

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЫ

В. В. Кудряшов¹, А. С. Кобылкин¹

¹ ИПКОН РАН, Москва, Россия

Аннотация: При осуществлении мероприятий по снижению негативных последствий от наличия угольной пыли в горных выработках применяются приборы контроля запыленности шахтной атмосферы. Разработка приборов пылевого контроля является сложной задачей, так как пыль имеет характеристики, изменяющиеся в широком диапазоне. В основе работы приборов контроля лежат различные методы измерения запыленности воздуха. В работе приведен анализ различных методов измерения запыленности воздуха. Отмечены недостатки и достоинства методов. Так одними из наиболее распространённых методов измерения запыленности воздуха в шахтах являются оптические методы, однако они имеют недостатки, связанные с точностью измерений. Следует отметить радиоизотопный метод измерения концентрации пыли с использованием мягких бета частиц. В настоящее время отечественные приборы, позволяющие производить измерение запыленности воздуха в горных выработках, имеют ряд недостатков, в частности, характеризуются высокой погрешностью измерений, что обуславливает актуальность модификации существующей приборной базы и разработку новых приборов в основе которых могут быть заложены иные принципы.

Ключевые слова: аэрология, вентиляция, угольная пыль, запыленность, пылевзрывобезопасность, шахта, датчики контроля, методы измерения запыленности.

Для цитирования: Кудряшов В. В., Кобылкин А. С. Анализ методов измерения запыленности шахтной атмосферы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10-1. – С. 29–44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_29.

Mine air dustiness measurement techniques: Review

V. V. Kudryashov¹, A. S. Kobylkin¹

¹ IPKON RAS, Moscow, Russia

Abstract: Mine air dustiness response programs use special dust control facilities. Engineering of dust control devices is a challenging problem as dust characteristics vary within wide ranges. The dust monitoring devices are designed based on different methods of air dust content measurement. This article gives a review of the air dustiness measurement methods, with their advantages and disadvantages identified. The common methods of dust content measurement in mine air are the optical techniques which are deficient for the metering accuracy. The emphasis is laid on the radioisotope technique of dust concentration determination using soft beta particles. The disadvantages of the current domestic devices meant for metering dust content of mine air include high measurement errors, which necessitates improvement of the existing equipment and engineering of new devices based on different principles.

Key words: aerology, ventilation, coal dust, dust content, dust explosion safety, mine, control sensors, methods for measuring dust content.

For citation: Kudryashov V. V. , Kobytkin A. S. Mine air dustiness measurement techniques: Review . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10-1):29–44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_29.

Введение

Запыленность атмосферы угольных шахт является одной из главных проблем при обеспечении аэрологической безопасности. Наличие угольной пыли в шахтной атмосфере снижает нижний предел взрывчатости метана, также пыль может взрываться при полном отсутствии метана [1, 2]. Пыль, попавшая в зону дыхания рабочего, приводит к развитию профессиональных заболеваний. С увеличением глубины ведения горных работ повышается вероятность проявления опасных явлений, в том числе и пылеобразования [3].

Наибольшее количество травмированных в период 2005–2019 гг. было при взрывах метановоздушной смеси с участием угольной пыли (5 аварий) – 445 чел., для сравнения: при взрывах метановоздушной смеси (22 аварий) травмировано было 136 чел. [4]. Одной из организационных причин возникновения взрывоопасных воздушных смесей является «нарушение пылевого режима шахты» [4]. К основным причинам образования источника иницирования смесей отнесено «самовозгорание угля и угольной пыли (в т.ч. в выработанном пространстве)» [4]. Следовательно, имеет место непосредственное участие угольной пыли во всех процессах взрывов в угольных шахтах с наибольшими негативными последствиями.

Состав шахтной атмосферы изменяется под влиянием протекающих технологических процессов и горно-геологических факторов [5]. Увеличение мощности проходческого и очистного оборудования приводит к возрастанию

выхода частиц угля размером 0 – 1 мм. Данная фракция относится к пыли, имеет место эффект ее самодиспергации. Поэтому необходимо контролировать параметры пылевзрывобезопасности угольных шахт в призабойной зоне и участка по мере продвижения забоя [6].

С возрастанием глубины ведения горных работ давление воздуха и его плотность увеличиваются. При выполнении технологических операций, таких как проходческие и очистные работы, происходит максимальное загрязнение шахтного воздуха газами и пылью, соответственно, на данных участках необходим особый контроль за состоянием рудничной атмосферы.

Пыль является неотъемлемой частью шахтной атмосферы. При ведении проходческих и выемочных работ в процессе разрушения полезного ископаемого и вмещающих горных пород, а также при перемещении его по горным выработкам пыль поступает в атмосферу, где находится во взвешенном состоянии, а также откладывается на почве, кровле, бортах горных выработок и на горношахтном оборудовании.

Пыль оказывает вредное воздействие на здоровье рабочих. Степень данного вредного влияния зависит от характеристик пыли (размер, форма, химический состав, наличие примесей и др.) и её состава [7–10]. Возможные негативные воздействия пыли: раздражение кожного покрова и слизистых оболочек, при попадании в дыхательные пути человека пыль вызывает заболевания дыхательной системы, также пыль снижает видимость, что приводит к травмам. Накопление пыли в легких

приводит к пневмокониозу и другим заболеваниям.

Пыль, как было отмечено ранее, представляет собой горючее и взрывчатое вещество. Она участвует во взрывах и вспышках [2, 11, 12]. Аварии, связанные с взрывами газа и пыли на угольных шахтах, приводят к катастрофическим последствиям с человеческими жертвами [13, 14].

Особенностями горючих и взрывчатых свойств угольной пыли являются:

1. Способность взрываться при отсутствии метана (CH_4);
2. Преобразование взрыва небольшого количества CH_4 во взрыв большой силы;
3. Снижение нижнего предела взрывчатости угольной пыли при нахождении в шахтной атмосфере метана;
4. Содержание большого количества CO при участии во взрыве угольной пыли [15].

Постановка задач исследования

Проведя анализ нормативно правовых документов, регламентирующих пылевзрывобезопасность шахт [16—18], можно сделать вывод о необходимости контроля двух основных параметров, связанных с пылью — это запыленность воздуха и пылеотложение в горных выработках.

Запыленность воздуха — это качественная характеристика содержания в атмосфере твердых взвешенных частиц [18]. Количественной характеристикой степени запыленности воздуха является концентрация пыли.

Массовая концентрация витающей пыли, мг/м^3 — отношение массы всех взвешенных частиц к объему смеси [18].

При использовании термина «запыленность» (воздуха, атмосферы, рудничной атмосферы, шахтной атмосферы) подразумевается массовая концентрация пыли в воздухе в едини-

цах измерения мг/м^3 . Также встречается словосочетание «концентрация пыли в воздухе», при употреблении данного словосочетания имеется в виду тоже самое, что и «запыленность».

В связи с тем, что витающая пыль, измеряемая в горных выработках угольных шахт, представляет собой большое количество мелких частиц различной формы и размера, которые, слипаясь или рассыпаясь под воздействием внешних сил, меняют размеры и форму, процесс измерения концентрации угольной пыли является трудной метрологической задачей. Присутствие в угольной пыли породных частиц также усложняет оценку запыленности воздуха. Размер частиц колеблется от 10^{-2} до 10^2 мкм, концентрация от 10^{-8} до 10^5 мг/м^3 [19].

Актуальной остается задача разработки приборов пылевого контроля, в том числе и запыленности воздуха [20, 21]. Для разработки приборов контроля запыленности воздуха необходимо установить требования, предъявляемые к ним. Требования также должны быть научно обоснованы, что является трудоемкой задачей. При разработке приборов пылевого контроля одним из первых этапов является выбор метод измерения, который будет использован.

Методы измерения запыленности шахтного воздуха

Методы измерения запыленности шахтного воздуха разнообразны. Основной причиной разнообразия является применение разных принципов действия, заложенных в работу датчика (прибора) контроля запыленности воздуха. У каждого метода измерения есть свои достоинства и недостатки, в связи с чем переход только к одному методу измерения на данный момент не возможен. Однако, учитывая современное развитие науки

и техники, можно компенсировать недостатки применяемых методов.

Разработка базовых требований к приборам контроля запыленности воздуха в шахтах позволит определить пути развития данной области науки аэрогазопылединамики, тесно связанной с практикой.

При отборе проб пыли для измерения концентрации необходимо уделять внимание представительности пробы.

Выделение частиц пыли из пылегазовой смеси может происходить методом фильтрации с использованием центробежных, инерционных и электростатических сил, а также при помощи явления термодиффузии.

Метод фильтрации запыленного воздуха основан на пропускании через специальный фильтр его определенного объема. Приборам, использующим данный метод, присущи большая объемная представительность пробы, высокая

точность при измерении среднесменной концентрации при оценке вредности пыли. К недостаткам приборов, реализующих данный метод, следует отнести длительность пробоотбора, когда необходимо измерять концентрацию на месте измерения.

В качестве фильтрующих материалов используют различные фильтры: бумажные, изготовленные из тонкого волокнистого материала, стеклянные пористые, стеклянную или минеральную вату. В России широкое распространение получили аналитические аэрозольные фильтры АФА, которые обладают малым аэродинамическим сопротивлением и высокой эффективностью выделения частиц. Для АФА в качестве фильтрующего материала используют ткани ФПП-15, ФПМ-15 и др.

Методы выделения пыли из воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1
Методы выделения пыли из воздуха
Methods of dust-and-air separation

№	Метод выделения пыли из воздуха	Достоинства	Недостатки	Примечание
1	С помощью циклона (центробежный)	Простота конструкции, компактность	Низкая эффективность при выделении пыли размером менее 10 мкм	
2	Инерционный метод	Простота конструкции	Отбор неоднородных проб	Для повышения эффективности выделения пыли из потока воздуха могут применяться различные смазывающие составы, а также увлажнения воздуха
3	С помощью электростатических сил	Высокая точность	Сложность конструкции оборудования, неприменимость в шахтных условиях	

Окончание табл. 1

№	Метод выделения пыли из воздуха	Достоинства	Недостатки	Примечание
4	С помощью поля температурного градиента (термодиффузия)	Метод высокоэффективен по захвату частиц размером от 20 до 0,2 микрона (почти 100%). Данный метод не избирателен к частицам различных размеров, вследствие чего дает достоверные результаты	Неприменимость в шахтных условиях	
5	Фильтрация	Высокая точность	Длительность пробоотбора	Один из самых распространенных методов, применяемых в приборах контроля запыленности воздуха

Разделить данные методы можно по размерам пылевых частиц, которые они эффективно выделяют из воздуха. Центробежное осаждение позволяет эффективно выделить достаточно крупные пылевые частицы, имеющие размер свыше 1 мкм, инерционный метод — более 0,5 мкм, метод фильтрации — до 0,1 мкм, с помощью электростатического метода, а также с помощью поля температурного градиента появляется возможность осадить пылевые частицы, имеющие размер до 0,01 мкм.

Методы измерения концентрации пыли

2.1 Весовой метод

Данный метод основан на измерении концентрации пыли, выделенной из запыленного воздушного потока и дальнейшего её взвешивания.

Уравнение для вычисления концентрации пыли (1) [5]:

$$C = m / Qt, \quad (1)$$

где m – масса пыли, мг; Q – расход воздуха, прокаченного через фильтр, м³/с; t – время, затраченное на отбор пробы, с.

Весовой метод обладает рядом преимуществ, основное из которых — прямое измерение массы пыли. На метод не влияет химический и дисперсный состав пыли. К недостаткам весового метода измерения концентрации пыли можно отнести трудоемкость процесса, также данным методом проводить измерения непрерывно невозможно.

Примерами приборов (аспираторов), с использованием которых концентрация пыли в воздухе измеряется взвешиванием отобранной пробы, являются АЭРА, ПП-2У, СІР-10, ДП-01 и др. (рис. 1–3).

Автоматический эжекторный рудничный аспиратор АЭРА снят с производства, одним из существенных недостатков данного аспиратора является его большая масса (8 кг).

Основным преимуществом аспиратора СІР 10 является его компактность и малый вес (габариты 175×70×45 мм, масса 300 г) Длительность непрерывного отбора проб СІР-10 достигает 40 часов.



Рис. 1. Автоматический эжекторный рудничный аспиратор АЭРА
Fig. 1. Automated mine exhaust ejector AERA

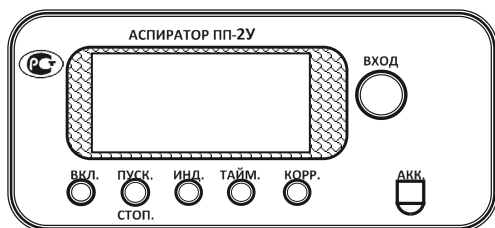


Рис. 2. Аспиратор ПП-2У, схема расположения органов управления и индикации на панели (рис. авторов)
Fig. 2. Exhauster PP-2U, schematic indication and control board (drawing by the authors)



Рис. 3. Аспиратор CIP 10
Fig. 3. Exhauster CIP 10

2.2 Радиоизотопный метод

Среди косвенных методов измерения массы пылевого осадка и концентрации пыли в шахтном воздухе особое место занимает радиоизотопный метод. Он основан на способности поглощения угольной пылью радиоактивного излучения [22].

Перед непосредственным измерением поглощения радиоактивного излучения угольной пылью её необходимо выделить из воздуха в необходимом (достаточном) количестве. Далее через осевшую пыль пропускают излучение и по его ослаблению вычисляют массу пылевого осадка.

Для применения в пылеизмерительных датчиках наиболее удобными с точки зрения конструкции и доступности являются радиоизотопы. Их можно разделить по типу излучения на α , β и γ . На основании проведенных анализов типов излучения было выбрано β -излучение как наиболее подходящее для измерения концентрации пыли [22].

Для использования в радиоизотопных пылемерах следует применять источник с изотопом C^{14} .

В основе радиоизотопного метода измерения запыленности воздуха лежит явление поглощения пылевыми частицами мягкого бета-излучения.

При его осуществлении могут быть использованы две схемы прибора. В первой схеме определяется поглощение излучения частицами пыли, взвешенными в фиксированном объеме воздуха, во втором — осажденными на фильтр или другую подложку из известного объема воздуха.

Метод измерения концентрации пыли с использованием β -частиц был реализован в приборе ИКАР ФБ-01 (рис. 4). Также данный метод реализуется в разрабатываемом пылемере (рис. 5) в ИПКОН РАН.



Рис. 4. Пылемер ИКАР ФБ-01 (рис. авторов)

Fig. 4. Dust counter IKAR FB-01 (drawing by the authors)

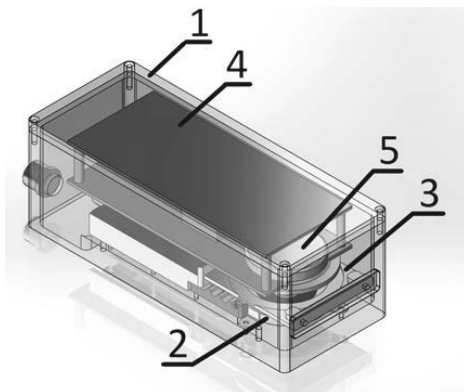


Рис. 5. Пылемер радиоизотопный: 1 – корпус, защищающий прибор от внешних воздействий, 2 – источник ионизирующих излучений, 3 – выдвижной язычок с фильтро-подложкой, 4 – печатная плата с закреплённым на ней 5 – детектором ионизирующих излучений (рис. авторов)

Fig. 5. Radioisotopic dust meter:

1 – protective housing; 2 – ionizing radiation source; 3 – sliding tongue piece with bottom layer filter; 4 – circuit plate; 5 – ionizing radiation detector (drawing by the authors)

Основным преимуществом радиоизотопного метода можно считать минимальное влияние крупности пыли и ее вещественного состава на измерения концентрации пыли.

2.3 Оптические методы

Одними из самых разнообразных методов при измерении концентрации пыли являются оптические.

Фотометрический метод

В основу фотометрического метода измерения пыли положено определение оптической плотности пылевого осадка. Отбор проб для данного метода схож с аналогичными операциями радиоизотопного и весового методов. При определении массы пыли происходит процесс фотометрирования пылевого осадка. Оптическая плотность осадка определяется с помощью измерения рассеяния (поглощения) света осадком. Интенсивность света I определяется выражением (2) [5]:

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon Cl), \quad (2)$$

где I_0 – начальная интенсивность светового потока, лм; C – концентрация пыли на фильтре; ε – показатель поглощения света приходящейся на единицу концентрации пыли; l – толщина пылевого отложения, мкм. Оптическая плотность определяется по формуле (3) [5].

$$D = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) = 0,434 \varepsilon Cl. \quad (3)$$

Точность фотометрического метода измерения концентрации пыли зависит от размера пылевых частиц и диапазона его изменения. С увеличением размеров частиц, а также при наличии в воздухе крупных и мелких частиц одновременно, уменьшается точность измерения данного метода.

Необходимо отметить один из основных недостатков фотометрического метода, связанного с тем, что оптическая плотность пылевых частиц и их цвет существенно влияют на прозрачность пылевого осадка. Данную погрешность можно уменьшить, используя свет длиной волны 0,36–0,39 микрон.

Люминесцентный метод

Люминесцентный метод измерения концентрации пыли заключается в применении фильтров, на которые

наносится флуоресцирующий раствор. Далее фиксируются изменения интенсивности флуоресцирующего излучения. Пыль, отложившаяся на фильтре, приводит к тушению флуоресценции. Зависимость между поверхностной концентрации пыли и тушением флуоресценции линейная. Её можно аппроксимировать уравнением [5]:

$$\frac{I_{0\text{фл}}}{I_{\text{фл}}} = 0,948 + 0,59C_{\text{пов}}, \quad (4)$$

где $I_{0\text{фл}}$ — интенсивность излучения флуоресценции не запылённого фильтра $I_{\text{фл}}$ — интенсивность излучения флуоресценции запыленного фильтра, $C_{\text{пов}}$ — поверхностная концентрация пыли.

К достоинствам данного метода можно отнести широкий интервал измерений концентраций (порядка 10^9), а также высокую чувствительность [5].

Абсорбционный метод

Данный метод основан так же, как и фотометрический метод, на явлении поглощения света при прохождении его через запыленный воздух.

Для повышения чувствительности приборов, основанных на данном методе (измерение малых концентраций пыли) применяют зеркальные системы, при этом измерительная база прибора, равная толщине поглощающего слоя, возрастает вдвое.

Достоинствами абсорбционного метода являются: малая трудоемкость процесса измерения, безынерционность измерений, а также полная автоматизация с возможностью измерения непосредственно в запыленной атмосфере. В качестве недостатков данного метода можно выделить влияние изменений дисперсного и химического состава витающей пыли в воздухе на результаты измерений, а также относительно малый диапазон измеряемых концентраций.

Метод интегрального светорассеяния

Метод интегрального светорассеяния посредством изменения суммарной интенсивности рассеянного потока света позволяет определять массовую концентрацию пыли. Метод высокоэффективен для измерения малых концентраций пыли.

Голографический метод

Голографический метод основан на получении фраунгоферовой голограммы. При его использовании происходит наложение дифракционной картины частицы дальнего поля и поля источника света. При использовании данного метода может быть получена информация о счетной концентрации частиц, их размерах и положении в пространстве.

Метод лазерного зондирования

На больших пространствах эффективнее применять оптические дистанционные методы, к которым относятся методы с применением лазерных радаров-лидаров. В основе метода лазерного зондирования заложено свойство частиц пыли рассеивать/поглощать испускаемые излучения.

Высокая чувствительность данного метода обусловлена большой полезной мощностью лазерного излучения в узкой полосе спектров. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость защиты от пыли оптики приборов.

К приборам, использующим оптические методы измерения концентрации пыли, относятся стационарный прибор ИЗСТ-01, стационарный оптический пылемер PL-2 (PL-3), переносной оптический пылемер TM-data (HUND, Германия) и др. (рис. 6, 7).

По данным [23] прибор ИЗСТ-01 имеет погрешность измерений, превышающую допустимые значения более чем на порядок. Также прибор

PL-2 имеет ограниченную область применения в условиях угольных шахт России.



Рис. 6. Измеритель запыленности стационарный ИЗСТ-01
Fig. 6. Station dust content meter IZST-01



Рис. 7. Пылемер PL-3
Fig. 7. Dust meter PL-3

2.4 Метод основанный на улавливании пыли водой

Особенность данного метода заключается в пропускании запыленного воздуха через воду. Далее по степени помутнения воды определяют концентрацию пыли. Помутнение воды измеряют, сравнивая интенсивность светового потока, прошедшего через загрязненную воду с интенсивностью

прошедшего через чистую. По разности интенсивностей световых потоков определяют массовую концентрацию пыли.

Контролируя объём прошедшего через воду газа, можно найти концентрацию пыли в исследуемом воздушном потоке.

В шахтных условиях повышенная влажность воздуха или наличие капельной влаги может влиять на точность измерений концентрации пыли различными методами. При использовании метода с улавливанием пыли водой влияние данного фактора на измерения исключено.

2.5 Метод механических вибраций

Метод основан на измерении изменений частоты колебаний на элементе при осаждении на нём пыли.

2.6 Метод, основанный на измерении перепада давления на фильтре (Депремометрический метод)

В основе депремометрического метода определения концентрации пыли заложено измерение изменения перепада давления при осаждении на фильтре пылевых частиц. Данный метод реализован в цифровом пылемере ПКА-01 (рис. 8).



Рис. 8. Прибор контроля запыленности ПКА-01
Fig. 8. Dust content controller PKA-01

При проходке и отработке угольных пластов сложного строения происходит изменение в химическом составе, а следовательно, и в плотности аэрозолей, что приводит к повышению погрешности измерений приборами, использующими депремометрический метод.

Область применения прибора ПКА-01 также ограничена его программным обеспечением (длительность каждого замера является переменной величиной и определяется им автоматически).

По опыту применения данного прибора [23] в шахте (Шахта имени С. М. Кирова) недостатком ПКА-01 выявлена существенная зависимость показаний прибора от изменений вещественного состава аэрозоля (водные частицы, породная или сланцевая пыль), осажденного на фильтр.

В данном методе реализован подход измерения разности давлений до и после фильтра при пропускании через него запыленного воздушного потока с постоянной скоростью. Массу осевших частиц пыли на фильтре определяют по формуле [5]:

$$m = \frac{C \cdot Q \cdot (\Delta P_0 - \Delta P)}{a}, \quad (5)$$

где C — концентрация пыли; Q — подача насоса, м³/с; ΔP_0 — перепад давления на фильтре в начальный момент времени, Па; ΔP — перепад давлений в момент времени t , Па; a — коэффициент пропорциональности.

2.7 Электрические методы

В качестве основных электрических методов измерения концентрации пыли можно выделить: емкостной, контактно-электрический, индукционный и пьезоэлектрический методы.

В основе емкостного метода лежит измерение изменения емкости конденсатора при попадании пыли между его пластинами.

Индукционный метод основан на определении индуцированного на электроде измерительной камеры заряда, который возникает при прохождении через камеру заряженной пыли.

При соприкосновении пыли с твердой поверхностью происходит их электризация, на данном принципе основан контактный электрический метод.

В основу пьезоэлектрического метода измерения запыленности воздуха положена оценка изменений частоты колебаний пьезокристалла при отложении на его поверхности пыли.

2.8 Акустический метод

Акустический метод контроля запыленности шахтной атмосферы основан на изменении величины сигнала акустического поля камеры пылемера при прохождении через камеру шахтного воздуха, содержащего пыль.

Как известно, скорость звука и длина волны λ в атмосфере зависят от физических свойств этой среды:

$$\lambda = \frac{C}{4}; \quad C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}}, \quad (6)$$

где C — скорость м/с; γ — отношения удельных теплоемкостей, P — давление, Па; ρ — плотность мг/м³.

Находящиеся во взвешенном состоянии в газовой среде частицы пыли влияют на распространение упругих колебаний в среде, изменяя её плотность, а следовательно, будут также фактором, изменяющим скорость. В зависимости от количества частиц и от их дисперсности находятся величина скорости и длина волны. Акустическое поле в камере создается излучателем колебаний с частотой от 3 до 10 килогерц.

Испытания показали, что чувствительность прибора резко повышается при работе на высоких частотах порядка 100–300 килогерц, но существующие ультразвуковые пьезоэ-

лектрические излучатели, такие как титаны бария, кальция, сегнетовая соль и другие, не дают возможности получения стабильного акустического поля.

Применение низких звуковых частот понижает чувствительность прибора, зато акустическое поле становится более равномерным и подвержено незначительным искажениям, не влияющим на показания прибора.

Обсуждение результатов

Вопросы, связанные с безопасностью угольных шахт по фактору пыль, являются одними из наиболее сложных и важных на сегодняшний день. Последствия воздействия пыли необходимо рассматривать с двух точек зрения санитарно-гигиеническая (профессиональные заболевания пылевой этиологии) и с точки зрения пылевзрывобезопасности.

Вопросы, посвященные разработке и применению средств измерения запыленности шахтной атмосферы, требуют доработки. Во-первых, необходимо разработать методику проведения измерений запыленности воздуха. Во-вторых, необходимо дорабатывать существующие приборы контроля безопасности шахт по пылевому фактору в рамках устранения недостатков применяемых в них методов измерения концентрации пыли.

Методика проведения измерений запыленности воздуха должна содержать научно обоснованные рекомендации по контролю запыленности в горных выработках.

Проведя анализ существующих методов измерения концентрации пыли, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день при разработке приборов контроля запыленности воздуха в шахтах используют три основных метода измерения: оптический, гравиметрический и депрометрический. Другие методы также требуют развития.

Наиболее простыми в реализации будут оптические и электрические датчики, но при этом они самые неточные. Достоинством данных датчиков является непрерывное отслеживание меняющихся концентраций и возможность их использования в качестве индикаторов содержания частиц в воздухе.

Более точными датчиками массового содержания пыли в воздухе являются датчики с выделением пыли на подложку (фильтр), однако такие датчики потребуют использования побудителей тяги. И в этом варианте оптические и депрометрические пылемеры будут иметь погрешность измерения, аналогичную вышеуказанным.

Для оценки запыленности воздуха наиболее привлекательными, предположительно, должны быть электрические и оптические методы [24]. Однако у данных методов есть существенные недостатки. Измеряемый сигнал пропорционален световому потоку или заряду частиц и связан с массой взвешенных частиц через удельную поверхность, что приводит к тому, что поверхность частиц пыли размером меньше 70 микрон фактически не отличается от поверхности частиц пыли размером меньше 40 мкм. Она в 1,04 раза больше, при этом масса этих частиц в 1,4 раза больше. Удельная поверхность частиц пыли размером менее 70 микрон в 1,35 раз меньше удельной поверхности частиц пыли размером менее 40 микрон. Поверхность частиц пыли размером менее 70 микрон в 1,2 раза больше поверхности пылевых частиц, имеющих размер менее 10 микрон, масса их в 3,4 раза больше, а удельная поверхность в 2,8 раз меньше.

При приёме светового сигнала от пылевых частиц необходимо учитывать наложение их друг на друга (при достаточно больших концентрациях пыли в воздухе). В этом случае

поверхность пылевых частиц в свету и поток рассеянного света будут еще меньше зависеть от массы пыли в фракциях, следовательно, с возрастанием концентрации пыли масса пылевых частиц будет расти, а световой сигнал будет меняться незначительно.

Схожее явление будет при применении электрического сигнала от частиц, пропорционального их поверхности. Электрические импульсы будут накладываться друг на друга.

Одному и тому же сигналу с датчика соответствуют различные значения массы пыли, взвешенной в воздухе в зависимости от удельной поверхности частицы (ее крупности). Сигналу $7,5 \cdot 10^{-3}$ единиц, соответствующему поверхности $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, будут соответствовать масса — 5; 10,2 и 13,6 кг в зависимости от крупности пылевых частиц и от их удельной поверхности.

Проведя расчет преодолеваемого расстояния частиц пыли от источника пылеобразования в зависимости от их характеристик и проанализировав эти данные, можно сделать вывод о том, что на расстоянии от 20 до 60 м поверхность пылевых частиц (величина сигнала, реагирующего на поверхность, оптический/электрический метод) снизится на 4,3%, а масса частиц в единице объема уменьшается на 41%. Следовательно, при измерении приборами, основанными на данных принципах, массовой концентрации пыли, не будет заметно падение концентрации в 1,4 раза на исследуемом участке горной выработки. На исследуемом участке 20—100 метров поверхность уменьшится в 1,069 раза, в то время как масса частиц пыли уменьшится в 1,74 раза.

Радиоизотопный метод измерения концентрации пыли и приборы, основанные на данном методе, не чувствительны к воздействию колебаний

и механических вибраций, что в условиях шахт и рудников весьма актуально.

Поглощение β -частиц отложившейся пылью пропорционально массе пыли и не зависит от размеров частиц и других изменяющихся свойств частиц, что также является преимуществом перед оптическими и электрическими методами измерения концентрации пыли.

При сравнительных определениях концентрации пыли радиоизотопным, весовым и другими методами установлено, что погрешность измерения радиоизотопным методом, как и весовым методом, может не превышать 15%. Преимуществами радиоизотопного метода измерения концентрации пыли по сравнению с весовым является то, что в весовом методе точность измерения падает с снижением площади фильтра, при измерении концентрации пыли радиоизотопным методом снижение площади фильтра не уменьшает точность измерения, так как р/и методом определяют массу пыли, отнесенную к единице поверхности.

В радиоизотопном методе измерения концентрации пыли площадь фильтра определяется размерами источника излучения и не превышает у серийного источника одного сантиметра квадратного. Также расход воздуха меньше, чем при измерении весовым методом, что важно при создании переносных приборов контроля.

Выводы

Принцип работы датчиков может основываться на использовании оптических, радиометрических, электрических и других свойствах частиц. При этом могут рассматриваться два варианта построения датчиков: с выделением частиц на подложку и без выделения, с измерением осадка пыли и витающих частиц.

Наиболее обоснованным для измерения массовой концентрации пыли будет пылемер, использующий поглощение мягких бета-частиц пылевым осадком, которое пропорционально массе пылевого осадка независимо от крупности частиц и других изменяющихся свойств частиц и среды. Недостатком радиоизотопного пылемера, помимо необходимости иметь побудители тяги, является использование фильтров в виде ленты для разовых измерений и для непрерывного или периодического измерения концентрации пыли. Эти же недостатки, в дополнение к уже изложенным, присущи

депрометрическому методу измерения концентрации и оптическому. Погрешность измерения концентрации пыли оптическим и депрометрическим методами можно снизить, разделяя пыль на фракции.

Отечественные приборы контроля запыленности воздуха в угольных шахтах имеют ряд недостатков, влияющих на качество проводимого контроля, что, в свою очередь, приводит к снижению безопасности. Развитие новых приборов и улучшение старых является весьма важной задачей, путем ее решения может стать развитие приборов на основе радиоизотопного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов В. Б., Подображин С. Н.* Об аварии в филиале «шахта «Есаульская» ОАО «ОУК «Южжубассуголь» // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 9–14.
2. *Валиулин С. В., Бакланов А. М., Дубцов С. Н., Замашиков В. В., Клишин В. И., Контарович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А., Куйбида Л. В.* Влияние наноаэрозольной фракции техногенной угольной пыли на горение метановоздушных смесей // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52. № 4. — С. 36–50. DOI: 10.15372/FGV20160404.
3. *Подображин С. Н.* Параметры гидродинамического воздействия на угольные пласты // Безопасность труда в промышленности. — 2010. — №5. — С. 36–38.
4. *Кабанов Е. И., Коршунов Г. И., Корнев А. В., Мяков В. В.* Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005–2019 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — (2–1). — С. 18–29. — DOI: 10.25018/0236–1493–2021–21–0-18–29.
5. *Карпов Е. Ф., Басовский Б. И.* Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах // Справочное пособие. — М.: Недра. — 1994. — 336 с.
6. *Трубицына Н. В., Подображин С. Н., Ахлестин Н. Н., Спирин С. В.* Обеспечение пылевзрывобезопасности угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2015. — № 4. — С. 6–10.
7. *Трубицын А. А., Подображин С. Н., Скатов В. В., Ворошилов Я. С., Мусинов С. Н., Трубицына Д. А.* Разработка системы мониторинга интенсивности пылеотложений и методики прогноза запыленности воздуха // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 1. — С. 6–13.
8. *Paluchamy B., Mishra D. P., Panigrahi D. C.* Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines — Generation, health impacts and control measures for cleaner production // Journal of Cleaner Production. — Volume 296. — 2021. — 126524. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126524.
9. *Gang Zhou, Jianfei Ding, Yunlong Ma, Shuailong Li, Mingguang Zhang.* Synthesis and performance characterization of a novel wetting cementing agent for dust control during conveyor transport in coal mines // Powder Technology. — Volume 360. — 2020. — Pages 165–176. — DOI: 10.1016/j.powtec.2019.10.003.

10. Ji Yinlin, Ren Ting, Wynne Peter, Wan Zhijun, Ma Zhaoyang, Wang Zhimin. A comparative study of dust control practices in Chinese and Australian longwall coal mines, *International Journal of Mining Science and Technology*. – Volume 26. – Issue 2. – 2016. – pp. 199–208 DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.12.004.

11. Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачёв А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис А. В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // *Физика горения и взрыва*. – 2017. – т. 53. – № 1. – С. 11–18.

12. Колесниченко И. Е., Артемьев В. Б., Колесниченко Е. А., Черечукин В. Г., Любомищенко Е. И. Предотвращение взрывов угольной пыли и метана в горных выработках: теория и практика // *Горная промышленность*. – 2017. – № 4. – (134). – С. 26–29.

13. Prostański D. Use of Air-and-Water Spraying Systems for Improving Dust Control in Mines, *Journal of Sustainable Mining*. – Volume 12. – Issue 2. – 2013. – pp. 29–34. DOI: 10.7424/jsm130204.

14. Кобылкин С. С., Тимченко А. Н., Кобылкин А. С. Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны // *Безопасность труда в промышленности*. – 2021. – № 3. – С. 21–27. DOI: 10.24000/0409-2961–2021–3-21–27.

15. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Медведев И. И. Рудничная аэрология. – М.: Недра. – 1978. – 440 с.

16. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 506 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по аэрологической безопасности угольных шахт».

17. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 507 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (Зарегистрирован 18.12.2020 № 61587).

18. ГОСТ Р 551752012. Атмосфера рудничная. Методы контроля запыленности.

19. Zihao Xiu, Wen Nie, Jiayi Yan, Dawei Chen, Peng Cai, Qiang Liu, Tao Du, Bo Yang. Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production // *Journal of Cleaner Production* Volume 248. – 2020. – 119197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119197.

20. Dominik Bałaga, Michał Siegmunda, Marek Kalita, Ben J. Williamson, Andrzej Walentek, Marcin Małachowski Selection of operational parameters for a smart spraying system to control airborne PM10 and PM2.5 dusts in underground coal mines // *Process Safety and Environmental Protection*. – Volume 148. – 2021. – pp. 482–494. DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.001.

21. Ворошилов Я. С., Фомин А. И. Современные методы измерения концентрации пыли // Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». – 2019. – С. 111–112.

22. Кудряшов В. В. Радиоизотопный метод в решении проблемы пылевого контроля в угольных шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № S1. – С. 343–362.

23. Романченко С. Б., Тимченко А. Н., Костеренко В. Н., Поздняков Г. А., Руденко Ю. Ф., Артемьев В. Б., Копылов К. Н. Комплексное обеспыливание // Том 6 Промышленная безопасность, книга восьмая, Библиотека горного инженера. – М. – 2016. – С. 132.

24. Кудряшов В. В. О непрерывном контроле пылеотложения в горных выработках угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2007. – № S12. – С. 245–255. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Artem'ev V. B., Podobrazhin S. N. About the accident in the branch "Mine" Esaulskaya "OJSC" OUK "Yuzhkuzbassugol". *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 8. 2005. pp. 9–14. [In Russ]
2. Valiulin S. V., Baklanov A. M., Dubcov S. N., Zamashchikov V. V., Klishin V. I., Kontorovich A. E., Korzhavin A. A., Onishchuk A. A., Paleev D. Yu., Purtov P. A., Kujbida L. V. Influence of the nanoaerosol fraction of technogenic coal dust on the combustion of methane-air mixtures. *Fizika goreniya i vzryva*. 2016. Vol. 52. no. 4. pp. 36–50. DOI: 10.15372/FGV20160404. [In Russ]
3. Podobrazhin S. N. Parameters of hydrodynamic impact on coal seams. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. no.5. 2010. pp. 36–38. [In Russ]
4. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Kornev A. V., Myakov V. V. Analysis of the causes of explosions, flares and ignitions of methane in coal mines in Russia in 2005–2019. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021. (2–1). pp. 18–29. DOI: 10.25018/0236–1493–2021–21–0-18–29. [In Russ]
5. Karpov E. F., Basovskij B. I. *Kontrol' provetrivaniya i degazacii v ugol'nyh shahtah. Spravochnoe posobie* [Control of ventilation and degassing in coal mines, reference manual]. Moscow, Nedra. 1994. 336 p. [In Russ]
6. Trubicyna N. V., Podobrazhin S. N., Ahlestin N. N., Spirin S. V. Ensuring dust and explosion safety of coal mines. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*. 2015. no. 4. pp. 6–10. [In Russ]
7. Trubicyn A. A., Podobrazhin S. N., Skatov V. V., Voroshilov Ya. S., Musinov S. N., Trubicyna D. A. Development of a system for monitoring the intensity of dust deposition and methods for predicting air dust content. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*. 2016. no. 1. pp. 6–13. [In Russ]
8. Paluchamy B., Mishra D. P., Panigrahi D. C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines Generation, health impacts and control measures for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. Volume 296. 2021. 126524. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126524.
9. Gang Zhou, Jianfei Ding, Yunlong Ma, Shuailong Li, Mingguang Zhang. Synthesis and performance characterization of a novel wetting cementing agent for dust control during conveyor transport in coal mines. *Powder Technology*. –Volume 360. 2020. pp. 165–176. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.10.003.
10. Ji Yinlin, Ren Ting, Wynne Peter, Wan Zhijun, Ma Zhaoyang, Wang Zhimin. A comparative study of dust control practices in Chinese and Australian longwall coal mines, *International Journal of Mining Science and Technology*. Volume 26. Issue 2. 2016. pp. 199–208 DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.12.004.
11. Vasil'ev A. A., Pinaev A. V., Trubicyn A. A., Grachyov A. Yu., Trocyuk A. V., Fomin P. A., Trilis A. V. What is burning in the mine: methane or coal dust? *Fizika goreniya i vzryva*. 2017. Vol. 53. no. 1. pp. 11–18. [In Russ]
12. Kolesnichenko I. E., Artem'ev V. B., Kolesnichenko E. A., Cherechukin V. G., Lyubomishchenko E. I. Prevention of coal dust and methane explosions in mine workings: theory and practice. *Gornaya promyshlennost'*. 2017. no. 4. (134). pp. 26–29. [In Russ]
13. Prostański D. Use of Air-and-Water Spraying Systems for Improving Dust Control in Mines, *Journal of Sustainable Mining*. Volume 12. Issue 2. 2013. pp. 29–34. DOI: 10.7424/jsm130204.
14. Kobylkin S. S., Timchenko A. N., Kobylkin A. S. Use of computer simulation in the selection of operating parameters for the dust extractor built into the roadheaders. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2021. no. 3. pp. 21–27. DOI: 10.24000/0409-2961–2021–3-21–27. [In Russ]
15. Ushakov K. Z., Burchakov A. S., Medvedev I. I. *Rudnichnaya aerologiya* [Mine aerology]. Moscow, Nedra, 1978. 440 p. [In Russ]

16. *Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 dekabrya 2020 g. no. 506 «Ob utverzhdenii federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Instrukciya po aerologicheskoj bezopasnosti ugol'nyh shaht»* [Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of December 8, 2020 N 506 “On the approval of federal norms and rules in the field of industrial safety” Instruction on aerological safety of coal mines”]. [In Russ]

17. *Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 08.12.2020 no. 507 «Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah» (Zaregistrirovano 18.12.2020 no. 61587)* [Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of 08.12.2020 no. 507 “On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety” Safety rules in coal mines “(Registered 18.12.2020 no. 61587)]. [In Russ]

18. *GOST R 551752012. Atmosfera rudnichnaya. Metody kontrolya zapylennosti.* [In Russ]

19. Zihao Xiu, Wen Nie, Jiayi Yan, Dawei Chen, Peng Cai, Qiang Liu, Tao Du, Bo Yang. Numerical simulation study on dust pollution characteristics and optimal dust control air flow rates during coal mine production. *Journal of Cleaner Production*. Volume 248. 2020. 119197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119197.

20. Dominik Bałaga, Michał Siegmunda, Marek Kalita, Ben J. Williamson, Andrzej Walentek, Marcin Małachowski Selection of operational parameters for a smart spraying system to control airborne PM10 and PM2.5 dusts in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 148. 2021. pp. 482 – 494. DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.001.

21. Voroshilov Ya. S., Fomin A. I. *Sovremennye metody izmereniya koncentracii pyli* [Modern methods for measuring dust concentration]. *Sbornik materialov VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye tendencii i innovacii v nauke i proizvodstve»*. 2019. pp. 111 – 112. [In Russ]

22. Kudryashov V. V. Radioisotope method in solving the problem of dust control in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015. no. S1. pp. 343 – 362. [In Russ]

23. Romanchenko S. B., Timchenko A. N., Kosterenko V. N., Pozdnyakov G. A., Rudenko Yu. F., Artem'ev V. B., Kopylov K. N. *Kompleksnoe obespylevanie* [Complex dedusting]. Tom 6 *Promyshlennaya bezopasnost'*, kniga vos'maya, Biblioteka gornogo inzhenera. Moscow, 2016. p. 132. [In Russ]

24. Kudryashov V. V. On continuous control of dust deposition in mine workings of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007. no. S12. S. 245 – 255. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Кудряшов Валерий Викторович*¹ — докт. техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаб. 2.3, kudr_ipkon@mail.ru;

*Кобылкин Александр Сергеевич*¹ — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаб. 2.3, aleksandr@kobytkin.ru;

¹ ИПКОН РАН, Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kudryashov V. V.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor, leading researcher lab. 2.3, kudr_ipkon@mail.ru; *Kobytkin A. S.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the laboratory 2.3, aleksandr@kobytkin.ru;

¹ IPCON RAS, Moscow, Russia.

Получена редакцией 30.06.2021; получена после рецензии 23.08.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 30.06.2021; received after the review 23.08.2021; accepted for printing 10.09.2021.