ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(2):5-16
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 531+620.17 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ

В.А. Красилова[1], С.А. Эпштейн[1], Е.Л. Коссович[1], М.М. Козырев[1], А.А. Ионин[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: apshtein@yandex.ru

Аннотация: В настоящее время актуальной экологической проблемой является выделение угольной пыли при добыче, хранении, транспортировке углей, а также при их перевалке на угольных терминалах и в морских портах. Наибольший интерес представляет тонкодисперсная угольная пыль с размерами частиц менее 10 мкм, способная длительное время находиться во взвешенном состоянии и переноситься с воздушными потоками на значительные расстояния. Для контроля технологических процессов добычи, обогащения, переработки, транспортировки углей и мониторинга состояния окружающей среды необходима надежная информация не только о содержании тонкодисперсной угольной пыли, но и о ее гранулометрическом составе. На сегодняшний день метод лазерной дифракции является одним из востребованных и надежных методов определения гранулометрического состава тонкодисперсных материалов. В данной статье представлен подход к разработке методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции. Рассмотрены вопросы подготовки проб для анализа, приведены экспериментальные результаты исследований влияния условий проведения испытаний на результаты измерений гранулометрического состава пыли. На основании полученных результатов была разработана методика измерения гранулометрического состава тонкодисперсной угольной пыли. Она включает в себя способы подготовки проб для анализа, подбор оптимального режима измерений, результаты измерений, анализ полученных результатов и их метрологическую оценку. Показано, что разработанная методика может использоваться для оценки гранулометрического состава угольной пыли разного происхождения (отобранной с различных поверхностей, выделенной из суспензий, отобранной из рудничной или воздушной атмосферы, из аспирационных установок).

Ключевые слова: тонкодисперсная угольная пыль, гранулометрический состав, лазерная дифракция, ситовый анализ, класс крупности, размер частиц, распределение частиц по размерам, методика определения.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 18-77-10052-П.

Для цитирования: *Красилова В. А., Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Козырев М. М., Ионин А. А.* Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.

© В.А. Красилова, С.А. Эпштейн, Е.Л. Коссович, М.М. Козырев, А.А. Ионин. 2022.

Development of method for coal dust particle size distribution characterization by laser diffraction

V.A. Krasilova[1], S.A. Epshtein[1], E.L. Kossovich[1], M.M. Kozyrev[1], A.A. Ionin[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: apshtein@yandex.ru

Abstract: Currently, an urgent environmental problem is the emission of coal dust during the extraction, storage, transportation of coal, as well as at the transshipment at coals terminals and in seaports. The fine coal dust with a particles sizes of less than 10 microns are of the highest interest due to its capability of being suspended for a long time and transported with air flows over considerable distances. In order to control the technological processes of mining, beneficiation, processing, transportation of coals as well as the assessment of the environmental status, the reliable information is needed not only on the content of fine coal dust in coals, but also on its particle size distribution. Today, the laser diffraction method is one of the most popular and reliable methods for determining the particle size distribution of finely dispersed materials. This article presents an approach to the development of a technique for measuring the particle size distribution of coal dust by laser diffraction. The issues of preparation of samples for analysis are considered, experimental results of studies of the influence of test conditions on the results of measurements of the particle size distribution of dust are presented. Based on the results obtained, a technique was developed for measuring the particle size distribution of finely dispersed coal dust. It includes methods for preparing the analytical samples, selection of the optimal measurement mode, measurement results, analysis of the results and their metrological assessment. It is shown that the developed technique can be used to assess the grain size distribution of coal dusts of different origin (sampled from various surfaces, isolated from suspensions, sampled from a mine or air atmosphere, from dust-extracting devices).

Key words: fine coal dust, grain-size analysis, laser diffraction, sieve analysis, size grade, particle size, particle size distribution, method of determination.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 18-77-10052-P.

For citation: Krasilova V. A., Epshtein S. A., Kossovich E. L., Kozyrev M. M., Ionin A. A. Development of method for coal dust particle size distribution characterization by laser diffraction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.

Введение

В настоящее время актуальной экологической проблемой является выделение тонкодисперсной угольной пыли при добыче, хранении, транспортировке углей, а также при их перевалке на угольных терминалах и в морских портах. Образование тонкодисперсной пыли может происходить при геологических процессах, сопровождающих углеобразование [1, 2], при добыче и переработке углей в результате их механического разрушения, при транспортировке и перевалке [3–7] за счет разрушения при ударных нагрузках и т.д.

Тонкодисперсная угольная пыль с размерами частиц менее 10 мкм способна находиться длительное время во взвешенном состоянии в атмосферном воздухе, перемещаться на достаточно

большие расстояния и загрязнять растительность, почву и водоемы [8, 9]. Для оценки негативного влияния угольной пыли на объекты окружающей среды необходима надежная информация не только о содержании в углях пыли, но и о ее гранулометрическом составе в части содержании частиц с размерами менее 10 мкм. Данные о гранулометрическом составе угольной пыли в рудничной атмосфере шахт актуальны при оценках взрывоопасности пыли [10—12]. Таким образом, надежное методическое и аппаратурное обеспечение для оценки гранулометрического состава угольной пыли необходимо в целях контроля технологических процессов добычи, обогащения и переработки углей, а также мониторинга состояния окружающей среды.

Существуют различные методы определения гранулометрического состава тонкодисперсных материалов, в том числе ситовый анализ, седиментация, оптический анализ и лазерная дифракция.

Суть ситового метода определения гранулометрического состава пыли заключается в рассеве материала на ситах с разным размером ячеек и определении выхода классов разной крупности в соответствии с ГОСТ 2093-82 [13]. Недостаток этого метода состоит в том, что минимальный размер ячеек сит по ГОСТ 2093 составляет 63 мкм. Это ограничивает определение гранулометрического состава более мелких классов.

С помощью седиментационного метода определяют относительное содержание частиц различных размеров по скорости их оседания в жидкости [14]. Этот метод отличается высокой точностью, однако характеризуется достаточно длительным временем анализа.

Метод оптической микроскопии позволяет определять форму и размеры частиц, а также их количественное содержание [15]. Однако метод оптической микроскопии является достаточно субъективным за счет неравномерного распределения частиц в аналитической пробе, что снижает точность результатов измерений.

В основе метода лазерной дифракции лежит принцип отклонения лазерного луча на разные углы при отражении от частиц разного размера [15]. На сегодняшний день метод лазерной дифракции является одним из наиболее востребованных при анализе тонкодисперсных материалов. Основным преимуществом метода является: широкий диапазон измерений, высокая точность, автоматизация всех операций и экспрессность анализа.

Настоящая статья посвящена разработке методики определения гранулометрического состава тонкодисперсной угольной пыли на основе метода лазерной дифракции. При разработке предлагаемой методики были определены оптимальные условия измерений и проведена метрологическая оценка полученных результатов.

Подготовка проб для анализа

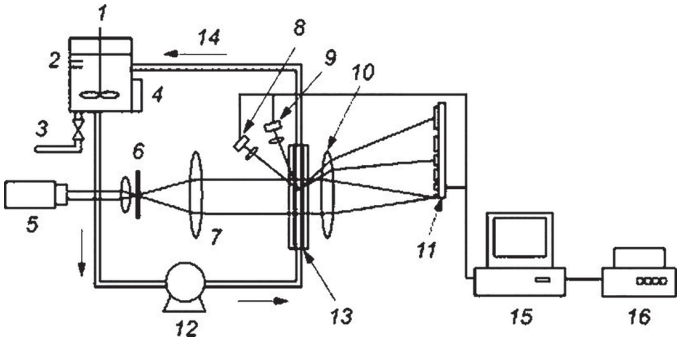
Для исследований был взят уголь марки КС Кузнецкого угольного бассейна. В табл. 1 приведены показатели технического анализа угля.

При подготовке пробы использовали подрешетный продукт после рассева товарного угля по ГОСТ 2093 через сито с

Таблица 1

Показатели технического анализа угля
Results of coal proximate analysis

W^t, %	W^a, %	A^d, %	V^{daf}, %	Q_s^{daf}, ккал/кг	Q_i^r, ккал/кг	S_t^d, %
5,0	1,4	6,8	20,3	8364	7129	0,20



1 – перемешивающее устройство; 2 – дисперсионный резервуар; 3 – слив; 4 – ультразвуковой излучатель; 5 – лазер; 6 – отверстие для лазера (диафрагма); 7 – аппаратура для расширения пучка; 8 – детектор обратно рассеянного света; 9 – детектор бокового рассеянного света; 10 – преобразовательная линза Фурье; 11 – детектор рассеянного вперед света; 12 – циркуляционный насос; 13 – проточная ячейка; 14 – поток суспензии; 15 – персональный компьютер с программным обеспечением; 16 – принтер

Рис. 1. Схема оборудования для измерения гранулометрического состава методом лазерной дифракции
Fig. 1. Schematic image of equipment for measuring the particle size distribution by laser diffraction

размерами ячеек 3 мм. Затем пробу угля (0 — 3 мм) рассеивали на сите с размерами ячеек 0,063 мм и отбирали для анализа подрешетный продукт. Полученную таким образом аналитическую пробу перед испытанием доводили до воздушно-сухого состояния и тщательно перемешивали не менее 1 мин.

Метод измерений

Измерения гранулометрического состава угольной пыли осуществляли с помощью прибора Analysette 22 NanoTec (FRITSCH, Германия). Лазерный анализатор состоит из двух блоков: аналитического и блока диспергирования. Аналитический блок лазерного анализатора размера частиц состоит из 2-х лазеров:

- коротковолнового (зеленого) с длиной волны λ = 532 нм, 7 мВт. Диапазон измерения размера частиц составляет 0,01 — 43 мкм;
- длинноволнового (инфракрасного) с длиной волны λ = 850 нм, 9 мВт. Диапазон измерения размера частиц составляет 15 — 2100 мкм.

Блок диспергирования оснащен центробежным насосом с регулируемой производительностью и ультразвуковым излучателем с регулируемой мощностью. Мощность ультразвука и производительность центробежного насоса возможно изменять в зависимости от свойств анализируемого материала для предотвращения агрегации угольных частиц.

Схема системы для измерений гранулометрического состава методом лазерной дифракции приведена на рис. 1.

Так как угольная пыль обладает гидрофобными свойствами для улучшения ее смачиваемости водой необходимо применять поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве поверхностно-активного вещества использовали «Дусазин», так как он эффективно работает с тонкодисперсными гидрофобными материалами [16].

Важным параметром также является степень затемнения суспензии. Этот параметр контролировали после добавления пробы в ванну диспергирования. Уровень затемнения составлял от 10 до 20 ед. для всех измерений.

Обработку результатов измерений проводили автоматически с использованием программного обеспечения MaScontrol. Для этого была выбрана модель, основанная на теории «Ми» [17].

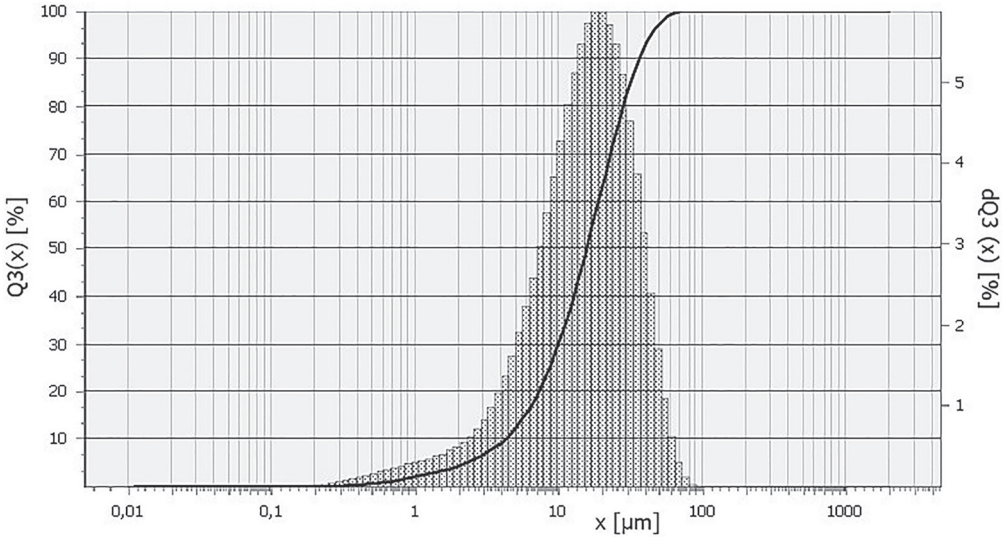


Рис. 2. Пример результатов измерений гранулометрического состава образца ((Q3(x)) — интегральные кривые и (dQ3(x)) — дифференциальные гистограммы)

Fig. 2. An example of the results of measurements of the particle size distribution of the sample ((Q3(x)) — integral curves and (dQ3(x)) differential hystograms)

Таблица 2

План проведения экспериментальных исследований по определению оптимальных условий измерений гранулометрического состава угольной пыли
A plan for conducting the experiments to determine the optimal conditions for measuring the particle size distribution of coal dust

№ опыта	Условия измерений			
	мощность ультразвука, Вт	производительность насоса, л/мин	количество ПАВ, мкл	время диспергирования, с
1	60	3,3	100	60
2	60	5,5	100	60
3	100	3,3	100	60
4	100	5,5	100	60
5	60	3,3	200	60
6	60	5,5	200	60
7	100	3,3	200	60
8	100	5,5	200	60
9	60	3,3	100	90
10	60	5,5	100	90
11	100	3,3	100	90
12	100	5,5	100	90
13	60	3,3	200	90
14	60	5,5	200	90
15	100	3,3	200	90
16	100	5,5	200	90

Таблица 3

Влияние условий измерений на характеристики гранулометрического состава угольной пыли
Influence of measurement conditions on characteristics of coal dust particle size distribution

№ опыта	Условия измерений				Содержание частиц с размером 0–10 мкм, %	Содержание частиц с размером 10–50 мкм, %	Содержание частиц с размером 50–100 мкм, %	Средний размер, мкм	СКО среднего размера, мкм
	мощность ультразвука, Вт	производительность (скорость) насоса, л/мин	количество ПАВ, мкл	время диспергирования, с					
1	60	3,3	100	60	30,0	65,4	4,6	19,65	14,84
2	60	5,5	100	60	13,1	47,3	39,6	47,04	35,67
3	100	3,3	100	60	24,9	68,3	6,8	22,15	16,32
4	100	5,5	100	60	8,5	57,5	34,0	42,90	29,17
5	60	3,3	200	60	23,0	64,1	12,9	26,18	20,19
6	60	5,5	200	60	3,2	40,3	56,5	61,14	35,50
7	100	3,3	200	60	31,4	66,3	2,32	17,81	12,65
8	100	5,5	200	60	6,4	55,5	38,2	46,32	29,86
9	60	3,3	100	90	24,2	67,6	8,4	23,18	17,15
10	60	5,5	100	90	1,5	29,9	68,6	75,66	41,56
11	100	3,3	100	90	24,6	68,7	6,7	22,17	16,32
12	100	5,5	100	90	1,1	25,3	73,6	81,92	44,73
13	60	3,3	200	90	25,6	67,0	7,4	22,40	16,91
14	60	5,5	200	90	1,1	31,8	67,1	72,22	38,81
15	100	3,3	200	90	35,6	63,3	1,1	15,88	11,25
16	100	5,5	200	90	0,8	29,9	69,3	75,83	41,20

Полученные данные представляются на экране компьютера в виде таблиц с указанием размеров частиц и соответствующих этим размерам объемных долей частиц, а также в виде интегральных кривых (Q3(x)) и дифференциальных гистограмм (dQ3(x)) распределения частиц по размерам (рис. 2).

Результаты и обсуждения

Для определения оптимального режима работы лазерного анализатора при измерениях гранулометрического состава угольной пыли была составлена программа исследований (табл. 2). В качестве параметров, определяющих условия измерений, были выбраны: мощность ультразвука (Вт), производительность насоса (л/мин), количество ПАВ (мкл) и время диспергирования (с). Значения параметров были выбраны в соответствии с рекомендациями производителя оборудования.

В процессе работы было проведено 16 измерений при разных условиях (табл. 3). Основным критерием при выборе оптимальных условий являлись содержание частиц с крупностью 0–10 мкм, средний размер частиц и его среднеквадратическое отклонение (СКО).

Анализ полученных результатов (см. табл. 3) позволил установить, что:

- повышение мощности ультразвука приводит к увеличению содержания мелких классов угольной пыли с одновременным снижением содержания частиц с размерами 50–100 мкм;
- повышение количество ПАВ положительно коррелирует с количественным содержанием тонкодисперсных частиц (с размерами 0–10 мкм);
- при увеличении производительности (скорости) насоса наблюдается агрегация угольных частиц, выражающаяся в росте содержания частиц крупных (50–100 мкм) классов.

Два режима измерений (Режим № 7 и Режим № 15) показали лучший результат по максимальному содержанию в пробе частиц с размером 0–10 мкм, минимальному значению среднего размера частиц и его СКО.

Таблица 4

Влияние времени диспергирования на гранулометрический состав угольной пыли

Influence of dispersion time on coal dust particle size distribution

№ опыта	Результаты измерений – содержание в пробе частиц (%) с размерами (мкм):		
	0–10	10–50	50–100
Режим 1. Время диспергирования – 60 с			
1	26,1	67,9	5,9
2	26,3	68,2	5,5
3	27,2	68,0	4,8
4	26,2	68,3	5,5
5	26,7	68,5	4,8
6	25,3	68,8	5,9
7	27,9	68,2	3,9
8	26,2	68,7	5,1
9	27,5	68,5	4,0
10	29,2	67,5	3,3
Режим 2. Время диспергирования – 90 с			
1	22,4	66,9	10,5
2	25,8	67,5	6,7
3	22,9	67,1	9,9
4	30,1	67,2	2,7
5	31,3	65,4	3,3
6	29,0	66,4	4,6
7	31,2	66,0	2,8
8	27,0	67,1	5,9
9	27,7	65,9	6,4
10	29,6	65,4	5,0

Для окончательного выбора режима испытаний по оценке гранулометрического состава угольной пыли указанные режимы были оценены с точки зрения предоставления статистически значимых результатов в зависимости от времени диспергирования. Таким образом, были выбраны режимы со следующими параметрами:

Режим 1: мощность ультразвука — 100 Вт, производительность центробежного насоса — 3,3 л/мин, количество ПАВ — 200 мкл, время диспергирования — 60 с.

Режим 2: мощность ультразвука — 100 Вт, производительность центробежного насоса — 3,3 л/мин, количество ПАВ — 200 мкл, время диспергирования — 90 с.

Таблица 5

Статистические характеристики измерений
Statistical characteristics of measurements

Показатель	Содержание частиц с размером		
	0–10 мкм, %	**10–50 мкм, %**	**50–100 мкм, %**
Режим 1. Время диспергирования — 60 с			
Среднее значение	26,86	68,26	4,87
СКО	1,12	0,39	0,89
Доверительный интервал среднего значения	0,69	0,24	0,55
Режим 2. Время диспергирования — 90 с			
Среднее значение	27,70	66,49	5,78
СКО	3,19	0,78	2,73
Доверительный интервал среднего значения	1,98	0,48	1,69

Таблица 6

Содержание частиц угольной пыли класса 0–10 мкм
Contents of coal dust particles of class 0–10 μm

Диапазон, мкм	Распределение по размерам, %									
	№ опыта									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
0,0–2,5	4,10	4,10	3,90	4,20	3,80	3,90	3,70	3,80	3,80	3,80
	4,10	4,00	3,70	4,00	3,70	3,90	3,50	3,90	3,70	3,60
	4,00	3,80	3,80	3,90	3,40	3,60	3,50	3,80	3,60	3,70
	3,90	3,90	3,50	3,70	3,30	3,60	3,40	3,60	3,50	3,60
	3,80	3,90	3,60	3,70	3,30	3,40	3,20	3,50	3,60	3,90
2,5–5,0	8,10	7,10	7,10	7,60	7,40	7,10	6,80	7,50	7,10	7,50
	8,50	7,00	7,00	7,30	7,20	7,50	6,80	7,50	7,10	7,10
	8,20	6,80	7,40	7,20	7,00	6,90	7,00	7,50	7,00	7,30
	7,90	7,10	6,80	7,20	7,00	7,30	7,00	7,60	6,80	7,00
	7,60	7,30	7,20	7,40	7,10	6,90	6,80	7,40	6,90	7,40
5,0–10,0	17,10	14,80	15,20	16,00	15,40	15,40	14,70	16,50	15,30	16,60
	17,30	14,80	15,20	15,80	15,50	16,20	14,90	16,60	15,70	16,40
	17,20	14,80	15,80	15,60	15,60	15,60	15,30	16,50	15,70	16,70
	17,20	15,30	15,30	16,00	15,60	16,30	15,10	16,90	15,60	16,30
	17,20	15,80	15,90	16,40	15,90	16,00	14,90	16,70	15,80	16,70

Таблица 7

Статистические характеристики измерений
Statistical characteristics of measurements

Показатель	Содержание частиц с размером		
	0,0–2,5 мкм, %	**2,5–5,0 мкм, %**	**5,0–10,0 мкм, %**
Среднее значение	3,72	7,25	15,90
СКО	0,23	0,37	0,72
Доверительный интервал среднего значения	0,14	0,23	0,45

Результаты измерений представлены в табл. 4 и 5.

На основании полученных данных (табл. 4 и 5), был выбран оптимальный режим измерений (Режим 1) со следующими параметрами: мощность ультразвука — 100 Вт; производительность (скорость) насоса — 3,3 л/мин; количество ПАВ — 200 мкл; время диспергирования — 60 с, т.к. данный режим характеризуется наименьшим доверительным интервалом среднего значения и наименьшим разбросом полученных величин.

В связи с введением гигиенических норм относительно концентрации взвешенных частиц размером 2,5 и 10 мкм (PM2,5 и PM10) в атмосферном воздухе [18] состав тонкодисперсной угольной пыли с размерами частиц в диапазоне от 0 до 10 мкм представляет наибольший интерес. Для дальнейшего исследования были выбраны три диапазона размера частиц (табл. 6) и проанализированы статистические параметры полученных результатов измерений (табл. 7). Измерения проводили в условиях Режима 1.

Содержание частиц (табл. 6) с размерами 0,0–2,5 мкм не превышает 4,2%, а с размерами 5,0–10,0 мкм — 17,3%. В среднем, содержание частиц с размерами 0,0–10,0 мкм в пробе составляет около 30%, что указывает на сравнительно высокую долю тонкодисперсной угольной пыли в исследованном угле, способной находится в воздухе во взвешенном состоянии.

Полученные данные (табл. 5 и 7) показали, что выбранный в результате проведенных исследований режим обеспечивает высокую точность результатов измерений во всем диапазоне размеров частиц угольной пыли.

Предложенная методика может быть использована для угольной пыли любого происхождения, в том числе для пыли, отобранной с различных поверхностей, выделенной из суспензий, отобранной из рудничной или воздушной атмосферы, из аспирационных установок. В этих случаях точность и достоверность результатов будет определяться следующими условиями: представительностью отбора проб пыли; отсутствием в ее составе примесей, искажающих эффект лазерной дифракции и обязательным отсевом из пробы частиц крупностью более 63 мкм.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния условий определения гранулометрического состава тонкодисперсной угольной пыли методом лазерной дифракции.

Выбран оптимальный режим проведения испытаний, включающий следующие параметры: мощность ультразвука, производительность (скорость) насоса, количество ПАВ, время диспергирова-

ния. Проведена метрологическая оценка результатов измерений.

На основании полученных результатов разработана методика оценки гранулометрического состава тонкодисперсной угольной пыли методом лазерной дифракции. Предложенная методика включает в себя способы подготовки проб для анализа, подбор оптимального режима измерений, результаты измерений, анализ полученных результатов и их метрологическую оценку. Показано, что разработанная методика обеспечивает высокую точность результатов измерений размеров частиц в диапазоне 0–63 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fisne A., Esen O.* Coal and gas outburst hazard in Zonguldak Coal Basin of Turkey, and association with geological parameters // Natural Hazards. 2014, vol. 74, no. 3, pp. 1363–1390. DOI: 10.1007/s11069-014-1246-9.

2. *Shepherd J., Rixon L. K. K., Griffiths L.* Outbursts and geological structures in coal mines. A review // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1981, vol. 18, no. 4, pp. 267–283. DOI: 10.1016/0148-9062(81)91192-X.

3. *Beron A. I.*, *Pozin E. Z.*, *Melamed V. Z.* Distribution pattern of the grain-size composition of coal fractured by cutting // Soviet Mining Science. 1971, vol. 7, no. 5, pp. 512–517. DOI: 10.1007/BF02501061.

4. *Korshunov A. N.*, *Dergunov D. M.*, *Logov A. B.*, *Gerike B. L.* Coal cutting with a disk // Soviet Mining Science. 1975, vol. 11, no. 5, pp. 571–573. DOI: 10.1007/BF02499387.

5. *Baruya P.* Losses in the coal supply chain. IEA Clean coal centre. 2012, 66 p.

6. *Макаров П. В.*, *Трубицын А. А.*, *Трубицына Н. В.*, *Кузнецов П. В.*, *Петракова И. В.*, *Смолин И. Ю.*, *Стефанов Ю. П.*, *Ворошилов С. П.* Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения углей и расчет выхода пылевых частиц. I. Исследование иерархии масштабов разрушения // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7. — № S2. — С. 245 — 248.

7. *Phan Q. V.* The determination of coal dust emission and percentage of quartz in coal dust emission during the cutting anthracite coal by shearing and bottom blade of the plow // Procedia Earth and Planetary Science. 2009, vol. 1, no. 1, pp. 250–256. DOI: 10.1016/j.proeps.2009.09.040.

8. *Trechera P., Moreno T., Córdoba P., Moreno N., Zhuang X., Li B., Li J., Shangguan Y., Dominguez A. O., Kelly F., Querol X.* Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China // International Journal of Coal Geology. 2021, vol. 235, pp. 103677. DOI: 10.1016/J.COAL.2021.103677.

9. *Лебедев А. А.*, *Тихонова О. А.*, *Блиновская Я. Ю.*, *Чайка В. В.*, *Кирьянов А. В.*, *Христофорова Н. К.*, *Пикула К. С.*, *Шевченко В. П.*, *Голохваст К. С.* Влияние угольного терминала на состав морских взвесей залива Находка (Японское море) // Гидрометеорология и экология. — 2017. — № 48. — С. 195 — 201.

10. *Петрова И.* Оценка пылевой опасности на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 5. — С. 413 — 417.

11. *Zhang L., Zhou G., Ma Y., Jing B., Sun B., Han F., He M., Chen X.* Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face // Powder Technology. 2021, vol. 383, pp. 143 — 158.

12. *Azam S., Mishra D. P.* Effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on rock dust inertant requirement for coal dust explosion suppression in underground coal mines // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 126, pp. 35 — 43.

13. *ГОСТ 2093-82* Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

14. ГОСТ 22662-77 Порошки металлические. Методы седиментационного анализа. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

15. *Буданова Т. Е.*, *Озмидов О. Р.*, *Озмидов И. О.* Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // Инженерные изыскания. — 2013. — № 8. — С. 66—71.

16. *Журавлева Н. В.*, *Потокина Р. Р.*, *Исмагилов З. Р.* Определение гранулометрического состава угольных порошков методом лазерной дифракции // Химия твердого топлива. — 2016. — № 5. — С. 56—62.

17. *Теории* Ми / FRITSCH: официальный сайт компании FRITSCH. [электронный ресурс] URL: https://www.fritsch.com.ru/.

18. *Главный* государственный санитарный врач Российской Федерации. Постановление от 28 января 2021 года № 2. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». ГИАБ

REFERENCES

1. Fisne A., Esen O. Coal and gas outburst hazard in Zonguldak Coal Basin of Turkey, and association with geological parameters. *Natural Hazards*. 2014, vol. 74, no. 3, pp. 1363–1390. DOI: 10.1007/s11069-014-1246-9.

2. Shepherd J., Rixon L. K. K., Griffiths L. Outbursts and geological structures in coal mines. A review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1981, vol. 18, no. 4, pp. 267–283. DOI: 10.1016/0148-9062(81)91192-X.

3. Beron A. I., Pozin E. Z., Melamed V. Z. Distribution pattern of the grain-size composition of coal fractured by cutting. *Soviet Mining Science.* 1971, vol. 7, no. 5, pp. 512–517. DOI: 10.1007/BF02501061.

4. Korshunov A. N., Dergunov D. M., Logov A. B., Gerike B. L. Coal cutting with a disk. *Soviet Mining Science*. 1975, vol. 11, no. 5, pp. 571–573. DOI: 10.1007/BF02499387.

5. Baruya P. *Losses in the coal supply chain*. IEA Clean coal centre. 2012, 66 p.

6. Makarov P. V., Trubitsyn A. A., Trubitsyna N. V., Kuznetsov P. V., Petrakova I. V., Smolin I. Yu., Stefanov Yu. P., Voroshilov S. P. Experimental and theoretical study of coal fracture and calculation of dust particle formation. I. Investigation of hierarchy of fracture scales. *Physical Mesomechanics*. 2004, vol. 7, no. S2, pp. 245—248. [In Russ].

7. Phan Q. V. The determination of coal dust emission and percentage of quartz in coal dust emission during the cutting anthracite coal by shearing and bottom blade of the plow. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009, vol. 1, no. 1, pp. 250–256. DOI: 10.1016/j.proeps.2009.09.040.

8. Trechera P., Moreno T., Córdoba P., Moreno N., Zhuang X., Li B., Li J., Shangguan Y., Dominguez A. O., Kelly F., Querol X. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China. *International Journal of Coal Geology*. 2021, vol. 235, pp. 103677. DOI: 10.1016/J.COAL.2021.103677.

9. Lebedev A. A., Tikhonova O. A., Blinovskaya Ya.Yu., Chaika V. V., Kirianov A. V., Khristophorova N. K., Pikula K. S., Shevchenko V. P., Golokhvast K. S. Coal terminal impact on marine suspention composition: Nakhodka gulf (Japan sea). *Hydrometeorology and Ecology*. 2017, no. 48, pp. 195—201. [In Russ].

10. Petrova K. I. Evaluation of dust hazard in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*. 2017, no. 5, pp. 413—417. [In Russ].

11. Zhang L., Zhou G., Ma Y., Jing B., Sun B., Han F., He M., Chen X. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face. *Powder Technology*. 2021, vol. 383, pp. 143—158.

12. Azam S., Mishra D. P. Effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on rock dust inertant requirement for coal dust explosion suppression in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 126, pp. 35—43.

13. *Toplivo tverdoe. Sitovyy metod opredeleniya granulometricheskogo sostava. GOST 2093-82* [Solid Fuel: Screen Analysis for the Determination of Granulometric Composition. State Standard 2093-82], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2001. [In Russ].

14. *Poroshki metallicheskie. Metody sedimentatsionnogo analiza. GOST 22662-77* [Metal powders. Methods of sedimentation analysis of powders. State Standard 22662-77], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2001. [In Russ].

15. Budanova T. E., Ozmidov O. R., Ozmidov I. O. Modern methods of studying the granulometric composition of soils. *Inzhenernye izyskaniya*. 2013, no. 8, pp. 66—71. [In Russ].

16. Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Ismagilov Z. R. Determination of the granulometric composition of coal powders by laser diffraction analysis. *Khimiya tverdogo topliva*. 2016, no. 5, pp. 56—62. [In Russ].

17. *Mie diffraction theory*, available at: https://www.fritsch.com.ru/.

18. *Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya».* Postanovlenie ot 28 yanvarya 2021 goda № 2 [About the approval of sanitary rules and norms of SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans». Resolution No. 2 of January 28, 2021]. [In Russ]. ГИАБ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красилова Вера Алексеевна[1] — аспирант, инженер,
Эпштейн Светлана Абрамовна[1] — д-р техн. наук,
старший научный сотрудник, зав. лабораторией,
e-mail: apshtein@yandex.ru,
Коссович Елена Леонидовна[1] — канд. физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: e.kossovich@misis.ru,
Козырев Михаил Маратович — студент, НИТУ «МИСиС»,
Ионин Алексей Александрович[1] — стажер,
[1] Научно-учебная испытательная лаборатория
«Физико-химии углей», НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Эпштейн С.А., e-mail: apshtein@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Krasilova[1], Graduate Student, Engineer,
S.A. Epshtein[1], Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Head of Laboratory, e-mail: apshtein@yandex.ru,
E.L. Kossovich[1], Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Senior Researcher, e-mail: e.kossovich@misis.ru,
M.M. Kozyrev, Student, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
A.A. Ionin[1], Trainee,
[1] Scientific and Educational Testing Laboratory
«Physics and Chemistry of Coals»,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: S.A. Epshtein, e-mail: apshtein@yandex.ru.

Получена редакцией 22.11.2021; получена после рецензии 24.12.2021; принята к печати 10.01.2022.
Received by the editors 22.11.2021; received after the review 24.12.2021; accepted for printing 10.01.2022.