
УДК 622.546.294

О.Г. КРЕМЕНЕВ, канд. техн. наук, зав. лаб.,
В.Ю. ДЕРЕВЯНСКИЙ, зав. отд.,
В.А. СЕРГЕЕВ, науч. сотрудник,
В.И. МУШЕНКО, науч. сотрудник,
Н.Н. КОРЛЮК, мл. науч. сотрудник; *МакНИИ, г. Макеевка*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ШАХТНОЙ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ДОНБАССА

Установлены закономерности дисперсного состава шахтной пыли в сети вентиляционных и воздухоподающих горных выработок, позволяющие определять пылерадиационный фактор при оценке и контроле радиационной обстановки угольных шахт.

Ключевые слова: пылерадиационный фактор, шахтная пыль, дисперсный состав, функция распределения, горные выработки.

При выполнении предписанных Правилами безопасности в угольных шахтах [1] оценки и контроля радиационной обстановки в действующих и строящихся шахтах должен осуществляться учет пылерадиационного фактора (ПРФ), вклад которого среди всех радиационных факторов угольной шахты достигает 70%. Определение ПРФ базируется на данных о массе (концентрации) пыли, её вещественном и дисперсном составе. Правилами безопасности в угольных шахтах при пылевом контроле регламентируется установление массы и вещественного состава (в части наличия свободной двуокиси кремния) пыли угольных шахт. В соответствии с [1] в воздухе действующих подземных выработок угольных шахт не должно содержаться свыше предельно допустимых концентраций по общей массе: пыли породной, углепородной (содержащей от 10 до 70% свободной двуокиси кремния) – 2 мг/м³; пыли углепородной, угольной (содержащей от 5 до 10% свободной двуокиси кремния) – 4 мг/м³; пыли антрацитовой (содержащей менее 5% свободной двуокиси кремния) – 6 мг/м³; пыли каменноугольной (содержащей менее 5% свободной двуокиси кремния) – 10 мг/м³.

Дисперсный состав пыли угольных шахт при учете пылевых нагрузок на горняков не регламентируется и поэтому упорядоченных данных о

дисперсном составе шахтной пыли в горных выработках и его закономерностях не имеется.

Целью работы является установление закономерностей дисперсного состава шахтной пыли в воздухоподающих и вентиляционных выработках угольных шахт.

Для достижения поставленной цели были решены задачи:

1. Анализ имеющихся исследований дисперсного состава шахтной пыли в горных выработках угольных шахт.
2. Исследование дисперсного состава пыли в воздухоподающих и вентиляционных выработках угольных шахт.

В настоящее время закономерности пылеобразования в горных выработках угольных шахт практически установлены. Аналитические и эмпирические зависимости распространения и отложения угольной пыли в горных выработках на различных расстояниях от источников пылеобразования приведены в справочных изданиях и монографиях, например [2,3,4,5]. С точки зрения охраны труда и техники безопасности установлено, что патогенное действие пыли угольных шахт определяется главным образом её массой, вещественным составом и дисперсностью [4].

Анализ исследований дисперсного состава пыли угольных шахт проводился на основании пылевых съёмок, выполненных МакНИИ [4,6]. Метод пылевых съёмок заключался в последовательном измерении концентрации пыли в шахтном воздухе. Средняя запыленность воздуха определялась за время, равное производственному циклу работы в лаве, проходческом забое (сутки и более). Пылеотложение в вентиляционных выработках определялось по величине уменьшения пыли в вентиляционной струе. Пылеотложение в воздухоподающих выработках (откаточных штреках, магистральных выработках и др.) осуществлялось методом обметания пыли, осевшей на поверхности горных выработок (кровле, боках и почве выработки). По результатам проведенных исследований были получены результаты запыленности воздуха, вещественный и дисперсный состав пыли в воздухоподающих и вентиляционных выработках угольной шахты. Обобщенные результаты широкомасштабных исследований дисперсного состава пыли в горных выработках угольных шахт Донбасса приведены в таблице 1 [4].

Таблица 1

Обобщенные результаты дисперсного состава пыли
в горных выработках угольных шахт Донбасса

Марка угля	Среднее содержание пластовой влаги, %	Средняя зольность угля, %	Средний выход ле- тучих веществ, %	Средняя относитель- ная пористость угля, %	Средний объем пор занятых влагой, %	Среднее массовое содержание фракций (%) взвешенной пыли при размере частиц, мкм				Средний медианный диаметр взвешенной пыли, мкм
						менее 5	5-10	10-30	более 30	
Очистные забои на пологих пластах										
А	6,5	17	4,0	12,3	4,2	6	12	44	38	24
ПА	6,3	18	6,0	10,3	4,1	3	9	57	31	23
Т	6,0	16	11,5	8,1	4,0	9	13	46	32	22
ОС	5,0	17	17,0	9,7	3,4	12	11	36	41	21
К	5,5	17	23,5	10,0	3,9	12	13	40	35	22
Ж	6,5	22	31,0	12,7	4,6	15	12	30	43	24
Г	11,5	18	35,5	15,8	8,6	7	10	37	46	25
Д	14,0	18	41,0	18,6	10,8	6	11	33	50	30
Б	-	-	-	-	-	7	9	31	53	33
Очистные забои на крутых пластах										
Т	4,9	25	13,0	9,4	3,3	6	9	35	50	30
ОС	2,9	14	16,8	11,4	2,1	4	10	42	44	28
К	3,4	14	21,3	9,4	2,5	7	8	35	50	30
Ж	3,5	28	29,0	10,4	2,3	8	10	36	46	28
Забои подготовительных выработок										
А	6,0	17	3,4	13,6	4,0	4	7	23	66	42
Па	5,3	11	6,5	9,9	3,5	3	5	29	63	40
Т	3,7	20	14,0	8,6	2,4	3	5	29	63	38
Ос	4,7	17	17,0	9,7	3,6	7	10	33	50	30
К	3,9	17	21,6	10,6	2,8	7	9	33	51	31
Ж	5,6	14	28,4	12,8	4,2	10	10	29	51	32
Г	7,8	16	37,3	17,3	5,1	5	6	21	68	50
Пункты погрузки и перегрузки										
А	6,1	17	3,2	13,6	3,9	8	9	33	50	30
ПА	4,6	18	5,8	11,0	3,0	4	6	30	60	35
Т	3,5	16	12,1	8,1	2,4	5	7	32	56	32
ОС	4,7	17	17,0	9,7	3,0	7	10	37	46	28
К	4,3	17	20,0	9,8	3,4	6	7	29	58	33
Ж	4,2	22	27,4	12,5	2,9	4	9	41	46	29
Г	8,3	18	38,1	16,8	6,3	10	9	28	53	32
Д	16,3	18	41,0	18,6	12,6	7	6	21	66	43

продолжение табл. 1

Вентиляционные штреки пологих пластов вблизи лав										
А	5,7	17	3,9	12,9	3,7	10	13	47	30	20
ПА	3,3	14	6,5	10,8	2,2	10	15	48	27	19
Т	5,0	18	13,5	8,7	3,4	10	16	54	20	17
ОС	4,7	17	17,0	9,7	3,0	15	16	45	24	16
К	4,9	16	20,5	9,9	3,5	12	17	51	20	16
Ж	4,2	22	27,4	12,5	2,0	17	15	42	26	16
Г	7,9	19	37,1	16,8	6,1	9	16	53	22	18
Д	16,0	18	40,0	18,6	12,4	9	9	34	48	27
Вентиляционные штреки крутых пластов вблизи лав										
Т	3,9	25	12,9	6,9	2,5	6	11	53	30	22
ОС	3,4	22	16,9	2,9	2,2	11	19	54	16	16
К	3,7	18	26,0	11,4	2,6	7	12	45	35	23
Ж	4,0	32	28,0	12,8	2,6	8	14	50	28	22

Анализ результатов широкомасштабных исследований дисперсного состава пыли угольных шахт Донбасса, полученных в [4,6] позволяет отметить следующее:

1. Применение в воздухоподающих выработках метода сбора пыли с поверхности выработок путём обметания щеткой в совок, накрытый ситом № 12, приводит к завышенным показателям и искажает реальный дисперсный состав шахтной пыли.

2. Приведенные в таблице 1 обобщенные данные о дисперсном составе шахтной пыли донецких углей в горных выработках и величины медианных аэродинамических диаметров не привязаны к конкретным рабочим местам в выработках шахт.

3. Дисперсный состав пыли определялся в основном с помощью ситового анализа и оптических микроскопов, позволяющих выделять частицы с наименьшим размером до 5-10 мкм.

4. Современная горно-добывающая техника и технологии производственных процессов в угольных шахтах являются источниками пылеобразования с характеристиками, отличающимися от тех, для которых были выполнены вышеприведенные исследования.

5 Исследования радиологов указывают на то, что значительную опасность для здоровья горняков создаёт атмосфера со взвешенными частицами, размеры которых от 5-10 мкм до 0,001 мкм (1 нм).

В связи с вышеизложенным, а также учитывая, что удельный вес ПРФ среди всех других радиационно опасных факторов является наиболее значимым (до 70%), была поставлена задача уточнения дисперсного состава

ва пыли угольных шахт для современного состояния развития техники и технологий с привязкой к основным рабочим местам и маршрутам передвижения работников угольных шахт.

Исследования дисперсного состава шахтной пыли в горных выработках угольных шахт проводились с помощью пылевых съёмок, которые выполнялись в основных местах работы и маршрутах перемещения горняков по ходу движения воздушной струи от воздухоподающего ствола по сети горных выработок к вентиляционному стволу. В местах измерений определялись площадь сечения выработки, скорость движения воздуха, общие горно-геологические характеристики выработки. Определение дисперсного состава шахтной пыли устанавливалось методом сбора пыли на специальные подложки в течение времени, равном производственному циклу работы в лаве, проходческом забое (сутки и более). Такой метод более точный, чем обметание пыли с поверхности выработок, а технология его проведения в шахтных условиях достаточно удобна и позволяет произвести отбор пробы практически на любом рабочем месте. Отбор проб производился единообразным способом во всех выработках по маршруту поступления и продвижения воздуха в шахте: от воздухоподающего ствола через сеть магистральных и участковых воздухоподающих выработок к очистным и подготовительным забоям и далее исходящими струями воздуха по вентиляционным участковым и магистральным выработкам к вентиляционному стволу. Такой подход позволил провести и сопоставить результаты исследований в одной «методологической шкале», в отличие от результатов исследований, которые были проведены ранее различными методами, усложняющими и вносящими некоторую неопределенность при интерпретации полученных результатов о дисперсном составе пыли.

Подложки с пылью из шахты доставлялись в лабораторию МакНИИ, где масса пыли определялась весовым методом, а дисперсный состав пыли устанавливался методом микроскопирования. На поверхности подложки, площадь которой составляла $210 \times 293 \text{ мм}^2$, произвольно выбирались 10 круговых участков диаметром 0,45 мм. С каждой круговой площадки делали фотографию, которая обрабатывалась оператором. С помощью масштабной сетки-эталоны оператор подсчитывал число частиц размером от 0,01 до 200 мкм, попадающих в интервалы размеров отдельных фракций. Затем пересчитывался дисперсный состав пыли, полученный счётным методом, на соотношение фракций по массе частиц. Массу частиц определяли используя в качестве характеристики размера частицы эквивалентный диаметр пылевой частицы $d_s = 0,8 a$, где a – длина частицы, мкм [4]. Массу частицы устанавливали путем умножения объема частицы (объем шара диаметром d_s) на плотность ρ вещества пыли (уголь, порода).

В соответствии с общепринятой методикой планирования эксперимента было определено необходимое количество замеров на подложке при доверительной вероятности $p = 0,9$ в заданном интервале размеров отдельных фракций [7]. Оно оказалось равным $N_{p=0,9} = 10$. При доверительной вероятности $p = 0,8$ необходимое количество замеров на площади подложки составило величину $N_{p=0,8} = 5$.

Порядок отбора проб на подложку был следующий.

Очистной забой (лава):

- на откаточном штреке (воздухоподающей выработке) подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от окна лавы;
- на вентиляционном штреке подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от окна лавы;

Проходческий забой:

- подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от груди забоя;
- подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии до 10 м от ВМП, подающего воздух в забой;

Магистральные выработки:

- конвейерный штрек: подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от пересыпа по ходу струи воздуха;
- откаточный штрек: подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от пункта погрузки, гезенка по ходу струи воздуха;
- вентиляционный штрек: подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 10 м от станции замера расхода воздуха по ходу струи воздуха;

Рудвор: подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 20-30 м от воздухоподающего ствола по ходу струи воздуха;

Исходящая струя шахты: подложку устанавливали на почве выработки на расстоянии 50 м от загрузки по ходу струи воздуха.

В соответствии с описанным порядком отбора проб и методикой пылевой съёмки были проведены шахтные исследования на ОП «Шахта «Калиновская-Восточная», ОП «Шахта «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь», ОП «Шахта им. А.Г.Стаханова» ГП «Красноармейскуголь». Обобщая результаты исследований дисперсного состава шахтной пыли, выполненные на этих шахтах, можно заключить следующее.

1. Дисперсный состав шахтной пыли в вентиляционных выработках имеет зависимость массы фракций частиц от их размера в виде функции одномодового дифференциального распределения массы фракций частиц пыли от их размеров, имеющей один плавный четко выраженный максимум.

Исследования подтверждают полученное ранее в [4,6] логарифмическое нормальное распределение массы фракций частиц от их размеров в вентиляционных выработках.

Типичный график функции дифференциального распределения массы фракций частиц от их размера в вентиляционных выработках приведен на рисунке 1.

Дисперсный состав пыли в вентиляционных выработках

$f, \%$

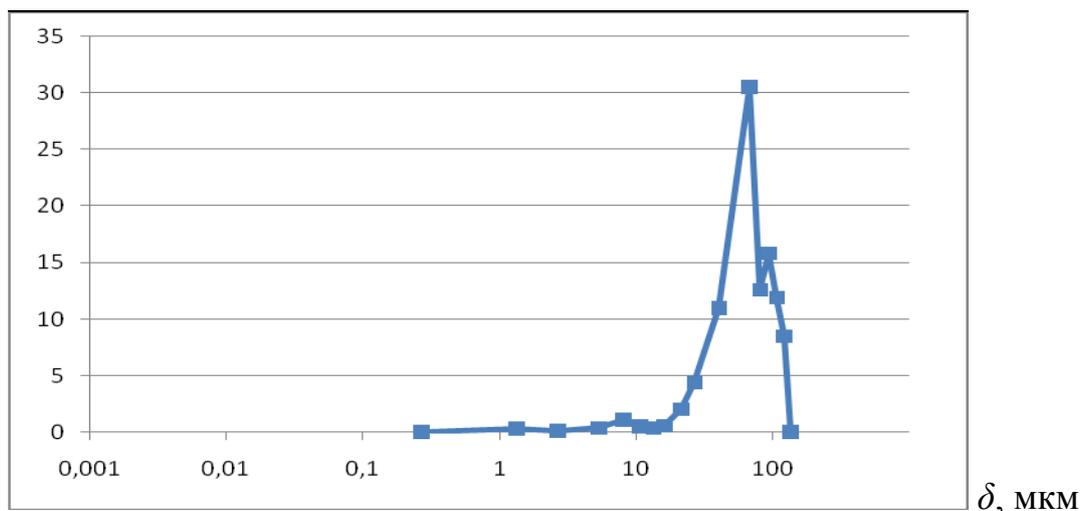


Рис. 1. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ в вентиляционной магистрали (50 м от загрузки) вентиляционного ствола ОП «Шахта «Калиновская-Восточная» ГП «Макеев-уголь».

2. Дисперсный состав шахтной пыли в воздухоподающих выработках угольных шахт (участковых, магистральных, конвейерных, главных воздухоподающих), в которых установлены ленточные конвейеры, а непосредственно у очистных и подготовительных забоев скребковые конвейеры – характеризуется дифференциальной многомодовой функцией распределения массы фракций частиц от их размера, имеющей два и более максимума. Присутствие на графике нескольких максимумов (мод) свидетельствует о наличии нескольких (двух и более) источников пылеобразования в данной горной выработке.

Типичный график дифференциальной многомодовой функции распределения массы фракций частиц от их размера приведен на рисунках 2, 3, 4. Наличие двух максимумов на дифференциальной функции распределения массы фракций частиц от их размера свидетельствует о наличии

двух источников пылеобразования перед местом отбора пробы по ходу движения воздуха в выработках.

На рисунке 2 один максимум ($\delta = 50$ мкм) соответствует локальному (точечному) источнику пылеобразования (пересыпу со скребкового конвейера СП250 на ленточный 1Л-80). Второй максимум ($\delta = 8$ мкм) соответствует распределенным по длине ленточного конвейера источникам пылеобразования (вращающимся направляющим роликам верхней и нижней ветвей ленточного конвейера, а также движущимся скребкам по ставу скребкового конвейера).

Дисперсный состав пыли в воздухоподающих выработках

$f, \%$

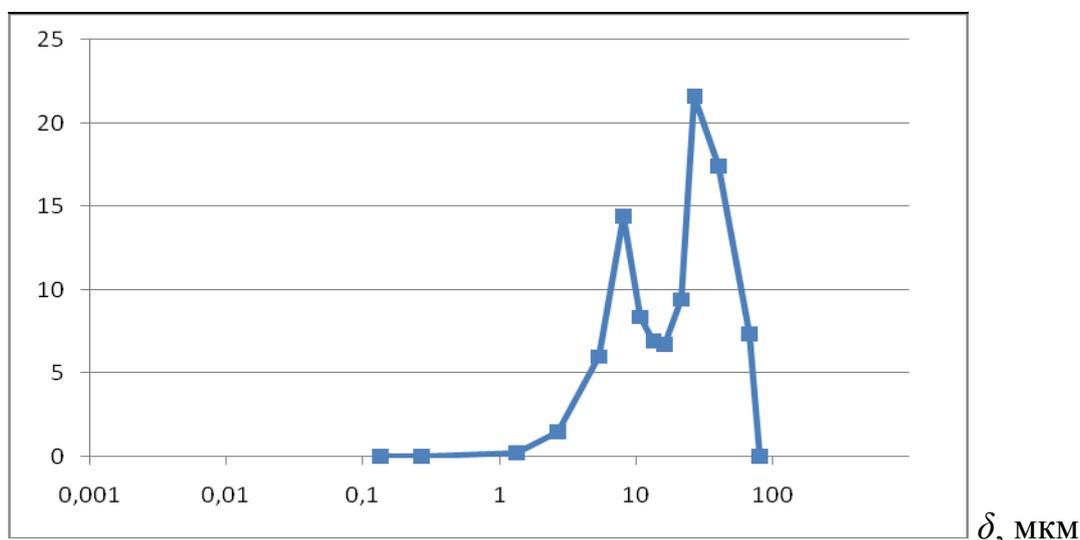


Рис. 2. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ , поступающих из 2 восточного ходка пласта h_{10}^B (конвейерного ходка – 20 м от окна лавы) во 2 восточную лаву пласта h_{10}^B ОП «Шахта «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь».

На рисунках 3 и 4 один максимум ($\delta = 50$ мкм) соответствует точечному источнику пылеобразования (пересыпу с одного ленточного конвейера на другой ленточный конвейер). Второй максимум ($\delta = 8$ мкм) соответствует распределенным по длине ленточных конвейеров источникам пылеобразования (вращающимся направляющим роликам верхней и нижней ветвей ленточных конвейеров).

$f, \%$

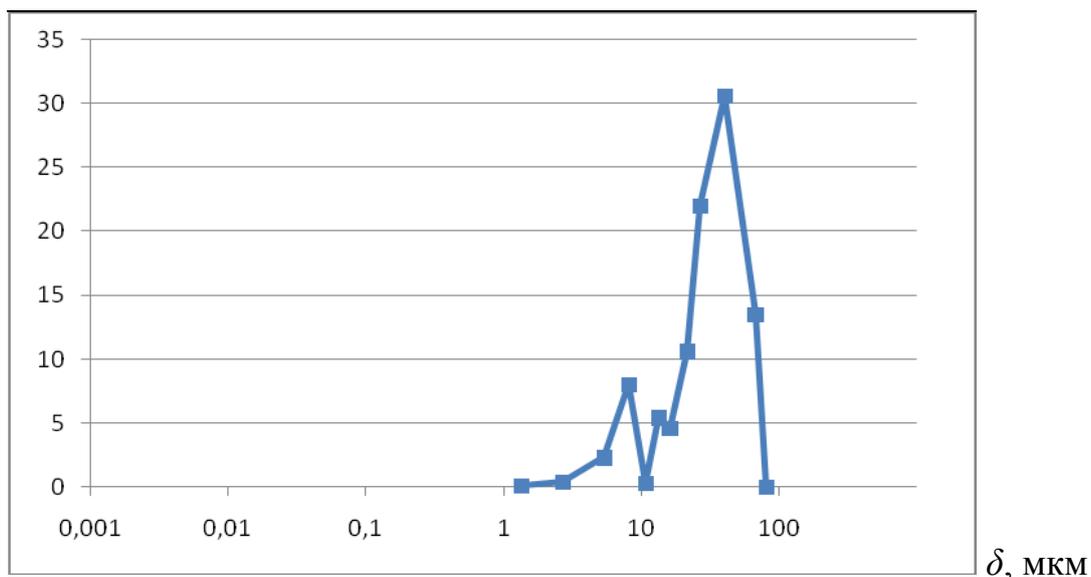


Рис. 3. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ в магистральном конвейерном штреке ОП «Шахта «Калиновская-Восточная» ГП «Макеевуголь»

$f, \%$

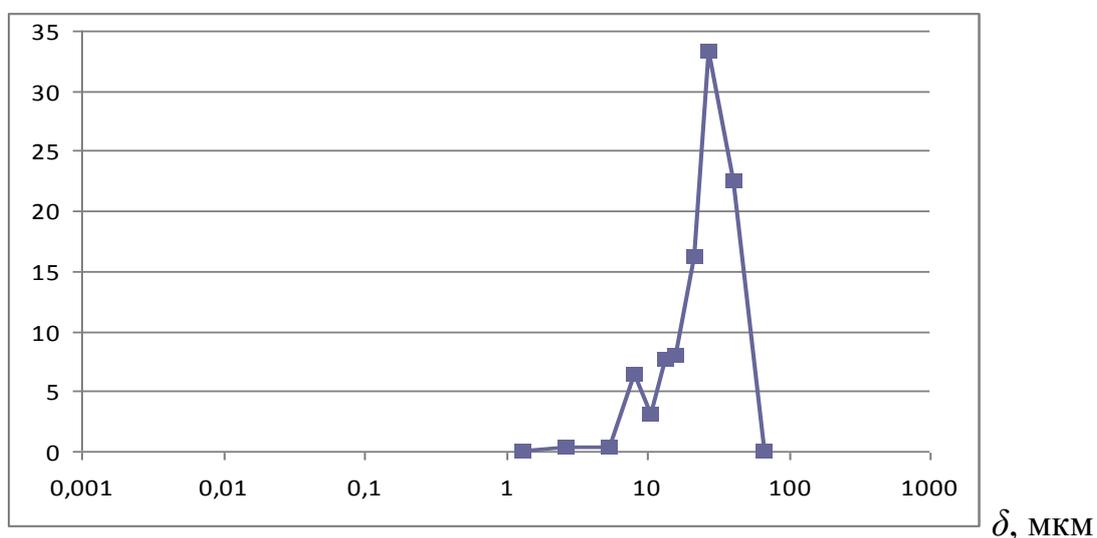


Рис. 4. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ в 5 северном конвейерном штреке (в 10 м перед ВМП для подготовительного забоя) ОП «Шахта им. А.Г.Стаханова» ГП «Красноармейскуголь»

3. Дисперсный состав шахтной пыли в призабойной части проходческой (подготовительной) выработки, проветриваемой с помощью ВМП воздухом из вентиляционного трубопровода или очистной выработки в исходящей струе воздуха на выходе из лавы, характеризуется дифференциальной многомодовой функцией распределения массы фракций частиц от их размера, имеющей два и более максимума. Типичный график дифференциальной многомодовой функции распределения массы фракций частиц от их размера приведен на рисунках 5, 6.

Дисперсный состав пыли в призабойной части подготовительной выработки

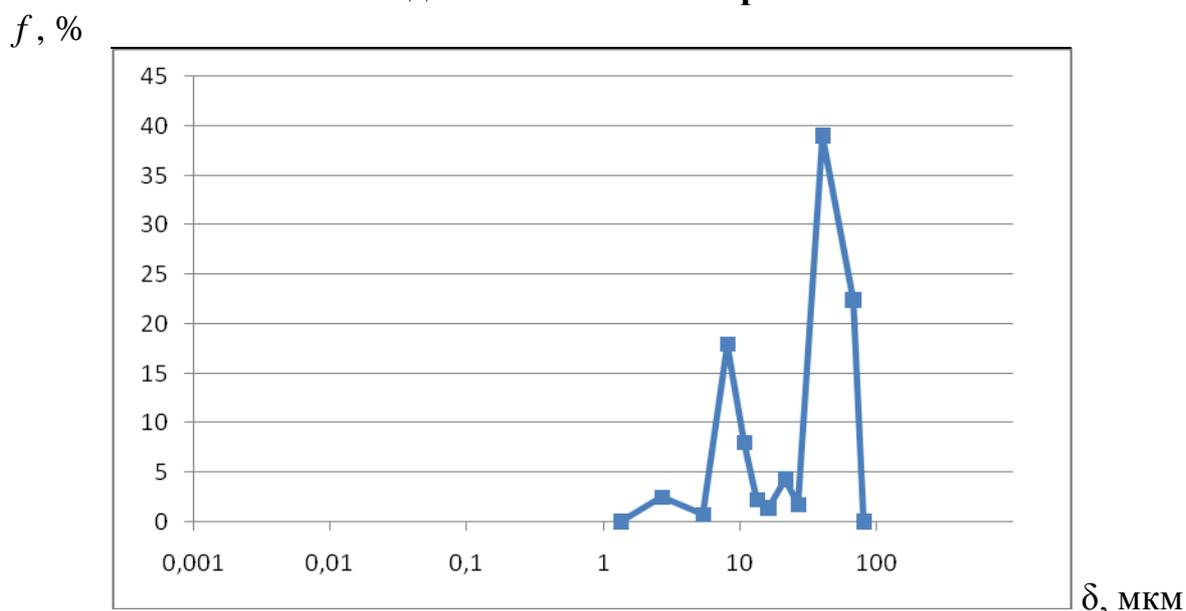


Рис. 5. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ в 20 м от забоя 5 северного конвейерного ОП «Шахта им. А.Г. Стаханова» ГП «Красноармейскуголь»

Дисперсный состав пыли в призабойной части очистной выработки

$f, \%$

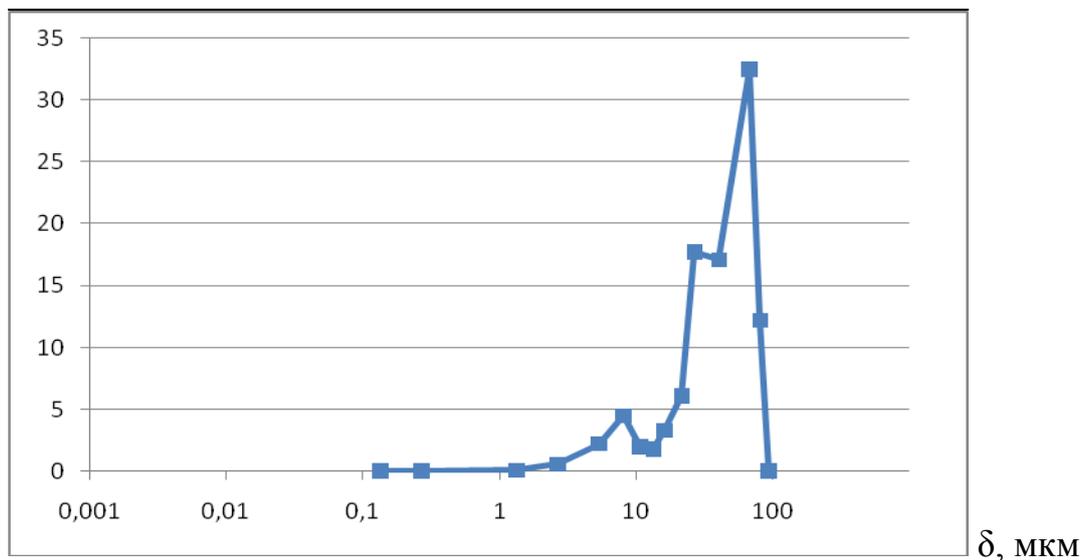


Рис. 6. Распределение относительной массы фракций частиц пыли f от размера частиц δ , поступающих из 2 восточной лавы пласта h_{10}^B в 1-бис восточный ходок пласта h_{10}^B (20 м от окна лавы) ОП «Шахта «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить закономерности изменения дисперсного состава шахтной пыли в горных выработках угольных шахт. В вентиляционных выработках в исходящих струях воздуха дифференциальная функция распределения счетного числа частиц пыли и производная от неё функция распределения массы фракций частиц по размерам частиц характеризуется одномодовой функциональной зависимостью, имеющей плавный четко выраженный максимум. Такая функция распределения аналитически выражается производными от гамма-функции или интеграла вероятности. Для шахтной пыли экспериментальным путем установлено, что такой функцией может служить логарифмическая нормальная функция распределения (ЛНР) массы фракций частиц по размерам частиц. Аналитический вид ЛНР приведен в [8].

В воздухоподающих выработках и призабойных пространствах подготовительных выработок дифференциальные функции распределения

массы фракций частиц пыли по их размерам характеризуются многомодовой зависимостью, имеющей два и более максимума. Максимумы функции распределения свидетельствуют о наличии в контролируемой выработке двух и более источников пылеобразования. Многомодовую функцию распределения частиц по размерам можно представить как сумму одномодовых составляющих [9].

Источники пылеобразования в горных выработках можно представить как локальные (точечные) источники, например, пересып с конвейера на конвейер, пункт погрузки, разгрузки (опрокид), так и как распределенные источники, например, распределённые по длине конвейера (вращающиеся ролики верхней и нижней ветвей конвейера, движущаяся лента, скребки по ставу скребкового конвейера).

Установленные дифференциальные функции распределения массы фракций частиц пыли по размерам частиц позволяют определять дисперсный состав шахтной пыли и медианный диаметр δ_{50} или медианный по активности аэродинамический диаметр АМАД для радиационно-активных частиц пыли. Знание этих характеристик дисперсного состава пыли позволяет определить ПРФ при оценке и контроле радиационной обстановки в угольной шахте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безпеки у вугільних шахтах (зі змінами): НПАОП 10.0-1.01-10. – Офіц. вид. – К.: Охорона праці, 2010. – 430 с. – (Нормативний документ Держгірпромнагляду України).
2. Рудничная вентиляция: Справочник / [Под. ред. К.З. Ушакова]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 440 с.
3. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах / [Петрухин П.М., Нецепляев М.И., Качан В.Н., Сергеев В.С.]. – М.: Недра, 1974. – 304 с.
4. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / [П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев и др.]. – М.: Недра, 1981. – 271 с.
5. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / [П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, А.М. Кульбачный и др.]. – М.: Недра, 1987. – 202 с.
6. Борьба с пылеобразованием в угольных шахтах. Этап 5 Разработка средств предупреждения и локализации взрывов угольной пыли. Раздел 1. Запыленность воздуха и пылеотложение в горных выработках Донбасса: технический отчет по работе №6 / МакНИИ. – Руководители работ: Рассолов Н.И., Новодерезкин О.П. – Макеевка-Донбасс, 1955. – 163 с.

7. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие / [Бородюк В.П., Воцинин А.П., Иванов А.З. и др.] ; под ред. Г.К. Круга. – М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.

8. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / Коузов П. А. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

9. Высокоэффективная очистка аэрозолей фильтрами Петрянова / [Басманов П.И., Кириченко В.И., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л.]. – М., 2002. – 193 с.

Получено: 14.11.2013

Встановлено закономірності дисперсного складу шахтного пилу у мережі вентиляційних і повітроподавальних гірничих виробок, що дозволяють визначати пилорадіаційний фактор під час оцінки і контролю радіаційного стану вугільних шахт.

Ключові слова: пилорадіаційний фактор, шахтний пил, дисперсний склад, функція розподілу, гірничі виробки.

The conformity of size-consist of mine dust in the network of ventilation and downcast mine workings have been determined which enable the determination of dust-and-radiation factor by assessment and control of radiation situation of coal mines.

Keywords: dust-and-radiation factor, mine dust, size-consist, distribution effect, mine workings.