложения, так как одно и то же значение принимается для всего выбранного отрезка выработки. Это оправдано для контроля методом сбора пыли на подложки из-за относительно невысокой надежности такого контроля. При контроле же предложенным методом, который изначально предполагает учет степени осаждения пыли, целесообразно вычислять средние значения интенсивности на указанных Инструкцией участках с учетом ее снижения по длине выработки.

Среднее значение интенсивности пылеотложения на участке штрека от l_1 до l_2 предлагается вычислять как интеграл функции $P=f(l)$, отнесенный к длине участка:

$$\bar{P} = (l_2 - l_1)^{-1} \int_{l_1}^{l_2} P dl. \quad (13)$$

С учетом формулы (11) для участка штрека от $l_1=0$ до $l_2=l$, выражение (13) примет вид

$$\bar{P} = C_0 v [1 - \exp(-bl)]/l. \quad (14)$$

Теперь выразим среднюю интенсивность пылеотложения через средние показания измерителя запыленности воздуха, подставив выражение (12):

$$\bar{P} = \bar{C} v \exp(10b) [1 - \exp(-bl)]/l. \quad (15)$$

По нашему мнению, при использовании приведенной методики выражение (15) следует применять для расчета периодичности мероприятий на участке штрека длиной 50 м. Подставив константы, формулу можно упростить. Для получения же среднего значения интенсивности пылеотложения на последующем отрезке длиной 150 м в формуле (13) необходимо установить пределы интегрирования от 50 до 200 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Заболотний А. Г.* Ноу-хау в системе безопасности шахтеров // Уголь Украины. — 1998. — № 10.
2. *Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах.* — К.: Основа, 1996. — Т. 1.
3. *Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах* / П. М. Петрухин, М. И. Нецензяев, В. Н. Качан, В. С. Сергеев. — М.: Недра, 1974.
4. *Ковтун Ю. С., Любимова А. И., Нецензяев М. И., Бабиченко И. Л.* Разработка автоматизированной системы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах. — Макеевка: МакНИИ, 1987.
5. *Голышко В. И., Колесник В. Е., Белозонжко В. П., Кривохижа Б. М.* Совершенствование оперативного контроля запыленности воздуха в угольных шахтах // Уголь Украины. — 1996. — № 8.

6. *Ромашенко В. Д., Игнатенко Б. В.* Адаптивное управление технологическими процессами на базе микро-ЭВМ. — К.: Вища школа, 1990.
7. *Оштин Е. И., Старков С. П.* Расчетный способ определения пылеотложения в горных выработках как основа нормализации сланцевой защиты // Вопросы безопасности в угольных шахтах. — М.: Недра, 1964. — Труды ВостНИИ — Т. 4.
8. *Дьяков В. В.* Обеспечивающее проветривание шахт // Проблемы современной рудничной аэрологии. — М.: Наука, 1974.
9. *Бойко В. А., Колесник В. Е., Днепренко Ю. А.* Оценка условий труда по показаниям стационарно установленного в горной выработке датчика запыленности // II Всесоюз. науч.-техн. конф. "Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей". Тез. докл. — М., 1988.