

УДК 622.807

**В.В. Кудряшов**

**ПРОБЛЕМЫ ПЫЛЕВОГО МОНИТОРИНГА  
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

*Изложены проблемы измерения величины взрывоопасного пылевого осадка и концентрации витающей пыли в выработках угольных шахт. Предложены пути их решения.*

*Ключевые слова: шахта, уголь, внезапный выброс, метан, геофизика, сейсмоакустика, мониторинг.*

---

**В** связи с переходом на высокопроизводительную выемку угля происходит интенсивное разрушение полезного ископаемого [1, 2]. В итоге многократно возрастает интенсивность выделения в выработки метана и пыли. Вентиляция, дегазация и предварительное увлажнение угольных пластов, орошение пыли не справляются с обилием метана и пылевых частиц, поступающих в шахтную атмосферу. Последние представляют собой потенциально опасную взрывчатую среду, усугубляющую действие взрыва газа метана. В этих условиях наряду с технологическими решениями проблемы снижения выделения и разбавления газа и пыли необходим жесткий контроль за концентрацией этих компонент шахтной атмосферы и за величиной пылеотложения в выработках.

Если проблема газового контроля в основном решается (имеются датчики на метан, определены места их установки, создана система передачи информации), то осуществление контроля за пневмокониозо- и пылевзрывобезопасным состоянием выработок встречает большие трудности. Эти трудности обусловлены сильной изменчивостью во времени и пространстве таких характеристик пыли как концентрация, дисперсный и вещественный составы. Крупность пыли, концентрация ее в воздухе и содержание в ней минеральных примесей не остаются постоянными. Они неравномерно распределяются в турбулентном вентиляционном потоке воздуха. Пылевые частицы неравномерно оседают на почве, кровле, боковой поверхности и по длине выработки [3-6]. Все изменения происходят в зависимости от расстояния до источника пылеобразования (ком-

байн, пересып, опрокидыватель и т.д.), от скорости подвигания забоя (если рассматривать концентрацию пыли и пылеотложение в вентиляционном штреке) от скорости транспортировки угля (скорости погрузки, перегрузки полезного ископаемого) от скорости вентиляционной струи, которая ограничена 4-6 м/с, и т.д.

В этой ситуации встает вопрос: что, где и как измерять, чтобы характеризовать пневмокониозобезопасные условия труда и пылевзрывобезопасное состояние выработок.

Есть еще один аспект проблемы – отслеживание технически достижимых уровней запыленности воздуха, которые обеспечиваются существующими способами и средствами борьбы с пылью.

Наиболее трудная и актуальная на данный момент проблема пылевого мониторинга – это отслеживание взрывобезопасного состояния выработок. Его следует осуществлять, непрерывно измеряя пылеотложение до достижения критического значения на участке, который принято считать взрывоопасным.

Для этого есть два пути: измерять пылеотложение по разности концентраций на заданном участке выработки (то есть по потере массы пыли на этом участке) и непосредственно по пылеотложению на датчиках массы.

Оба способа имеют достоинства и недостатки. Первый способ хорош тем, что измеряемое пылеотложение не зависит от предыстории аэрозоля: от типа источника пылеобразования, расстояния до него, изменяющегося во времени, от других источников, расположенных ниже по вентиляционной струе и т.д. Недостаток способа – это отсутствие метода непрерывного измерения массы пыли, проходящей через *все* сечение выработки.

Как показывает анализ методов измерения концентрации пыли, ни оптический, ни электрический, ни депремометрический, ни пьезометрический акустический (весовой) и даже радиоизотопный методы по разным причинам не годятся для непрерывного измерения массовой концентрации витающей пыли, а, следовательно, и для измерения массы пыли, проходящей через *все* сечение выработки [7].

Для реализации способа необходимо изыскать новые метод и приемы измерения средней концентрации пыли в сечении выработки. Это сложная задача, на которой следует сосредоточить поиск ученых и внимание лиц, заинтересованных в решении проблемы пылевзрывобезопасности в угольных шахтах.

Второй способ оценки взрывобезопасного состояния выработок весьма неопределен из-за вышеупомянутых причин, влияющих на формирование пылеотложения, особенно, когда имеет место протяженный очистной забой и скоростная выемка угля. Формирование пылевого осадка не может характеризоваться зависимостью, постоянной во времени.

При этом способе с датчиками пылеотложения дело обстоит несколько лучше. Как показывают материалы [7-9] реально могут использоваться акустические – электронные микровесы и радиоизотопные. Принцип работы первых основан на зависимости резонансной частоты колебания пластинки от ее массы. Вторые работают по принципу поглощения пылевым осадком мягкого бета-излучения. Как показано в [7], взрывоопасное пылеотложение, приходящееся на единицу поверхности выработки, соответствует максимальной поверхностной плотности осадка, измеряемой радиоизотопным методом. Процедура измерения поверхностной плотности осадка должна быть аналогична той, что принята в радиоизотопном пылемере ИКАР [9, 10].

Радиоизотопные датчики в принципе не чувствительны к воздействию механических ударов и колебаний. Однако они вынуждены функционировать с перерывами на измерение поверхностной плотности до получения сигнала об опасном пыленакоплении. При их использовании должно быть учтено оптимальное для каждой интенсивности пылеотложения отношение интервала времени накопления осадка к времени его измерения (1-2 мин.).

Для измерения пылеотложения без перерывов радиоизотопным методом [9] потребуются источники излучения, опасные для окружающих. Это делает непрерывное измерение пылеотложения радиоизотопным методом неприемлемым.

Электронные микровесы могут измерять взрывоопасное пылеотложение, но обладают тем недостатком, что они нуждаются в защите от механических ударов и вибрации, в изоляции элементов и электроники от влаги и пыли. При их использовании необходимо знать погрешность измерения непрерывно возрастающей массы пыли, должны быть решены вопросы очистки пылесадительной платформы и т.д.

Для реализации способа определения пылеотложения с использованием датчиков массы необходимо знать закономер-

ности формирования осадка во времени на протяжении выбранного потенциально опасного участка выработки, а затем установить на этом участке место для датчика (или нескольких датчиков), с тем, чтобы характеризовать пылеотложение на всем протяжении выбранного участка. Это весьма сложная задача, учитывая, что пункт замера, например, в вентиляционном штреке будет перемещаться навстречу подвиганию очистного забоя. Из-за этого распределение пылеотложения по длине и периметру выработки будет меняться.

Для обоих случаев контроля пылеотложения необходимо знать протяженность участка выработки, на котором образуется взрывоопасное количество пыли и время его накопления.

Представление об этом можно получить, используя зависимость массы  $P_l$  пыли, осевшей в вентиляционной выработке от протяженности участка  $l$  [3, 5] при неподвижном источнике пыли

$$P_l = P_0 \left[ 1 - \left( 0,875e^{-0,025l} + 0,125e^{-0,00125l} \right) \right], \quad (1)$$

где  $P_0 = sVtn$  – масса пыли, содержащейся в объеме воздуха, прошедшем через сечение  $s$  выработки (окно выработки) со скоростью  $V$  за время  $t$ ;  $n$  концентрация пыли в сечении  $s$ .

График этой зависимости представлен на рис. 1. Здесь же помещено распределение массы пыли по длине участка  $l$  в виде

$$d(P_l / P_0) / dl = 0,0218e^{-0,025l} + 0,000156e^{0,00125l}, \quad (2)$$

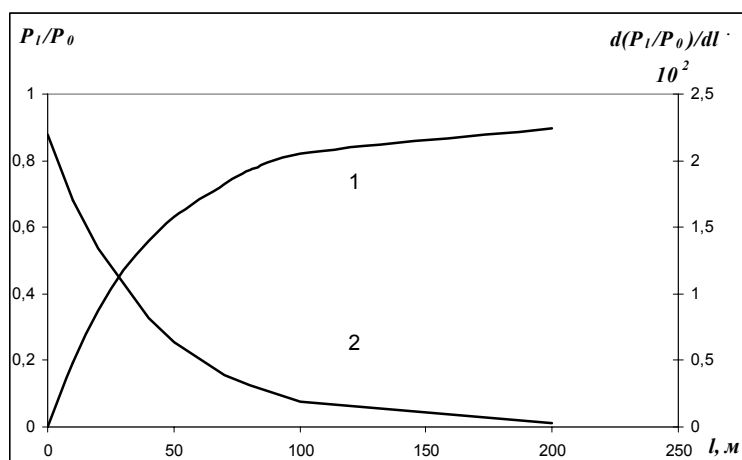
проинтегрировав которое можно определить пылеотложение на любом участке выработки.

Формулы (1), (2) важны для определения места установки датчиков и расчета пылеотложения в выработке с последующей оценкой ее взрывоопасного состояния.

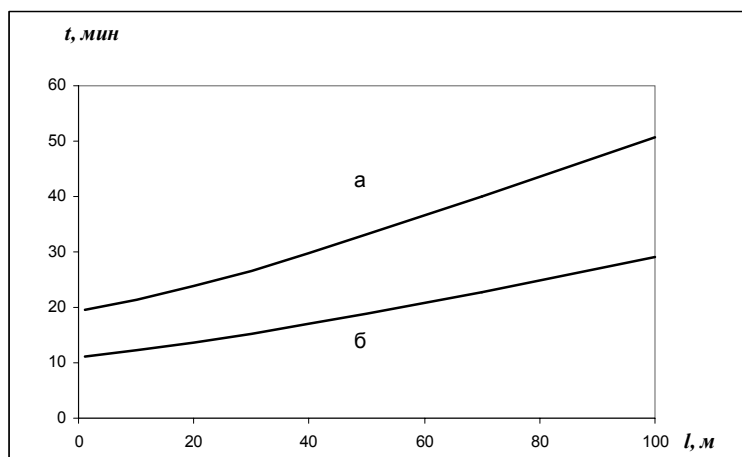
Взрывоопасную массу пыли  $P_l$ , отложившейся в выработке, можно выразить через нижний концентрационный предел взрываемости пыли  $M$ , объем и поверхность выработки, учитывая, что величина  $M$  представляет собой концентрацию пыли, которая образуется в объеме выработки длиной  $l$  в результате подъема массы отложившейся пыли

$$M = \frac{P_l}{sl} = \frac{sVtn}{sl} \left[ 1 - \left( 0,875e^{-0,025l} + 0,125e^{-0,00125l} \right) \right] \quad (3)$$

Из формулы (3) можно выразить время накопления взрывоопасного пылеотложения на участке длиной  $l$ .



**Рис. 1. Зависимость взрывоопасного пылеотложения и времени накопления взрывоопасного количества пыли от длины участка в вентиляционной выработке:** 1 – относительное пылеотложение  $P_1/P_0$  в выработке на длине участка  $l$ ; 2 – распределение массы пыли  $d(P_1/P_0)/dl$  по длине участка  $l$



**Рис. 2. Время взрывоопасного накопления пыли на участке выработки длиной  $l$  при скорости воздуха  $V = 4$  м/с:** а – нижний предел взрывчатости пыли  $M = 30$  г/м<sup>3</sup>, концентрация в начале участка  $n = 300$  мг/м<sup>3</sup>; б – нижний предел взрывчатости пыли  $M = 20$  г/м<sup>3</sup>, концентрация в начале участка  $n = 350$  мг/м<sup>3</sup>.

$$t = \frac{Ml}{Vn \left[ 1 - \left( 0,875e^{-0,025l} + 0,125e^{-0,00125l} \right) \right]} \quad (4)$$

Это время зависит от нижнего концентрационного предела взрываемости пыли  $M$ , скорости воздуха  $V$  и концентрации пыли  $n$ . Например, при  $V = 4$  м/с,  $n = 0,3$  г/м<sup>3</sup> и  $M = 30$  г/м<sup>3</sup> (кривая «а» на рис. 2)

$$t = \frac{30l}{4 \cdot 0,3 \left[ 1 - \left( 0,075e^{-0,025l} + 0,125e^{-0,00125l} \right) \right]} \quad (5)$$

Из анализа формул (4) и (5) следует, что на расстоянии  $l = 10$  м от источника пыли взрывоопасная концентрация будет образовываться за 21 минуту, на расстоянии  $l = 50$  м – за 33 минуты, а на расстоянии  $l = 100$  м – за 50,7 минуты. Для более взрывчатой пыли это время будет еще короче (кривая «б» на рис. 2).

Возникает вопрос, какой участок выработки следует считать взрывоопасным: равный 10 м, 50 м или 100 м? И на 10 метрах выработки пыль может принять участие во взрыве, и на 50 м и на 100 м.

Следующий вопрос: на каком расстоянии от источника пыли следует располагать датчик пылеотложения и в каком месте периметра боковой поверхности выработки? Как рассчитывать по его показаниям пылеопасное состояние выработки? Далее, какое значение измеряемого пылеотложения должно служить сигналом о взрывоопасном состоянии выработки?

Заметим, что выше рассматривался случай неподвижного источника пыли в вентиляционной выработке. На самом деле при высокоскоростной выемке угля, при длине лавы более 100 м и при наличии пересыпов и погрузочных пунктов, расположенных ниже по вентиляционной струе, картина с пылеотложением будет значительно сложнее. Датчик пылеотложения необходимо будет перемещать, сохраняя постоянным расстояние до источника пыли, либо перемещение источника потребуется включить в алгоритм расчета пылеотложения.

Поставленные вопросы требуют экспериментального решения по-видимому с использованием нескольких датчиков пылеотложения и концентрации пыли. Необходимо также разра-

ботать математический аппарат для расчета пылеотложения в динамике.

Решение вопроса о непрерывном измерении пылеотложения в выработках около погрузочных пунктов и пересыпов может быть более простым по сравнению с измерением пылеотложения в вентиляционных выработках из-за того, что источник пыли стационарный. Может оказаться достаточным поместить датчик в том месте, в котором пылеотложение характеризует взрывоопасное состояние наиболее опасного участка выработки. Но для этого необходимо предварительно определить это место. И это должно производиться у каждого источника пыли.

Из вышеизложенного вытекает необходимость

- установления закономерности формирования пылеотложения по длине выработки с учетом скоростной выемки угля и большой протяженности забоя;

- усовершенствования или создания новых датчиков непрерывного контроля пылеотложения и массовой концентрации пыли по всему сечению выработки;

- разработки алгоритма расчета пылеотложения по показаниям датчиков с учетом факторов, влияющих на динамику формирования пылеотложения;

- разработки методики определения мест установки датчиков для характеристики пылеотложения на заданном участке выработки;

- определения протяженности взрывоопасного участка выработки, состояние которого должно контролироваться и др.

Рассмотренные здесь вопросы во многом были решены институтами МакНИИ и ВостНИИ в 60-90-е годы прошлого столетия применительно к технологии добычи угля того времени и с учетом тех возможностей, которые представляла в то время наука и техника.

При внедрении скоростной техники выемки угля увеличилась интенсивность пылеобразования, изменился характер пылеотложения, оно стало динамичным. Все это требует новых подходов к решению прежних и возникающих задач, чему способствует современная электроника, вычислительная техника, автоматика, точное приборостроение, достижения физики аэрозолей, физики твердого тела и других наук.

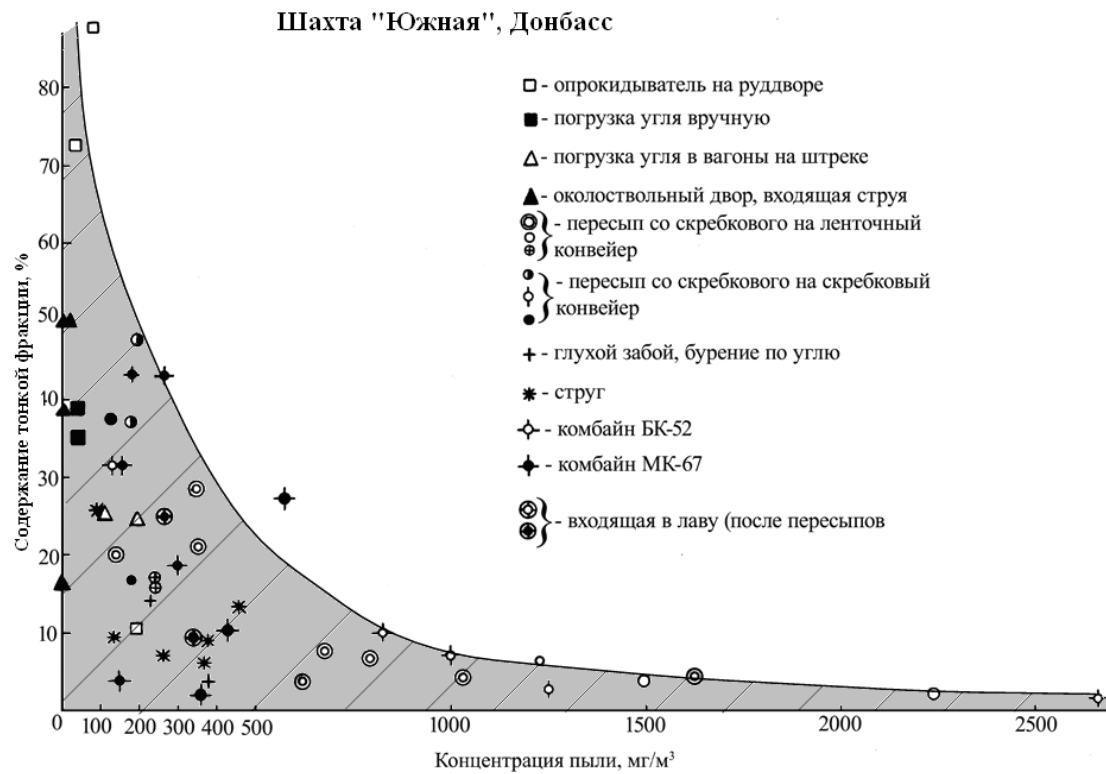
Вторая не менее важная проблема пылевого мониторинга в угольных шахтах касается измерения концентрации пылевого аэрозоля для гигиенического контроля условий труда.

Основной характеристикой пылевого аэрозоля, подлежащей гигиеническому контролю, служит массовая концентрация. Дисперсный и вещественный составы аэрозоля необходимы при обосновании ПДК и расчета пылевых нагрузок. Другие характеристики частиц (плотность, коэффициент отражения и показатель преломления света, электростатическая зарядность, способность поглощать радиоактивное излучение ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и т. д.) в той или иной мере связаны с основными. Они используются при разработке косвенных методов измерения концентрации и оценке погрешности этих методов.

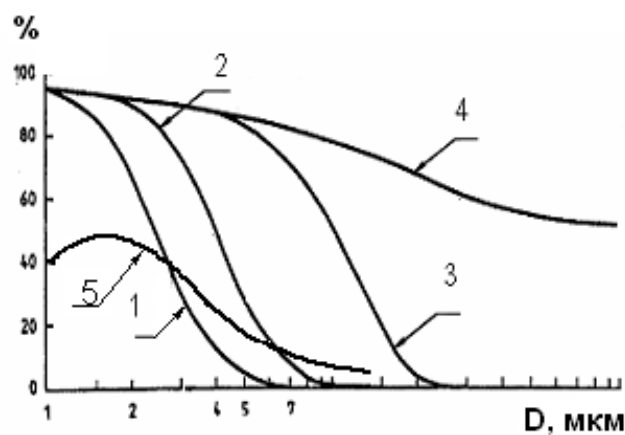
Поскольку действие пыли на организм носит накопительный характер, то измеряются не только разовые, но и осредненные за смену концентрации пыли – среднесменные концентрации. Для определения среднесменных концентраций производят разовые измерения в течение рабочей смены. Затем вычисляют среднее значение, учитывая «весовую» долю по времени каждого разового измерения [12-15]. Более информативным способом оценки пылевого фактора по результатам разовых определений концентрации является способ [16], основанный на том, что распределение концентраций пыли в течение производственного процесса подчиняется логнормальному закону. С его помощью можно рассчитывать среднесменные концентрации, а также, что весьма важно, определять максимальные значения концентраций и их «весовую» долю в общем процессе. Параметры распределения характеризуют производственный процесс по пылевому фактору: наиболее часто встречающиеся концентрации (медиана) и величину их разброса (стандартное геометрическое отклонение). Определение параметров распределения концентраций важно для оценки и исследования пневмокониозоопасности рабочих мест. Непрерывный отбор проб пыли в течение рабочей смены производится при помощи индивидуальных пылепробонаборников.

Нормативными документами [13-15] предусматривается измерение массовой концентрации витающей пыли всех размеров («по общей массе»). Однако, как показывают данные на рис. 3, концентрации пыли не равноценны по своему воздействию на органы дыхания из-за зависимости содержания в пыли





**Рис. 3. Содержание тонкой фракции в пыли, витающей в угольной шахте, в зависимости от концентрации пыли по общей массе**



**Рис. 4. Характеристика устройств для отбора:** 1 – респираторной фракции для групп повышенного риска; 2 – респираторной фракции для здоровых взрослых; 3 – фракции для торакальной области; 4 – вдыхаемой фракции; 5 – задержка частиц в нижних дыхательных путях

тонких наиболее вредных фракций от концентрации по общей массе. Поэтому оправданы рекомендации российских (ГОСТ Р ИСО 7708-2006) и европейских (ИСО 7708:1995) стандартов измерять содержание в воздухе разных фракций пыли (см. рис. 4): респираторную (частицы, попадающие в безресничные отделы легких), торакальную (частицы, попадающие в область ниже гортани) и вдыхаемую.

По оси абсцисс отложен аэродинамический диаметр частиц  $D$ , мкм; по оси ординат – процент отбираемых частиц – прошедших через разделительные устройства (циклоны и др.).

Несмотря на то, что предложенные кривые разделения не соответствуют реальной задержке частиц при дыхании (кривая 5 на рис. 4), их реализация при разработке приборов будет полезна для характеристики вдыхаемого аэрозоля при измерении концентрации различными инструментами.

Согласно упомянутым стандартам при отборе пробы должны захватываться только те частицы, которые находятся в зоне дыхания. Отбор частиц должен производиться усредненно по всем направлениям движения воздуха, а кривая отбора (4 на рис. 4) должна соответствовать зависимости (1) для скоростей потока воздуха  $u \leq 4$  м/с.

$$E_i = 50(1 + \exp[-0,06D]), \quad (6)$$

где  $E_i$  – процентное содержание частиц с аэродинамическим диаметром  $D$  (мкм), подлежащих улавливанию.

При скоростях потока воздуха  $u > 4$  м/с предлагается уравнение

$$E_i = 50(1 + \exp[-0,06D]) + 10^{-3} \cdot u^{2,75} \cdot \exp[0,055D], \quad (7)$$

которое не следует применять в отношении частиц размером  $D > 90$  мкм или при  $u > 9$  м/с.

Что касается усреднения отбора частиц по всем направлениям движения воздуха, то реализовать его можно, отбирая частицы при помощи горизонтальной щели, образуемой двумя круглыми плоскостями, в одной из которых по центру находится отверстие пробоотборного канала. Можно использовать вертикальную щель, образуемую двумя соосно расположенными цилиндрами, ведущую поток отбираемого воздуха к пробоотборной трубке, и другие приемы. Аспираторы с этими пробоотборными устройствами предназначены для измерения концентрации пыли в местах постоянного пребывания работающих. Индивидуальные пылепробонаборники с такими устройствами физически не могут быть размещены на спецодежде. Поэтому в этих приборах следует использовать вертикальную пробоотборную трубку или плоскую щель с расположением всасывающего отверстия на нижнем конце, а также циклончики прямоточные или с боковым входом. Но они не будут отбирать пыль по всем направлениям. Вопрос с условиями пробоотбора решается за рубежом, но не проработан в нашем аэрозольном приборостроении.

Учитывая трудности технического осуществления рекомендаций упомянутых стандартов, на ближайшее время следует остановиться на ранее сделанных членами бывшего СЭВ предложениях измерять концентрацию всей витающей пыли и тонкой (респиральной) фракции (см. табл. 1). Это реализовано в радиоизотопном пылемере ИКАР.

О целесообразности измерения массы тонкой и всей витающей пыли говорят данные, представленные на рис. 3.

При использовании разделительных устройств для выделения респиральной фракции необходимо отбирать массу частиц, достаточную для достоверного измерения массы каждой

Таблица 1

**Зависимость эффективности разделения пылевых частиц сепараторами (циклонами) от аэродинамического диаметра частиц  $D$ , мкм при двухступенчатом способе измерения концентрации пыли**

| Аэродинамический диаметр частиц $D$ , мкм | «Грубая» фракция, выделяемая I ступенью прибора (циклоном), % | «Тонкая» (респираторная) фракция, поступающая во II ступень прибора, % |
|---|---|--|
| 2   | не более 10   | более 90   |
| 4   | от 60 до 40   | от 40 до 60  |
| 9   | более 95  | менее 5  |

фракции. Может оказаться, что чувствительности весов будет не хватать для измерения грубой или респираторной фракции. Например, в угольных шахтах (рис. 3) массовая доля частиц респираторной фракции может составлять 95-98% при концентрации 10 мг/м<sup>3</sup> или 2-5% при концентрации 400 мг/м<sup>3</sup>. При отборе пробы в течение 30 мин с объемной скоростью, равной 20 дм<sup>3</sup>/мин, при концентрации 10 мг/м<sup>3</sup> на фильтр осядет 6 мг пыли. Масса респираторной фракции в пробе будет 5,7-5,8 мг, а грубой – 0,12-0,3 мг. При определении массы грубой фракции погрешность взвешивания на рядовых аналитических весах составит около 100%. Аналогичный результат получим в отношении респираторной фракции при концентрации пыли, равной 400 мг/м<sup>3</sup>. Выход из положения предлагается в работе [10] путем отбора всех частиц и отдельно респираторной или грубой фракции.

При оценке условий вдыхаемости пыли следует соотнести размеры частиц, витающих в турбулентном потоке (табл. 2), с размерами частиц, которые могут вдыхаться через ротовое или носовое отверстия. Так, при легочной вентиляции, равной 20 дм<sup>3</sup>/мин, линейная скорость на входе в ротовое или носовое отверстие ( $S \cong 3 \text{ см}^2$ ) будет 100 см/с. Кварцевые, угольные и частицы с плотностью  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ , витающие с такой скоростью, отсутствуют в турбулентном потоке при скорости 4 м/с и менее (см. табл. 2). Таким образом, все частицы, находящиеся в турбулентном потоке, имеющем скорость 4 м/с и менее, будут вдыхаться работающими.

Поэтому при разработке приборов линейная скорость на входе в пробоотборный канал должна быть 100 см/с или более.

Таблица 2.

**Скорость витания частиц кварца ( $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$ ), угля ( $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ ) и частиц плотности  $1 \text{ г/см}^3$  в восходящем и горизонтальном потоках воздуха по В.Н. Воронину [3]**

| Диаметр частиц $d$ , мкм | $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$               |                                      | $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$                |                                      | $\rho = 1 \text{ г/см}^3$                  |                                      |
|--------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
|                          | Скорость витания в восходящем потоке, см/с | Скорость горизонтального потока, м/с | Скорость витания в восходящем потоке, см/с | Скорость горизонтального потока, м/с | Скорость витания в восходящем потоке, см/с | Скорость горизонтального потока, м/с |
| 1                        | 0,008                                      | 0,002                                | 0,0045                                     | 0,0011                               | 0,003                                      | 0,00075                              |
| 5                        | 0,199                                      | 0,05                                 | 0,1126                                     | 0,028                                | 0,075                                      | 0,02                                 |
| 10                       | 0,795                                      | 0,2                                  | 0,450                                      | 0,11                                 | 0,3  | 0,07                                 |
| 15                       | 1,790                                      | 0,45                                 | 1,013                                      | 0,25                                 | 0,675                                      | 0,17                                 |
| 20                       | 3,180                                      | 0,8                                  | 1,800                                      | 0,45                                 | 1,20                                       | 0,3                                  |
| 30                       | 7,150                                      | 1,8                                  | 4,047                                      | 1,02                                 | 2,70                                       | 0,68                                 |
| 40                       | 12,720                                     | 3,2                                  | 7,200                                      | 1,81                                 | 4,80                                       | 1,21                                 |
| 45                       | 16,10                                      | 4,05                                 | 9,113                                      | 2,29                                 | 6,075                                      | 1,53                                 |
| 50                       | 19,875                                     | 4,97                                 | 11,25                                      | 2,81                                 | 7,50                                       | 1,87                                 |
| 60                       | 28,62                                      | 7,15                                 | 16,20                                      | 4,05                                 | 10,80                                      | 2,7                                  |
| 70                       | 38,955                                     | 9,74                                 | 22,05                                      | 5,51                                 | 14,70                                      | 3,67                                 |
| 112,15                   | 100,0                                      | 25                                   | 60,0                                       | 14,14                                | 40,0                                       | 9,43                                 |
| 149                      | –  | –                                    | 100  | 25                                   | –  | –                                    |
| 182                      | –  | –                                    | –  | –                                    | 100  | 25                                   |

Учитывая допустимый разброс объемной скорости прокачки воздуха, интервал значений линейной скорости на входе следует принять равным  $100 \div 120 \text{ см/с}$ . При такой скорости все частицы, находящиеся в воздухе при скорости потока менее  $4 \text{ м/с}$  будут попадать в пробоотборный канал.

При разработке приборов необходимо учитывать допустимые пределы погрешностей, в которых должны укладываться измеряемые величины, входящие в расчетные формулы. Если концентрация пыли  $n$  измеряется весовым (массовым) методом, то ее определяют по формуле:

$$n = \frac{P_2 - P_1}{qt} \cdot 1000, \text{ мг/м}^3 \quad (8)$$

Здесь  $P_2$  и  $P_1$  вес фильтра после и до отбора пробы, мг;  $q$  – производительность аспиратора,  $\text{дм}^3/\text{мин}$ ;  $t$  – время отбора пробы, мин.

Наибольшее значение относительной погрешности  $\Delta n$  измерения представляется в виде суммы абсолютных значений относительных погрешностей величин, входящих в формулу (7)

$$\Delta n = \frac{dn}{n} = \frac{dP_2}{P_2 - P_1} + \frac{dP_1}{P_2 - P_1} + \frac{dq}{q} + \frac{dt}{t} \quad (9)$$

Они должны быть равновеликими. При достаточном обосновании допускаются неравновеликие погрешности измерения величин, входящих в формулу (8). Это важно для разработчиков аспираторов.

Допустимая относительная погрешность измерения концентрации  $\frac{dn}{n}$  не должна превышать  $\pm 25\%$ \* в пределах концентраций, равных 1-10 ПДК, и не более 40% при концентрации 0,3 ПДК [13], или 40% при концентрации 0,5 ПДК [14, 15]. Значения погрешности внутри интервалов (0,3-1) ПДК и (0,5-1) ПДК отсутствуют.

Поскольку зависимость погрешности от концентрации в этих пределах носит гиперболический характер, то ее можно выразить в общем виде как

$$\Delta\% = \frac{a}{n} + 25 - a. \quad (10)$$

Положив  $n = 0,3$  ПДК и  $\Delta = 40\%$ , получим величину  $a = 6,43$ .

Теперь зависимость погрешности от величины  $n$ , кратной ПДК, будет

$$\Delta\% = \frac{6,43}{n} + 18,57 \quad (11)$$

Здесь концентрация  $n$  представлена в единицах ПДК.

Если  $n = 1$  ПДК, то  $\Delta = 25\%$ , если  $n = 0,3$  ПДК, то  $\Delta = 40\%$ . При  $n = 10$  ПДК  $\Delta = 19,2\%$ .

---

\* Эта погрешность принята в руководствах [13-15].

Итак, в области концентраций, меньших ПДК, следует пользоваться зависимостью (11) для определения погрешности измерения концентрации пыли.

В случае погрешности, равной 40% при концентрации 0,5 ПДК, зависимость (10) будет иметь вид

$$\Delta\% = \frac{15}{n} + 10 \quad (12)$$

Анализируя материалы по контролю запыленности шахтной атмосферы, следует обратить особое внимание на следующее.

Основной и наиболее трудной проблемой гигиенического мониторинга в части разработки приборов и методов оценки условий труда является выполнение требований ГОСТ Р ИСО 7708-2006, сближающего российские методы оценки условий труда по пылевому фактору с европейскими.

Первым этапом решения этой проблемы может быть двухступенчатый гравиметрический способ измерения концентрации витающей пыли.

Следующим этапом будет решение вопроса об условиях пробоотбора и одновременно о погрешностях измерений, о местах замеров или установки датчиков (в случае непрерывного измерения концентрации витающей пыли или пылеотложения).

Уровень развития науки и техники, особенно электроники и приборостроения, создают возможность разработки приборов различного назначения, отвечающих современным требованиям: для измерения разовых концентраций (аспираторы, экспресс-пылемеры) и среднесменных (индивидуальные пробоотборники), для непрерывного контроля запыленности атмосферы – контроля эффективности средств борьбы с пылью и для контроля пылеотложения.

Особо стоит вопрос об определении (расчете) по показаниям датчика участка, взрывоопасного по пыленакоплению.

В целом, назрела необходимость совершенствования контроля за пылевзрывобезопасным состоянием горных выработок и за гигиеническими по пылевому фактору условиями труда шахтеров. Все это должно быть отражено в будущем руководстве по практическому осуществлению пылевого мониторинга в шахтах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мальшев Ю.Н.* Уголь и альтернативная экологически чистая энергетика. – М.: Изд-во Академии горных наук. 2000. – 96 с.
2. *Кудряшов В.В.* Проблемы пылевой опасности при супердинамической технологии угледобычи. – Горный информационно-аналитический бюллетень №4. – 2002. – С. 77-78.
3. *Воронин В.Н.* Параметры вентиляционной струи для выноса пыли из горных выработок. Борьба с силикозом. Сб. статей, т. 1. – М.: Изд-во АН СССР. – 1953. – С. 97-114.
4. *Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н., Сергеев В.С.* Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах. – М.: Недра. – 1974. – 302 с.
5. *Онтин Е.И., Старков С.П.* Расчетный способ определения пылеотложения в горных выработках шахт, как основа нормализации сланцевой защиты. – В сб. Вопросы безопасности в угольных шахтах – М.: Недра – 1964. (Труды ВостНИИ, т. IV).
6. *Нецепляев В.В., Любимова А.И., Петрухин П.И. и др.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М.: Недра. – 1992. – 208 с.
7. *Кудряшов В.В.* О непрерывном контроле пылеотложения в горных выработках угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. – М.: Изд. «Мир горной книги». – 2007. – С. 245-255.
8. *Клименко А.П.* Методы и приборы для измерений концентрации пыли. – М.: Химия. – 1978. – 207 с.
9. *Поздняков Г.А., Закутский Е.Л.* Методы и средства контроля пылевзрывобезопасности угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень №12 «Аэрология». – М.: МГТУ. – 2007. – С. 58-70.
10. *Кудряшов В.В., Воронина Л.Д., Шуринова М.К., Воронина Ю.В. и др.* Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха.
11. *Balakhonov M.V., Kudryashov V.V.* ats Development and methodical qualification of radioactive isotope dustmeter IKAR. J. Aerosols v.4a, №7. 1998.
12. *Кудряшов В.В.* Пылевой аэрозоль угольных шахт и оптический метод определения концентрации пыли. Автореф. канд. дисс., М.: 1958 г.
13. *Измерение концентрации аэрозолей преимущественно фиброгенного действия.* МУ №4436-87 утв. 18.11.1987 г.
14. *Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.* Р 2.2.2006-05 М.2005, 142 с.
15. *Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности.* МУК 4.1.2468-09 утв. 02.02.2009 г.
16. *Еловская Л.Т.* Гигиеническое значение пылерадиационного фактора при работах с некоторыми торийсодержащими веществами. Автореф. докт. диссертации. М. 1974. **ГИАБ**

### Коротко об авторе

*Кудряшов В.В.* – УРАН Институт проблем комплексного освоения недр РАН, info@ipkonran.ru