

УДК 622.411.52:544.77

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСПЕРСИОННОГО СОСТАВА ШАХТНОЙ КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

В.А. Родионов

Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ (196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149)

METHODOLOGICAL BASES OF STUDYING THE DISPERSION COMPOSITION OF MINE COAL DUST

Vladimir A. Rodionov

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovskiy av., Saint Petersburg, 199105, Russian Federation)

Получена / Received: 27.12.2017. Принята / Accepted: 02.02.2018. Опубликовано / Published: 30.03.2018

Ключевые слова:

угольная пыль, растровая электронная микроскопия, дисперсность пыли, оптическая микроскопия, лазерный дифракционный анализ, ситовой гранулометрический анализ, шахтная пыль, самодиспергация угольной пыли.

Key words:

coal dust, scanning electron microscopy, dust dispersion, optical microscopy, laser diffraction analysis, sieve granulometric analysis, mine dust, self-dispersing of coal dust.

Приведена методология исследования дисперсионного состава шахтной пыли, в основе которой лежат как современные наукоемкие методы, например метод растровой микроскопии, так и наиболее простые методы, например метод ситового гранулометрического анализа. В настоящее время гранулометрическому анализу уделяется большое внимание, направленное на изучение размеров и аэродинамических характеристик частиц шахтной пыли, причем методы применяются раздельно друг от друга. Поэтому в настоящей статье рассмотрены наиболее востребованные научкой методы и даны рекомендации по их совместному применению на основе полученных автором работ по изучению дисперсионного состава шахтной пыли. Кратко описаны методы растровой электронной и оптической микроскопии, рассмотрен лазерный дифракционный и ситовой гранулометрический анализы, применяемые для изучения состава каменноугольной шахтной пыли. Образцами для исследований выбрана шахтная угольная пыль, отобранная с поверхности стоек гидравлической крепи очистных забоев, а также угольная пыль, полученная методом принудительного размола образцов каменного угля различных марок и антрацита. Образцы каменного угля отобраны из рабочего пространства лавы шахт Печорского, Кузнецкого и Донбасского угольных бассейнов.

На основании комплексного всестороннего исследования методик и анализа результатов изучения дисперсионного состава приведены их основные достоинства и недостатки.

Методология исследования основана на физических методах изучения дисперсионных характеристик шахтной пыли. В связи с тем что тот или иной метод реализован в одном приборе (установке), то для получения комплексных данных предложено их объединить в наукоемкие пары.

Сочетание в парах указанного оборудования позволит всесторонне изучить не только дисперсионный состав, но и морфологию частиц пыли, в том числе, если будет поставлена такая задача, и структуру поверхности частиц пыли. В основе всех методов для получения качественных и достоверных научных результатов лежат отбор пробы и процессы подготовки образцов для исследования.

В результате проведенных экспериментальных работ для профилактики и предотвращения эндогенных пожаров и взрывов в пространстве угольных шахт автор предлагает применить комплексный подход, заключающийся в применении методов синхронного термического анализа совместно с методами изучения дисперсионного состава угольной пыли.

The methodology of investigating the dispersion composition of mine dust is presented. The methodology is based on modern science-intensive methods such as the method of scanning microscopy and simple methods such as the method of sieve granulometric analysis. Today, the granulometric analysis is given great attention aimed to study the dimensions and aerodynamic characteristics of mine dust particles. The methods are applied separately from each other. Therefore, the paper discusses the most popular science methods gives recommendations on their joint application on the basis of the author's research on the dispersion composition of mine dust. Methods of scanning electronic and optical microscopy are briefly described. Laser diffraction and sieve granulometric analyzes used to study the composition of coal mine dust are considered. That is chosen to use mine coal dust collected from the surface of hydraulic support racks of cleaning faces and coal dust obtained by the method of forced grinding of hard coal samples of different grades and anthracite as the samples for study. Samples of coal are taken from the working space of the mines of the Pechora, Kuznetsk and Donbass coal basins. Based on a comprehensive study of methods and analysis of results of studying the dispersion composition, their main advantages and disadvantages are given.

The research methodology is based on physical methods for studying the dispersion characteristics of mine dust. In connection with the fact that one or another method is implemented in one device (installation), then in order to obtain complex data it is proposed to combine them into knowledge-intensive pairs.

The combination in pairs of the equipment allows to study thoroughly both the dispersion composition and morphology of the dust particles, including the surface structure of dust particles if such a task is posed. Selection of samples and processes of preparing samples for research are in the basis of all methods used for obtaining qualitative and reliable scientific results. As a result of the experimental work carried out to prevent endogenous fires and explosions in the coal mine area, the author proposes to use a comprehensive approach consisting in applying synchronous thermal analysis methods together with methods for studying the dispersion composition of coal dust.

Родионов Владимир Алексеевич – докторант факультета подготовки кадров высшей квалификации (моб. тел.: +007 921 325 83 97, e-mail: 79213258397@mail.ru).

Vladimir A. Rodionov – Doctoral student at the Faculty of the Highest Qualification Personnel Training (mob. tel.: +007 921 325 83 97, e-mail: 79213258397@mail.ru).

Введение

Анализ современных работ в области техносферной безопасности показал, что аварийные ситуации на объектах горнопромышленного комплекса России, и прежде всего на угольных шахтах, продолжают занимать главное место среди наиболее опасных явлений при ведении подземных горных работ [1, 2]. Кроме того, несмотря на имеющиеся и разрабатываемые в отрасли нормативно-технические мероприятия, направленные на повышение безопасности производства, чрезвычайные ситуации, связанные с гибелью шахтеров и приостановкой/прекращением эксплуатации шахт, происходят раз в пять лет, а если посмотреть динамику, то количество крупных резонансных аварий по сравнению с предыдущим десятилетием увеличилось в два раза [3–8].

Для предотвращения чрезвычайных ситуаций на производстве в ряде угольных компаний разрабатываются новые стандарты организации, направленные на обеспечение безопасности, например, в АО «Сибирская угольная энергетическая компания» разработан «Устав боя с опасными производственными ситуациями» [9]. Однако в ситуации постоянного развития горного оборудования в сторону повышения его производительности, переноса добычных и проходческих работ на более глубокие горизонты, и как следствие, меняющихся, в основном в худшую сторону, горно-геологических и горнотехнических условий, предпринимаемых мер явно недостаточно. На наш взгляд, в связи с ростом нагрузки на забой и увеличением глубины добычи происходит рост несчастных случаев по таким опасным факторам, как метан и угольная пыль, и не учитывать их вклад в возникновение чрезвычайных ситуаций нельзя. Необходимо периодически исследовать физико-химические и взрывопожароопасные свойства как гибридных метанугольных смесей,

так и угольной пыли. Считаем, что особое внимание необходимо уделять угольной и углепородной пыли, взрывопожароопасные свойства которой постоянно, особенно с переходом на нижележащие горизонты, изменяются. Кроме того, изменение дисперсионного состава шахтной пыли может привести к незащищенности органов дыхания шахтеров традиционными средствами защиты. Данные факты подтверждаются в работах [10–14]. Кроме того, в работе [15] установлено, что угольная пыль склонна к самодиспергации, а факт изменения дисперсионного состава пыли в сторону уменьшения размера частиц играет важную роль в процессе автокаталитического самовозгорания, которое может привести к пожару или взрыву метанугольной смеси.

С учетом вышеизложенного считаем, что обеспечение взрывопожарной безопасности производства в целом и угольной шахты в частности не может быть решено без совершенствования способов профилактики и предотвращения взрывов угольной пыли, основанных на законах химической кинетики и термодинамики и ряда других физико-химических характеристиках шахтной пыли. Выдвинутое нами утверждение выработано на основе анализа результатов научно-исследовательских работ, изложенных в [1, 9, 11, 12, 16–22]. Следует отметить, что основные усилия необходимо сосредоточить на всестороннем изучении химических процессов, протекающих как на поверхности, так и внутри каждой частицы. Такой подход является продолжением и углублением исследований шахтной пыли, выполненных С.Б. Романченко, который изучал размеры и аэродинамические свойства пылевых аэрозолей. Основные результаты изложены в работах [15, 23 и 24].

Цель работы

Цель работы – разработать методологию исследования дисперсионного состава шахтной

каменноугольной пыли, учитывающую современные (инновационные) достижения науки и техники, позволяющие всесторонне изучить как геометрические, так и физико-химические характеристики частиц шахтной пыли и выявить наиболее информативные и эффективные экспресс-методы её анализа.

Объект исследования

Объектом исследования служили:

- 1) образцы шахтной пыли, отобранные с поверхности гидравлических стоек крепи лавы (согласно рекомендациям [23]);
- 2) образцы каменного угля Печорского угольного бассейна (каменный уголь марки Ж), Кузнецкого угольного бассейна (каменный уголь марок Ж, Г и ДГ) и Донецкого угольного бассейна (антрацит), отобранные из рабочего пространства лавы;
- 3) диспергированные образцы каменного угля указанных выше марок.

Методы и методики исследования

При выполнении данной научно-исследовательской работы приняли во внимание сведения, изложенные в работах [22–29]. С учетом приведенной в них научно-технической информации применили следующие методы исследования дисперсионного состава шахтной пыли:

1. Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ).
2. Микроскопический метод гранулометрического анализа.
3. Ситовой метод гранулометрического анализа.
4. Лазерный дифракционный анализ дисперсных материалов.

При выполнении научно-исследовательской работы по методу растровой электронной микроскопии применялся растровый электронный микроскоп TESCAN (РЭМ) с системой рентгеноспектрального микроанализа. При

работе с РЭМ руководствовались методикой производителя оборудования и данными, изложенными в работах [15, 30].

Анализ дисперсионного состава пыли методом микроскопии выполнялся на микроскопе серии LEICA DM 4000. Для визуализации различных по дисперсности образцов пыли, в соответствии с рекомендациями производителя, использовали соответствующие методики работы с комплексом (микроскоп LEICA DM 4000 + прикладная программа обработки информации Image Scope Color), а также учитывали опыт других исследователей [15, 23, 24, 31–33].

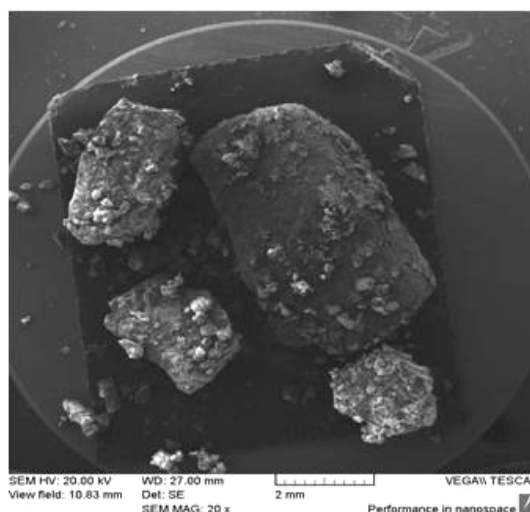
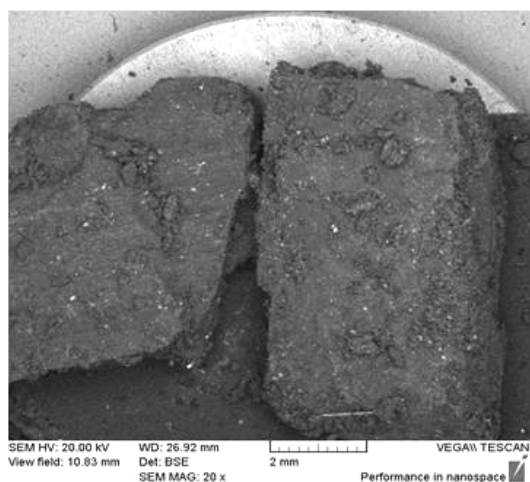
Дисперсионный анализ каменноугольной и углепородной шахтной пыли проводили с помощью ситового анализатора AS 200 RETSCH и набора сит RETSCH.

Для лазерного дифракционного анализа применяли дифракционный анализатор Malvern Mastersizer 2000 по методу, изложенному в работах [23, 30 и 33–39].

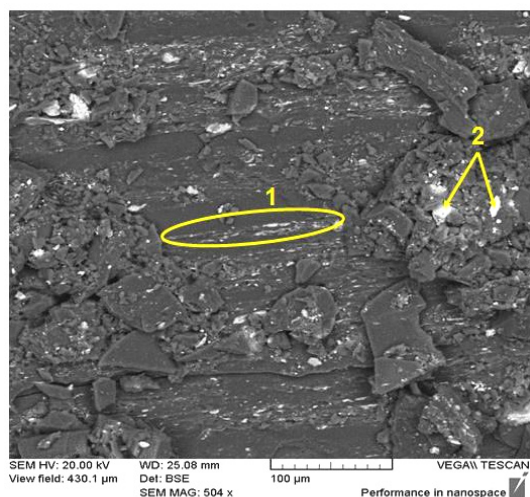
Результаты и их обсуждение

На рис. 1–3 представлены изображения исследуемых образцов каменноугольной пыли, полученные методом растровой электронной микроскопии. Результаты визуализированы с помощью микроскопа TESCAN VEGA с системой рентгеноспектрального микроанализа.

Прикладное программное обеспечение позволяет обрабатывать получаемые изображения в автоматическом режиме в соответствии с поставленными оператором задачами. Система рентгеноспектрального анализа позволяет определять химические элементы «зоны прицела». В нашем случае данная опция позволила найти местонахождение кремния в угле (внутреннее пространство области 1 на рис. 1). Нами также было установлено, что визуально видимые белые зоны – это вкрапления и прослойки кремния в угле (см. рис. 1, б), а обозначенные стрелками участки являются породной пылью (см. рис. 1, б зона 2).



a



б

Рис. 1. Образцы каменного угля с углеродной пылью на поверхности: *a* – при увеличении в 20 раз; *б* – при 504-кратном увеличении область одного из образцов каменного угля марки Ж: в выделенной области *1* – прослойки/вкрапления кремния; *2* – светящиеся частицы – порода

Основной особенностью методики исследования являются пробоотбор и пробоподготовка, проводимые общеизвестными стандартными методами, например, взятие пробы для анализа осуществляли методом квартования.

На рис. 1, *a* представлены частицы каменного угля марки Ж, приклеенные к подложке, закрепленной на рабочих столиках микроскопа. Даже при 20-кратном увеличении отчетливо видны находящиеся на поверхности образцов более мелкие частицы пыли. На рис. 1, *б* показан увеличенный в 504 раза фрагмент поверхности одного из образцов. Структура изучаемого образца слоистая и неоднородная, в зоне *1* показаны прослойки кремния, обнаруженные и установленные методом рентгеноструктурного анализа, а показанные стрелками светлые участки *2* являются породной пылью.

На представленном на рис. 2, *a* образце при увеличении в 1000 раз видны частицы породной пыли, такое увеличение недостаточно для анализа поверхности частиц. При увеличении в 5000 раз отчетливо становится видно, что по поверхности частицы проходит трещина. Мы можем предположить, что из-за наличия такого рода трещин процесс окисления может проходить практически по всему объему угольной частицы.

Мы считаем, что процессы самодиспергации и все ускоряющегося окисления в условиях неудовлетворительного теплообмена в конечном итоге приведут к самовозгоранию. Ввиду сложности детального изучения физико-химических процессов, приводящих к тлению и самовозгоранию шахтной пыли, актуальность всестороннего изучения пылеугольных частиц различными методами несомненна, что подтверждается авторами работ [11–13, 15, 22–24, 32, 38, 39].

Из данных визуализации образцов шахтной пыли, представленных на рис. 1–3, видно, что

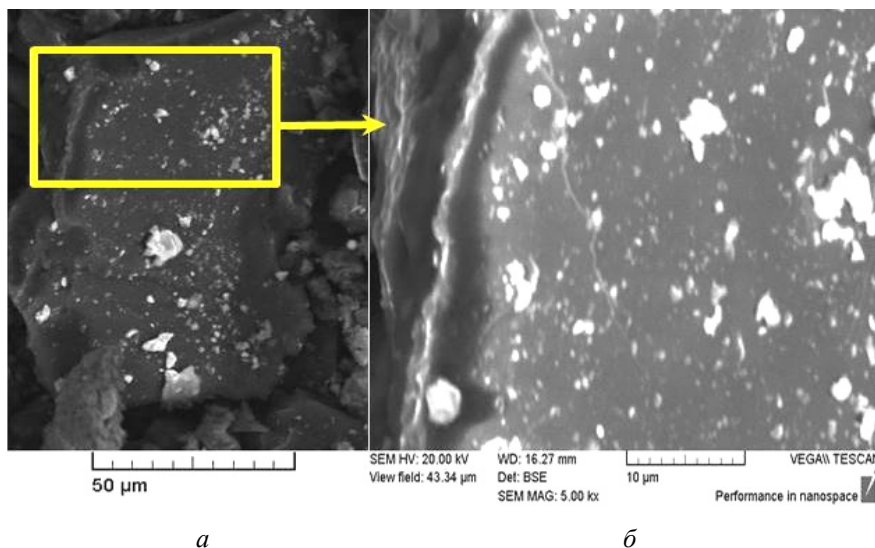


Рис. 2. Частицы угольной пыли при увеличении в 1000 раз (а) и 5000 раз (б)

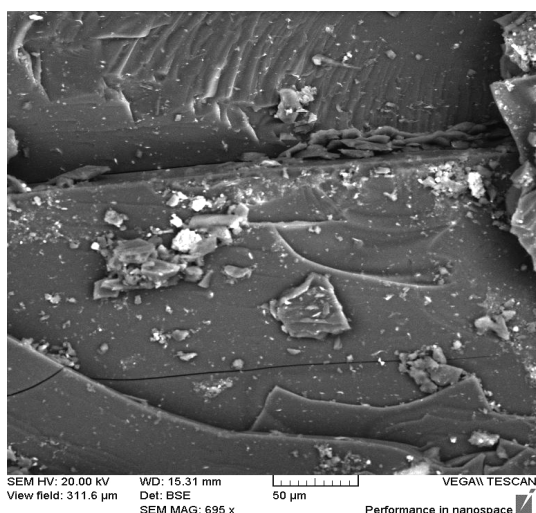


Рис. 3. Поверхность образца каменного угля марки Д при увеличении в 695 раз

для изучения внешнего вида, структуры и формы частиц достаточно увеличения до 700 крат. При таком увеличении также можно проанализировать поэлементно интересующую нас область поверхности образца, т.е. определить химический элемент в структуре образца. Таким образом, анализ изображений, некоторые из которых представлены в этой статье, показал, что увеличение более 700 крат необходимо при более детальном изучении структуры и морфологии образца. Однако для создания представительной (доказательной)

базы, свидетельствующей о значительном количестве пылевых углепородных частиц размером менее 5 мкм, например, как показано на рис. 3, нужно увеличение в 1000 и 5000 раз, увеличение более 5000 раз необходимо только для изучения внутренней структуры, т.е. изучения структуры частиц пыли и включений.

На основании проведенных нами с помощью растровой электронной микроскопии исследований можно сделать следующие выводы.

Достоинства: метод является инновационным и информативным, удовлетворяющим практически все потребности по исследованию не только дисперсионного состава каменноугольных и угольнопородных частиц, но и их морфологии.

Недостатки:

1) недостатком метода является высокая стоимость оборудования и его обслуживания, т.е. наличие его только в крупных и/или передовых высших учебных заведениях, научно-исследовательских институтах и лабораториях;

2) высокие требования к квалификации персонала, работающего на оборудовании;

3) для получения качественных результатов необходимо проводить исследования, требующие тщательной подготовки образцов и строгого соблюдения методики работы на РЭМ.

Выполнение данного условия нужно для того, чтобы в зависимости от получаемых результатов вносить в процесс анализа те или иные изменения. Дополнением метода растровой электронной микроскопии, только для целей дисперсионного анализа, является микроскопический метод исследования гранулометрического состава образцов шахтной пыли.

Изучение дисперсионного состава каменноугольной и шахтной пыли проводили на микроскопе LEICA DM 4000, оборудованном цифровой камерой. Полученные изображения обрабатывали в прикладном программном обеспечении Image Scope Color. Некоторые полученные нами результаты представлены на рис. 4 и 6. На рисунках приведены примеры оптического изображения микроскопа, обработанного программными методами. Такая обработка необходима для проведения статистического и геометрического анализа частиц пыли. Пример результатов обработки данных приведен на рис. 5.

Ниже представлен снимок частиц угольной пыли, отобранных с гидравлической стойки механизированной крепи добычного участка угольной шахты и обработанных в специализированной программе, после чего был сделан анализ размеров частиц.

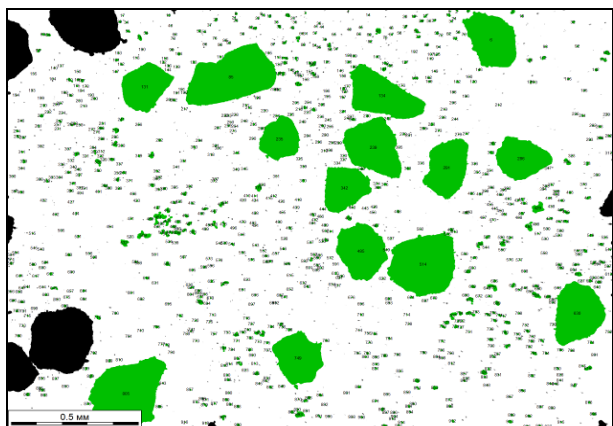


Рис. 4. Пример анализа изображения в программном обеспечении Image Scope Color (на снимке приведена шкала 0,5 мм)

В данном случае на рис. 4 представлен промежуточный результат анализа изображения видимого поля исследуемого образца фракционного состава 140–200 мкм. Несмотря на то что при проведении ситового анализа отводилось статическое электричество, а также была взята навеска 100 г, на фото мы видим многочисленные пылеватые частицы значительно меньшего размера, чем частицы исследуемого фракционного состава.

Частицы, расположенные на границе снимка и частицы (см. рис. 4) в левом нижнем углу, соприкасающиеся с ними, анализу не подвергались. В данном случае при проведении анализа и сопоставлении данных снимка и изображения в окулярах микроскопа можно принять решение о разделении частиц между собой. Исследователь непосредственно может в окулярах микроскопа и на экране монитора проверить, является ли изображение конгломератом частиц или же это одна частица. Микроскопический метод исследования более трудоемкий в обработке, чем другие методы (РЭМ и лазерный дифракционный анализ). Оптический метод микроскопического анализа необходимо применять в зависимости от конкретных задач в качестве основного или вспомогательного при исследовании частиц шахтной пыли. В качестве примера ниже показан результат программной обработки одного снимка угольной пыли. Прикладное программное обеспечение к оптическому микроскопу LEICA DM 4000, Image Scope Color, позволяет получать комплексные характеристики каменноугольной пыли в виде данных, представленных в таблице. С помощью программного комплекса можно измерить не только эквивалентный диаметр, но и другие геометрические характеристики образцов (длину, ширину, площадь и т.д.). Анализ полученных данных проводится в автоматическом режиме, т.е. производилась математическая обработка полученного массива данных, и результаты определения минимального

и максимального размера частиц, дисперсии и среднеквадратичного отклонения сводятся в таблицу, пример которой показан ниже (рис. 5).

Для получения достоверных данных в зависимости от размера частиц рекомендуется исследовать не менее 500 частиц. Достаточным количеством считается число частиц, равное 2500 шт. [23, 26, 34, 38]. Результаты дисперсионного анализа для одной и той же фракции, но с подсчетом

Измеряемый признак	Диаметр экв.
Кол-во измерений	869
Минимальное значение	0,0228 мм
Максимальное значение	0,923 мм
Среднее значение	0,0787 мм
Дисперсия	0,00346 мм ²
Среднеквадратичные отклонения	0,0588 мм

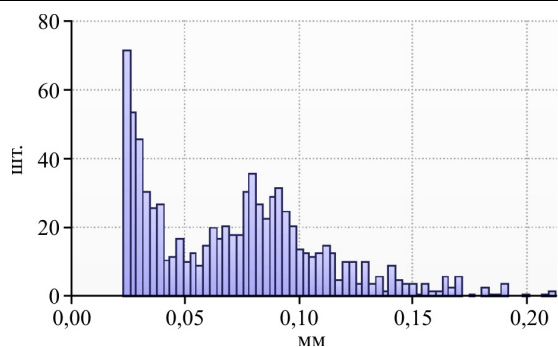


Рис. 5. Пример таблицы дисперсионного отчета

разного количества частиц представлены на рис. 6.

На основании проведенных нами с помощью оптической микроскопии исследований можно сделать следующие выводы.

Достоинства:

1) метод является достаточно информативным, удовлетворяющим практически все потребности по исследованию не только дисперсионного состава каменноугольных и угольнопородных частиц, но и их морфологии. Вышеперечисленные достоинства достигаются наличием специальных объективов, позволяющих увеличивать частицу в 50, 100, 200, 400 и 600 раз; исследовать частицу в различном свете; высоким разрешением цифровой видеокамеры и возможностями специализированной программы для обработки изображений Image Score Color;

2) доступность обучения работе с методикой на оборудовании и использования программного обеспечения;

3) практический опыт работы изучения частиц пыли показал, что в некоторых случаях, а именно при всестороннем изучении частиц размером более 63 мкм (для марок Ж, ГЖ более

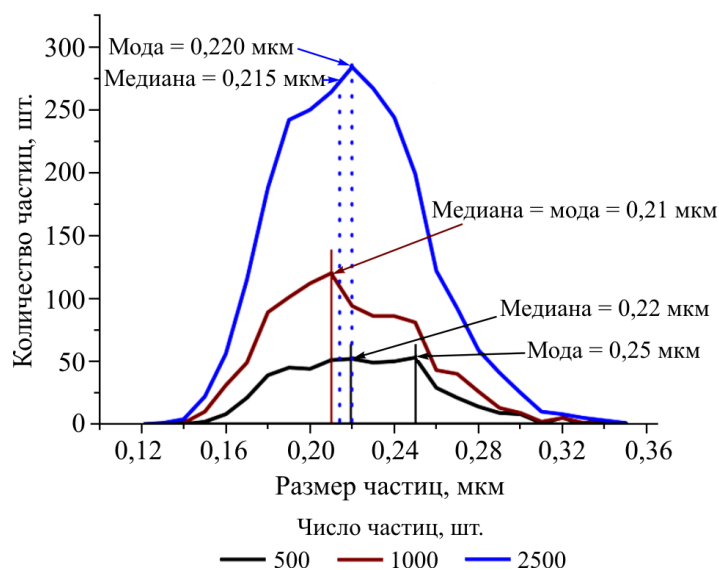


Рис. 6. Динамика изменения результата дисперсионного анализа в зависимости от числа частиц

100 мкм), вместо микроскопа можно применить цифровой фотоаппарат высокого разрешения, оборудованный макрообъективом и, используя программу обработки изображений Image Scope Color, получить в ряде случаев даже лучшие результаты, чем на микроскопе. При исследовании частиц каменноугольной шахтной пыли автор дополнительно к оптическому микроскопу LEICA DM 4000 применил цифровой фотоаппарат Sony alfa-5000, макрообъектив Sony 30mm f/3.5, макро- и светодиодную подсветку Aputure Amaran AHL-N60. Кроме вышерассмотренного оборудования, для изучения фракций более 100 мкм использовался цифровой USB-микроскоп Digital Microscope с 5-мегапиксельной камерой и 300-кратным увеличением.

Недостатки:

- 1) имеющиеся ограничения по исследованию фракций менее 63 мкм;
- 2) для получения качественных результатов требуется время, необходимое для наработки навыков и алгоритма работы;
- 3) большая трудоемкость, требуется получить и обработать до 2500 шт. пылинок, для чего необходимо сделать около 200 снимков.

На третье место по информативности мы поместили ситовой метод гранулометрического анализа, потому что его так или иначе часто используют в качестве подготовительного, перед проведением исследований образцов с использованием электронного или оптического микроскопов.

В частности, с помощью данного метода нам удалось установить, что для рассматриваемых в данной статье марок угля различных месторождений на долю фракций менее 140 мкм приходится более 50 % от массы отсева. Основные результаты представлены на рис. 7.

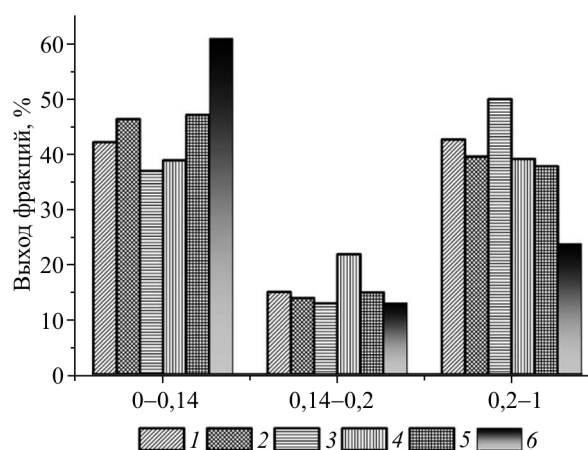


Рис. 7. Результаты ситового гранулометрического анализа каменноугольной пыли дисперсностью менее 1 мкм

Из данных, приведенных на рис. 7, видно, что в зависимости от размолоспособности каменного угля на долю крупных фракций дисперсностью 0,2–1,0 мм приходится от 26 до 50 %, фракций 0,14–0,2 мкм – от 12 до 20 % и остальное приходится на фракции 0–0,14 мкм, т.е. 37–60 %.

Выполненный нами в ходе научно-исследовательской работы гранулометрический анализ позволил сделать следующие выводы.

Достоинства:

- 1) доступность оборудования и простота его применения;
- 2) возможность получения результата только с помощью набора сит, т.е. вручную;
- 3) выполнение гранулометрического анализа как сухим, так и мокрым способом.

Недостатки:

- 1) качественный дисперсионный анализ невозможен, возможен только рассев на определенные фракции;
- 2) гранулометрический анализ сухим способом применим только для фракций дисперсностью от 63 мкм, проведение гранулометрического анализа методом сухого ситового отсева при дисперсности

менее 63 становится нецелесообразным по трудозатратам и достоверности получаемых результатов.

На четвертом месте по количеству решаемых задач стоит лазерный дифракционный анализ, который проводили с помощью лазерного дифракционного анализатора Malvern Mastersizer 2000 и программного обеспечения к нему. Первоначальному лазерному дифракционному анализу подвергли фракцию дисперсностью 0–200 мкм. В дальнейшем выполнили ситовой гранулометрический анализ, т.е. произвели рассев по фракциям 0–45, 45–63, 63–94, 94–125, 125–140 и 140–200 мкм и проанализировали каждую фракцию отдельно. Результаты представлены на рис. 8.

Метод, реализуемый с помощью Mastersizer 2000, необходим на стадии отработки режимов выполнения ситового гранулометрического анализа, он служит своеобразным паспортом качества ситового рассева пробы.

С его помощью необходимо определять максимальную массу пробы, подвергаемую расसेву, и подбирать оптимальный режим работы ситового анализатора. В первом случае это позволит уменьшить количество мелких фракций, а во втором случае, при правильном подборе вибрационных и ударных усилий анализатора, уменьшит число переориентировавшихся частиц большего размера, проскочивших через отверстия сита.

На основании опыта работы на Malvern Mastersizer 2000 можно сделать следующие выводы.

Достоинства:

1) освоить работу на оборудовании может любой исследователь, т.е. отметим предельную простоту необходимых при выполнении анализа операций;

2) высокоинформативный и достоверный метод, поскольку исследуются не единичные частицы, а объем пробы, в котором таких частиц может быть более чем 10^{12} шт.;

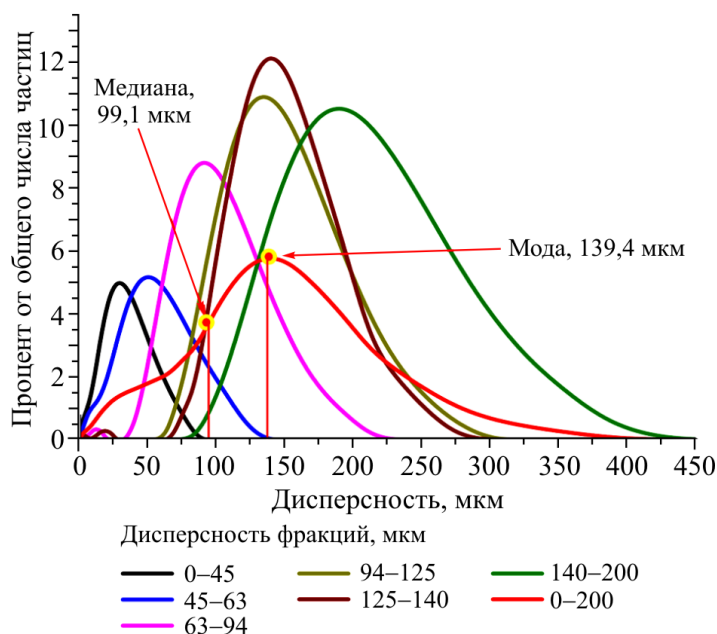


Рис. 8. Графическое отображение результатов дисперсионного анализа каменноугольной пыли антрацита, выполненного с помощью Malvern Mastersizer 2000

3) возможность проведения анализа как сухого вещества, так и в виде золя (частицы в водной среде). Применение «мокрого» анализа особенно актуально при исследовании дисперсионного состава шахтной или каменноугольной пыли фракций размером менее 63 мкм;

4) наиболее простой способ оценки качества и отработки методики выполнения ситового гранулометрического анализа, позволяющий в разы уменьшить трудозатраты на проведение дисперсионного анализа пылинок по сравнению с микроскопическим методом исследования.

К недостаткам метода следует отнести то, что с его помощью можно исследовать только дисперсионный состав частиц (размер), и поэтому он выступает как альтернативный метод определения дисперсионного состава. Гранулометрический анализ может быть применен как контрольный метод анализа размера частиц.

Для каждого из рассмотренных выше методов дисперсионного анализа существует своя методика, описанная в руководстве по эксплуатации оборудования, но начальный этап работы по определению дисперсионных и других характеристик шахтной (углепородной) каменноугольной пыли для всех методов один.

Начальным этапом проведения любой научно-исследовательской работы являются пробоотбор и пробоподготовка.

Отбор проб шахтной пыли осуществлялся согласно рекомендациям, изложенным в [23], а именно с поверхностей гидравлических стоек механизированной крепи лавы. Отобранные пробы загружались на месте (в рабочем пространстве лавы) в герметичные контейнеры. После закрытия контейнера контакт с внешней средой невозможен,

т.е. доступ воздуха внутрь контейнера был исключен. Пробоподготовка включала в себя внешний осмотр пробы после вскрытия контейнера, сушку в автоклаве до равновесного состояния и ситовой рассев. Анализировали пробы, прошедшие через сито с диаметром отверстий 1 мм. При проведении исследований на растровом электронном микроскопе рассев проб не проводили, так как в нашем случае в нем не было необходимости.

Выводы

1. На основании выполненных нами с помощью различных методов изучения дисперсионного состава шахтной пыли научно-исследовательских работ считаем, что в основу методологии всестороннего изучения шахтной пыли должна быть положена компиляция двух взаимодополняющих друг друга методов. На наш взгляд, такими парами могут быть:

– лазерный дифракционный анализ + микроскопический метод исследования; в данном случае достоверно будут изучены как дисперсный состав, так и структура пылинок;

– ситовой гранулометрический метод + микроскопический метод исследования. Сочетание этих методов так же, как и в предыдущем случае, позволит всесторонне изучить шахтную пыль, отличие между ними только в большем количестве операций по получению достоверной информации (может потребоваться проанализировать до 250 снимков), т.е. в трудоемкости.

2. Исследования дисперсионного состава пыли показали, что в целях профилактики и предотвращения как возникновения эндогенных очагов, так и взрывов метаноугольных аэродисперсных смесей дополнительно к методам исследования

дисперсного состава и свойств шахтной пыли необходимо применить комплексный подход. Таким подходом, позволяющим ответить на вопросы химической кинетики и термодинамики, так или иначе отвечающих за

процессы горения и взрыва, возникающие в том числе и в пространстве угольных шахт, является компиляция возможностей дисперсного анализа и синхронного термического анализа.

Библиографический список

1. Метанопылевая опасность рудничной атмосферы / И.Е. Колесниченко, В.Б. Артемьев, Е.А. Колесниченко, Е.И. Любомищенко // Уголь. – 2017. – № 9. – С. 26–31. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-9-26-31.
2. Анализ проблем угольной отрасли / А.С. Баранова, А.Е. Охрименко, А.П. Столярова, Н.А. Стенина [Электронный ресурс] // Россия молодая: IX Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, 18–21 апреля 2017 г. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/index.htm> (дата обращения: 28.10.2017).
3. Кулаков Г.И. Аварии, связанные с газодинамическими проявлениями на шахтах, и уровень квалификации ИТР угольных шахт Кузбасса // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 2, № 3. – С. 104–109.
4. Толченкин Ю.А., Чекветадзе Ф.А., Разумняк Н.Л. Роль переподготовки руководителей и специалистов в повышении промышленной безопасности на шахтах отрасли // Уголь. – 2007. – № 10. – С. 41–44.
5. Стась Г.В., Шейнкман Л.Э., Смирнова Е.В. Риск возникновения аварий при возобновлении добычи бурых углей в подмосковном бассейне // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 1. – С.61–71.
6. Воздвиженская А. Причина не за горами. Смертность на угольных шахтах в нашей стране выросла вдвое // Российская газета – Федеральный выпуск № 7208 (42) [Электронный ресурс]. – <https://rg.ru/2017/02/28/smertnost-na-ugolnyh-shahtah-v-grossii-vyrosla-vdvoe.html> (дата обращения: 04.12.2017).
7. Литвинов А.Р., Коликов К.С., Ишхнели О.Г. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010–2015 годах // Вестник научного центра. – 2017. – № 2. – С. 6–17.
8. О нормативной базе по взрывозащите горных выработок угольных шахт / В.С. Шалаев, Ю.В. Шалаев, Г.В. Ляховский, Н.Ф. Флоря // Уголь. – 2016. – № 7. – С. 34–37. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-7-34-37
9. К существенному повышению безопасности производства на предприятиях «СУЭК» (от «Карты боя» – к «Уставу боя» с опасными производственными ситуациями) / В.Б. Артемьев, В.В. Лисовский, В.А. Галкин, И.Л. Кравчук // Уголь. – 2016. – 9. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-9-4-9
10. Джигрин А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Прогнозирование взрывов газа и пыли в угольных шахтах // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 4. – С. 38–42.
11. Хорошилова Л.С., Тараканов А.В., Хорошилов А.В. Причины взрывов метана и угольной пыли в шахтах Кузбасса // Вестник научного центра. – 2012. – № 2. – С. 187–191.
12. Джигрин А.В., Исаев И.Р., Мясников С.В. Оценка и прогнозирование взрывоопасных

ситуаций в горных выработках угольных шахт / Нац. науч. центр горн. пр-ва – Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского. – М., 2010. – Вып. 336: Проблемы разработки угольных месторождений. – С. 101–110.

13. Энергетические и химические закономерности взрывов угольной пыли в шахтах / Е.А. Колесниченко, В.Б. Артемьев, И.Е. Колесниченко, Е.И. Любомищенко // Горная промышленность. – 2012. – № 1. – С. 24–30.

14. Мохначук И.И. Проблемы безопасности на угле добывающих предприятиях // Уголь. – 2008. – № 2. – С. 21–26.

15. Романченко С.Б. Самодиспергация угольной пыли – принципиально новый эффект, выявленный методом лазерных исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 7. – С. 378–385.

16. К вопросу о методике определения участия угольной пыли во взрыве метановоздушной смеси / Д.С. Хлудов, С.В. Оленников, С.Н. Мусинов, А.В. Неведров, С.П. Субботин // Вестник научного центра. – 2014. – № 2. – С. 150–155.

17. Предотвращение распространения взрывов метана и пыли в угольных шахтах / Лилиана Медич Пейч, Хавьер Гарсия Торрент, Ниевез Фернандез Аньез, Хорзе Мартин Молина Эскобар // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 307–312. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.307

18. Chunmiao Y., Chang L., Gang L. Coal dust explosion prevention and protection based on inherent safety // Journal Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 26. – P. 1517–1525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2333

19. Technology news 515 – float coal dust explosion hazards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/>

[works/pdfs/2006-125.pdf](https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2006-125.pdf) (дата обращения: 04.12.2017).

20. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах»: Приказ Ростехнадзора от 6 ноября 2012 года № 634 (с изменениями на 22 июня 2016 года) [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902381011> (дата обращения: 04.12.2017).

21. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах»: Приказ Ростехнадзора от 14.10.2014 № 462 [Электронный ресурс]. – URL: <http://minjust.consultant.ru/files/12732> (дата обращения: 04.12.2017).

22. Исхаков Х.А., Счастливец Е.Л., Кондратенко Ю.А. Выделение пыли из рядовых углей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 12. – С. 194–198.

23. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах. – М.: Горное дело, 2011. – 255 с.

24. Романченко С.Б. Комплексные исследования фракционного состава угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 12. – С. 128–142.

25. Particle size analysis: 6 methods used for particle size distribution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.studyread.com/particle-size-analysis> (дата обращения: 04.11.2017).

26. Particle size analysis John N. Staniforth and Kevin M.G. Taylor [Электронный ресурс]. – URL: <https://clinicalgate.com/particle-size-analysis/#S0105> (дата обращения: 04.11.2017).

27. Ajit Jilavenkatesa, Stanley J. Dapkunas, Lin-Sien H. Lum. Particle size characterization // Materials Science and Engineering Laboratory. NIST Recommended Practice Guide [Электронный ресурс]. – URL: http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/NIST_SP9601.pdf (дата обращения: 04.11.2017).
28. Yuez L et al. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face // *Int J Min Sci Technol.* – 2017. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.019
29. Occupational safety and health guideline for coal dust (Less than 5 percent SiO₂). Occupational Safety & Health Administration, U.S. Department of Labor [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2007-title29-vol6/pdf/CFR-2007-title29-vol6-sec1910-1001.pdf> (дата обращения 20.08.2017).
30. Cross-sectional scanning tunneling microscopy and spectroscopy of passivated III-V heterostructures / S. Gwo, A.R. Smith, K.-J. Chao, C.K. Shih, K. Sadra, B.G. Streetman // *Journal Vacuum Science and Technology.* – 1994. – Vol. A12, № 4. – P. 2005–2008. DOI: 10.1116/1.578997
31. Кременов О.Г. Дисперсный состав пыли в атмосфере воздухоподающих и вентиляционных выработок угольной шахты // *Вестник Научного центра.* – 2016. – № 3. – С. 110–117.
32. Рогалис В.С., Павленко М.В., Шилов А.А. Сочетание воздействия угольной пыли и радиации на здоровье шахтеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* – 2016. – № 3. – С. 109–120.
33. Best practices for dust control in coal mining / J.F. Colinet, J.P. Rider, J.M. Listak, J.A. Organiscak, A.L. Wolfe // *Information Circular 9517, DHHS (NIOSH) Publication No. 2010–110* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/workshops/pdfs/2010-110.pdf> (дата обращения: 20.08.2017).
34. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH / M.J. Sapko, E.S. Weiss, K.L. Cashdollar, I.A. Zlochower // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* – 2000. – Vol. 13, iss. 3–5. – P. 229–242. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00038-8
35. Applied study on dust reduction and control technology with high pressure air jet spray / Shuai Wu, Sheng-qiang Yang, Jian-Bo Wang, Jie Liu // *Journal of Coal Engineering.* – 2011. – 43(4). – P. 64–66.
36. du Plessis J.J.L. Active explosion barrier performance against methane and coal dust explosions // *Int J Coal Sci Technol.* – 2015. – 2(4). – P.261–268. DOI:10/1007/s40789-015-0097-7
37. Ratnesh Trivedi, Chakraborty M.K., Tewary B.K. Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of Western Coalfields Limited, India // *Journal of Scientific & Industrial Research.* – 2009. – Vol. 68. – P. 71–78.
38. Research on characteristic parameters of coal dust explosion / Weiguoa Cao, Liyuana Huang, Jianxinb Zhang, Sen Xu, Shanshana Qiu, Feng Pan // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 45. – P. 442–447. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.183
39. Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагрева и беспламенного горения / В.Г. Игишев, П.А. Шлапаков, С.А. Хаймин, С.А. Син // *Вестник Научного центра.* – 2015. – № 4. – С. 55–59.

Reference

1. Kolesnichenko I.E., Artem'ev V.B., Kolesnichenko E.A., Liubomishchenko E.I. Metanopylevaia opasnost' rudnichnoi atmosfery [Hazardous methane-dust mine atmosphere]. *Ugol'*, 2017, no.9, pp.26-31. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-9-26-31.
2. Baranova A.S., Okhrimenko A.E., Stoliarova A.P., Stenina N.A. Analiz problem ugol'noi otrasli [Analysis of the problems of the coal industry]. *Rossiiia molodaia: IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchennykh*, available at: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/index.htm> (accessed 28 October 2017).
3. Kulakov G.I. Avarii, sviazannye s gazodinamicheskimi proiavleniiami na shakhtakh, i uroven' kvalifikatsii ITR ugol'nykh shakht Kuzbassa [Mine accidents related to gas-dynamic manifestations and the engineering personnel skill level at Kuzbass coal mines]. *Interespo Geo-Sibir'*, 2013, vol.2, no.3, pp.104-109.
4. Tolchenkin Iu.A., Chekvetadze F.A., Razumniak N.L. Rol' perepodgotovki rukovoditelei i spetsialistov v povyshenii promyshlennoi bezopasnosti na shakhtakh otrasli [Role of retraining of heads and experts in increase of industrial safety on mines of branch]. *Ugol'*, 2007, no.10, pp.41-44.
5. Stas' G.V., Sheinkman L.E., Smirnova E.V. Risk vozniknoveniia avarii pri vozobnovlenii dobychi burykh uglei v podmoskovnom basseine [Evaluating risk of arising accidents by underground mining brown coal]. *Izvestiia Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, iss.1, pp.61-71.
6. Vozdvizhenskaia A. Prichina ne za gorami. Smertnost' na ugol'nykh shakhtakh v nashei strane vyrosla vdvoe [The reason is not far away. Mortality in coal mines in our country doubled]. *Rossiiskaia gazeta*, federal'nyi vypusk no.7208 (42), available at: <https://rg.ru/2017/02/28/smertnost-na-ugolnyh-shahtah-v-rossii-vyrosla-vdvoe.html> (accessed 04 December 2017).
7. Litvinov A.R., Kolikov K.S., Ishkhneli O.G. Avariinost' i travmatizm na predpriatiiakh ugol'noi promyshlennosti v 2010-2015 godakh [Accident and injury at coal industry enterprises in 2010-2015]. *Vestnik Nauchnogo tsentra*, 2017, no.2, pp.6-17.
8. Shalaev V.S., Shalaev Iu.V., Liakhovskii G.V., Floria N.F. O normativnoi baze po vzryvozhachite gornyykh vyrabotok ugol'nykh shakht [On normative base for explosion protection of coal mine workings]. *Ugol'*, 2016, no.7 pp.34-37. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-7-34-37
9. Artem'ev V.B., Lisovskii V.V., Galkin V.A., Kravchuk I.L. K sushchestvennomu povysheniiu bezopasnosti proizvodstva na predpriatiiakh "SUEK" (ot «Karty boia» k «Ustavu boia» s opasnymi proizvodstvennymi situatsiiami) [Towards essential labor safety enhancement in "SUEK" enterprises (from the "Rattle planning map" to the hazardous production events "Rattle Charter")]. *Ugol'*, 2016, 9. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-9-4-9
10. Dzhigrin A.V., Isaev I.R., Miasnikov S.V. Prognozirovanie vzryvov gaza i pyli v ugol'nykh shakhtakh [Forecasting gas and dust explosions in coal mines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2010, no.4, pp.38-42.
11. Khoroshilova L.S., Tarakanov A.V., Khoroshilov A.V. Prichiny vzryvov metana i ugol'noi pyli v shakhtakh Kuzbassa [Reasons of methane and coal dust explosions in Kuzbass

mines]. *Vestnik Nauchnogo tsentra*, 2012, no.2, pp.187-191.

12. Dzhigrin A.V., Isaev I.R., Miasnikov S.V. Otsenka i prognozirovaniye vzryvoopasnykh situatsii v gornykh vyrabotkakh ugol'nykh shakht [Estimation and prediction of explosive situations in mine workings of coal mines]. *Natsional'nyi nauchnyi tsentr gornogo proizvodstva – Institut gornogo dela im. A.A. Skochinskogo*. Moscow, 2010, iss.336: Problemy razrabotki ugol'nykh mestorozhdenii, p.101-110.

13. Kolesnichenko E.A., Artem'ev V.B., Kolesnichenko I.E., Liubomishchenko E.I. Energeticheskie i khimicheskie zakonomernosti vzryvov ugol'noi pyli v shakhtakh [Energy and chemical characteristics of explosions of coal dust in mine]. *Gornaia promyshlennost'*, 2012, no.1, pp.24-30.

14. Mokhnachuk I.I. Problemy bezopasnosti na ugle dobyvaiushchikh predpriiatiakh [Security on coal production enterprises]. *Ugol'*, 2008, no.2, pp.21-26.

15. Romanchenko S.B. Samodispergatsiia ugol'noi pyli – printsipial'no novyi effekt, vyivlennyy metodom lazernykh issledovaniy [Self-dispersion of coal dust is a fundamentally new effect, revealed by the method of laser studies]. *Gornyy informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no.7, pp.378-385.

16. Khludov D.S., Olennikov S.V., Musinov S.N., Nevedrov A.V., Subbotin S.P. K voprosu o metodike opredeleniia uchastiia ugol'noi pyli vo vzryve metanovozdushnoi smesi [On the method of determining the participation of coal dust in a methane-air mixture explosion]. *Vestnik Nauchnogo tsentra*, 2014, no.2, pp.150-155.

17. Liliana Medich Peich, Khav'er Garsiia Torrent, Nieves Fernandez An'ez, Khorze Martin Molina Eskobar. Predotvrashchenie

rasprostraneniia vzryvov metana i pyli v ugol'nykh shakhtakh [Prevention of the spread of methane and dust explosions in coal mines]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol.225, pp.307-312. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.307

18. Chunmiao Y., Chang L., Gang L. Coal dust explosion prevention and protection based on inherent safety. *Journal Procedia Engineering*, 2011, vol.26, pp.1517-1525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2333

19. Technology news 515 – float coal dust explosion hazards. Technology news. NIOSH Publication No. 2006-125, Mining Safety and Health, National Institute for Occupational Safety and Health, CDC, available at: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2006-125.pdf> (accessed 04 December 2017).

20. Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoi bezopasnosti “Instruktsiia po lokalizatsii i preduprezhdeniiu vzryvov pylegazovozdushnykh smesei v ugol'nykh shakhtakh” [On the Approval of Federal Standarts and Rules in the Field of Industrial Safety “Instruction on the Localization and Prevention of Explosions of Dust-and-Air Mixtures in Coal Mines”]. Prikaz Rostekhnadzora ot 6 noiabria 2012 goda no.634, available at: <http://docs.cntd.ru/document/902381011> (accessed 04 December 2017).

21. Ob utverzhdenii Federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoi bezopasnosti “Instruktsiia po bor'be s pyl'iu v ugol'nykh shakhtakh” [On the Approval of Federal Standarts and Regulations in the Field of Industrial Safety “Regulations for Combating Dust in Coal Mines”]. Prikaz Rostekhnadzora ot 14.10.2014 no.462, available at: <http://minjust.consultant.ru/files/12732> (accessed 04 December 2017).

22. Iskhakov Kh.A., Schastlivtsev E.L., Kondratenko Iu.A. Vydelenie pyli iz riadovykh

uglei [Dust extraction from ordinary coals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)*, 2009, no.12, pp. 194-198

23. Romanchenko S.B., Rudenko Iu.F., Kosterenko V.N. Pylevaia dinamika v ugol'nykh shakhtakh [Dust dynamics in coal mines]. Moscow, Gornoe delo, 2011, 255 p.

24. Romanchenko S.B. Kompleksnye issledovaniia fraktsionnogo sostava ugol'noi pyli [Complex investigations of the fractional composition of coal dust]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)*, 2010, no.12, pp.128-142.

25. Particle size analysis: 6 methods used for particle size distribution, available at: <https://www.studyread.com/particle-size-analysis> (accessed 04 November 2017).

26. Particle size analysis John N. Staniforth and Kevin M.G. Taylor, available at: <https://clinicalgate.com/particle-size-analysis/# S0105> (accessed 04 November 2017).

27. Ajit Jillavenkatesa, Stanley J. Dapkunas, Lin-Sien H. Lum. Particle size characterization, available at: http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/PSA/NIST_SP9601.pdf (accessed 04 November 2017).

28. Yueze L et al. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *Int J Min Sci Technol*, 2017, DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.019

29. Occupational safety and health guideline for coal dust (Less than 5 percent SiO₂). Occupational Safety & Health Administration, U.S. Department of Labor, available at: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2007-title29-vol6/pdf/CFR-2007-title29-vol6-sec1910-1001.pdf> (accessed 20 August 2017).

30. Gwo S., Smith A.R., Chao K.-J., Shih C.K., Sadra K., Streetman B.G. Cross-sectional scanning tunneling microscopy and spectroscopy of

passivated III-V heterostructures. *Journal Vacuum Science and Technology*, 1994, vol.A12, no.4, pp.2005-2008. DOI: 10.1116/1.578997

31. Kremenev O.G. Dispersnyi sostav pyli v atmosfere vozdukhopodaiushchikh i ventiliatsionnykh vyrabotok ugol'noi shakhty [Disperse composition of dust in the atmosphere the air supply and ventilation of mine workings in coal mines]. *Vestnik Nauchnogo tsentra*, 2016, no.3, pp.110-117.

32. Rogalis V.S., Pavlenko M.V., Shilov A.A. Sochetanie vozdeistviia ugol'noi pyli i radiatsii na zdorov'e shakhterov [The combination of exposure to coal dust and radiation on the health of miners]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)*, 2016, no.3, pp.109-120.

33. Colinet J.F., Rider J.P., Listak J.M., Organiscak J.A., Wolfe A.L. Best practices for dust control in coal mining. Information Circular 9517, DHHS (NIOSH) Publication No. 2010-110, available at: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2010-110.pdf> (accessed 20 August 2017).

34. Sapko M.J., Weiss E.S., Cashdollar K.L., Zlochower I.A. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, vol.13, iss.3-5, pp.229-242. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00038-8

35. Shuai Wu, Sheng-qiang Yang, Jian-Bo Wang, Jie Liu. Applied study on dust reduction and control technology with high pressure air jet spray. *Journal of Coal Engineering*, 2011, 43(4), pp.64-66.

36. Plessis du J.J.L. Active explosion barrier performance against methane and coal dust explosions. *Int J Coal Sci Technol*, 2015, 2(4), pp.261-268, DOI:10/1007/s40789-015-0097-7

37. Ratnesh Trivedi, Chakraborty M.K., Tewary B.K. Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of

Western Coalfields Limited, India. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2009, vol.68, pp.71-78.

38. Weiguoa Cao, Liyuana Huang, Jianxinb Zhang, Sen Xu, Shanshana Qiu, Feng Pan. Research on characteristic parameters of coal dust explosion. *Procedia Engineering*, 2012, vol.45, pp.442–447. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.183

39. Igishev V.G., Shlapakov P.A., Khaimin S.A., Sin S.A. Vydelenie indikatornykh pozharnykh gazov pri okislenii uglia na stadiiakh samonagrevaniia i besplamennogo goreniia [Fire indicator gases liberation at coal oxidation at the stage of self-heating and flameless combustio]. *Vestnik Nauchnogo tsentra*, 2015, no.4, pp.55-59.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Родионов В.А. Методологические основы изучения дисперсионного состава шахтной каменноугольной пыли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.17, №1. – С.71–87. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.7

Please cite this article in English as:

Rodionov V.A. Methodological bases of studying the dispersion composition of mine coal dust. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.1, pp.71-87. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.7