

УДК 621.319.7.001

Д.С. ПУСТОВОЙ, канд. техн. наук
(Україна, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОАГУЛЯЦИИ ПЫЛИ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОЛЕ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА

Актуальность. Условия труда значительного числа трудящихся на обогатительных фабриках являются вредными. Отсутствие средств на новое строительство и реконструкцию, использование физически и морально изношенного оборудования, приводит к значительному превышению предельно допустимых концентраций (ПДК) пыли в воздухе рабочей зоны, высоким уровнем шумов, вибраций и др.

Одной из причин высокой запыленности воздуха является несовершенство действующих аспирационных систем фабрик. Очистка от пыли пылевоздушных потоков в таких системах осуществляется в основном с помощью циклонов, эффективность работы которых при очистке потоков с мелкодисперсной пылью является низкой. Вследствие рециркуляции воздушных потоков значительное количество мелкодисперсной пыли поступает в производственные помещения, что в значительной мере обуславливает существенное превышение ее ПДК в воздухе рабочей зоны.

Анализ существующих устройств для очистки газов. Недостатки используемых устройств для очистки газов связаны с неэффективностью положенных в их основу физических эффектов, что приводит к снижению эффективности улавливания вредных веществ из аспирационных потоков [1].

В настоящее время созданы эффективные средства для улавливания высокодисперсной пыли, среди которых, как наиболее перспективные, следует выделить электрофильтры. Однако применение электрофильтров ограничено в силу его избирательности в отношении извлекаемых из газов частиц, которые должны обладать невысоким удельным электрическим сопротивлением [2]. Кроме того, учитывая большие габариты и сложность электрофильтров, их невозможно без полной реконструкции обогатительных фабрик встраивать в действующие аспирационные системы.

Наиболее остро проблемы пылеулавливающего оборудования проявляются при решении задач очистки промышленных газов от твердых примесей с малым размером частиц. Обеспечить высокую степень очистки отходящих газов от частиц микронного размера при помощи используемых на сегодняшний день средств пылеулавливания не представляется возможным. Это связано с тем, что используемые пылеулавливающие установки в той или иной степени уменьшают свою эффективность при увеличении дисперсности пыли [1].

Загальні питання технологій збагачення

Решением проблемы удаления мелкодисперсной пыли (менее 5 мкм) из запыленного воздуха может быть коагуляция пыли с целью ее укрупнения и ускорения оседания [3].

Наибольший интерес при исследовании процесса коагуляции мелкодисперсной пыли при ионизации пылегазовой среды в поле импульсного коронного разряда представляет случай коагуляции твердых частиц пыли в потоке воздуха. Исследование процесса коагуляции мелкодисперсной пыли, переносимой потоком воздуха, позволит установить возможность и перспективность практического применения электроионизационной коагуляции в промышленных объектах при движении твердых частиц пыли с потоком воздуха.

В связи с этим возникает необходимость проведения исследований процесса электроионизационной коагуляции пыли в потоке воздуха.

Цели работы

1. Установить характер изменения концентрации ионов по сечению и длине зарядной камеры для создания импульсов униполярного коронного разряда с длительностью и скважностью обеспечивающих максимальный унос ионов за пределы разрядного промежутка;

2. Определить качественные и количественные характеристики процесса коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля заряженного в поле импульсного коронного разряда.

Материалы исследований. Для исследования процесса коагуляции мелкодисперсных частиц пыли заряженных в поле импульсного коронного разряда проводили опыты на лабораторной модели, схема которой показана на рис. 1.

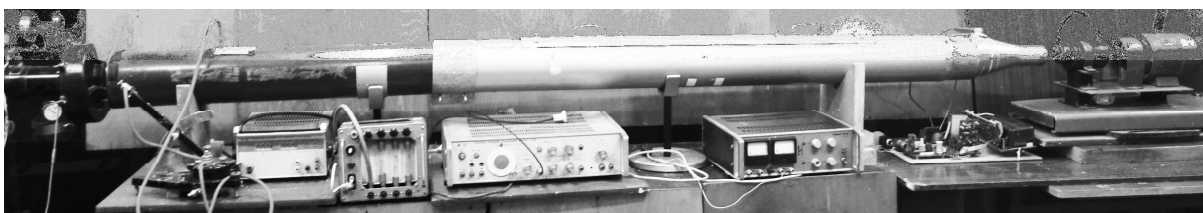


Рис. 1. Лабораторная модель для исследования процесса коагуляции мелкодисперсных частиц пыли

На участке трубопровода, расположенном за разрядным промежутком и вплоть до смешивания разноименно заряженных пылегазовых потоков, благодаря наличию ионов вынесенных из разрядного промежутка продолжается процесс зарядки частиц аэрозоля.

Процессы ударной зарядки, характерные для крупных частиц аэрозоля, протекают в этом случае под воздействием поля объемного заряда ионов, вынесенных из разрядного промежутка. Максимальное значение напряженности этого поля, которое согласно выражению [4-5]

$$E'_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{r_0}{r}\right)^2} - E_0 \frac{r_0}{r}, \quad (1)$$

где I – ток на единицу длины коронирующего электрода; r_0 – радиус коронирующего электрода; r – координата точки межэлектродного пространства; E_0 – критическая напряженность; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы) будет у стенок трубопровода, на порядок меньше напряженности поля в зарядном устройстве при действии ионизирующего напряжения.

По мере приближения к центру трубопровода напряженность поля от объемного заряда ионов снижается до нуля.

Величина зарядов частиц крупнодисперсной фазы аэрозоля может быть рассчитана по выражению [4].

$$g = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \rho^2 \left(E_r \frac{\pi k \epsilon n_r t_u m}{4\pi\epsilon_0 + \pi k \epsilon n_r t_u m} + E'_r \frac{\pi k \epsilon n_r t_n m}{4\pi\epsilon_0 + \pi k \epsilon n_r t_n m} \right) \quad (2)$$

где t_u – длительность импульса ионизирующего напряжения, с; t_n – длительность паузы, с; m – количество импульсов.

При этом время паузы между импульсами следует заменить временем пребывания частиц на участке от сетки до смешивания пылегазовых потоков, а напряженность поля для каждого участка трубопровода должна рассчитываться с учетом его расположения относительно оси потока и процессов рассеивания ионов на стенки трубопровода. Дополнительные заряды крупных частиц, которые они могут приобретать на данном участке, на процессы последующей коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля существенно не влияют. Кроме того, поскольку для участка трубопровода от сетки до смешивания пылегазовых потоков характерна незначительная напряженность поля, при малой величине заряда крупных частиц пыли не происходит их интенсивное осаждение и накопление на стенках трубопровода.

В отличие от этого, диффузионная зарядка мелкодисперсной фазы аэрозоля интенсивно протекает как в межэлектродном пространстве, так и на участке трубопровода от сетки до смешивания пылегазовых потоков.

В процессе коагуляции пыли происходит изменение ее дисперсного состава. Поэтому экспериментальное определение эффективности коагуляции производилось путем измерения функции распределения частиц по размерам до и после взаимодействия. В опытах использовался аэрозоль, полученный путем пневматического распыления угольной и кварцевой пыли. Распыление производилось с помощью генератора пыли, представляющего собой емкость с пылью установленной на вибраторе. От генератора пыли аэрозоль поступал в коронные зарядные устройства, где частицы приобретали заряды разного знака. Из зарядных устройств аэрозоль поступал в камеру смешивания, где и происходил процесс

Загальні питання технологій збагачення

коагуляції біполярно заряджених частиц мелкодисперсної пилі.

Во время подачи в канал с зарядным устройством запыленного потока воздуха, на коронирующие электроды подавалось импульсное напряжение с малой длительностью и большой скважностью импульсов. Отбор проб пыли на анализ производили пробоотборниками, установленными до зарядной камеры и на выходе коагуляционной камеры, как это показано на рис. 2.

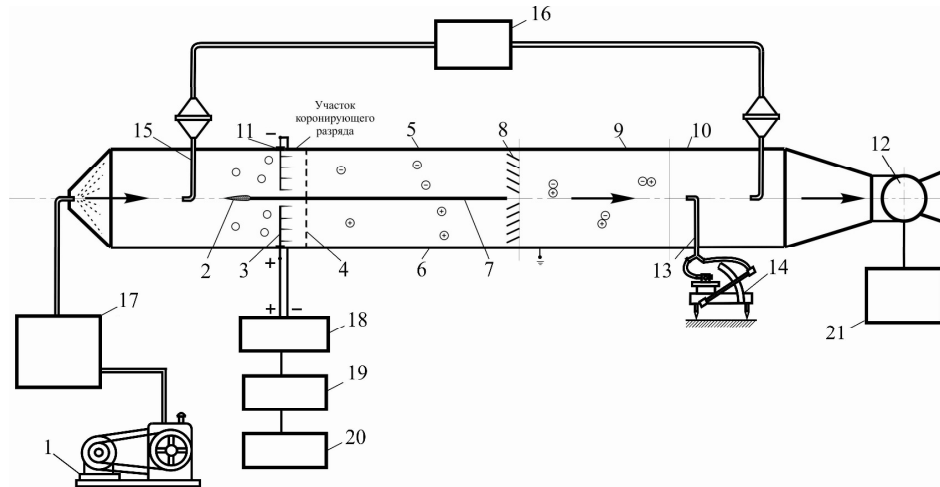


Рис. 2. Схема лабораторного стенда для исследования процесса коагуляции мелкодисперсных частиц пыли:

- 1 – компрессор; 2 – разделитель потока; 3 – коронирующие электроды;
- 4 – заземленные электроды; 5 и 6 – зарядные камеры; 7 – перегородка;
- 8 – турбулизатор; 9 – камера коагуляции; 10 – переходник; 11 – изолятор;
- 12 – вентилятор; 13 – пневмометрическая трубка; 14 – микроманометр;
- 15 – пылезаборная трубка; 16 – электроаспиратор ЭА-822;
- 17 – генератор пыли; 18 – высоковольтный трансформатор; 19 – ключ;
- 20 – генератор импульсов; 21 – регулируемый источник питания

Осаждение частиц на фильтр происходит за счет инерционного осаждения при пониженном давлении, создаваемым электроаспиратором.

Время отбора проб определялось количеством частиц осаждаемой пыли на фильтрах достаточным для анализа. При отборе пылевых проб на фильтры учитывалась необходимость получения препаратов, удобных для счета и измерения частиц [6]. Для этого, опытным путем подбиралась плотность укладки частиц пыли на фильтре таким образом, чтобы частицы не накладывались друг на друга. Также не принимались к дальнейшему анализу фильтры со слишком малым количеством частиц пыли в поле зрения. Отобранная проба считалась оптимальной, если число пылинок на площади 18×18 мкм было не более 8...10.

Чтобы результаты анализа достоверно отражали дисперсный состав пробы, из нее выделяли навески с минимальной потерей мелких частиц [6]. Приготавливали две навески.

Фильтры размещали под микроскопом и фотографировали в проходящем свете. Снимки сравнивали и определяли степень коагуляции.

На рис. 3 представлені результати проведених досліджень.

Из рисунков видно, что дисперсный состав исходной пыли при прохождении через камеру зарядки и камеру коагуляции изменяется в сторону укрупнения, т.е. мелкодисперсные частицы пыли соединяясь между собой образуют более крупные конгломераты.

Взаимодействие частиц аэрозоля после смешивания разноименно заряженных пылегазовых потоков в основном сводится к кулоновскому притяжению разноименно заряженных частиц.

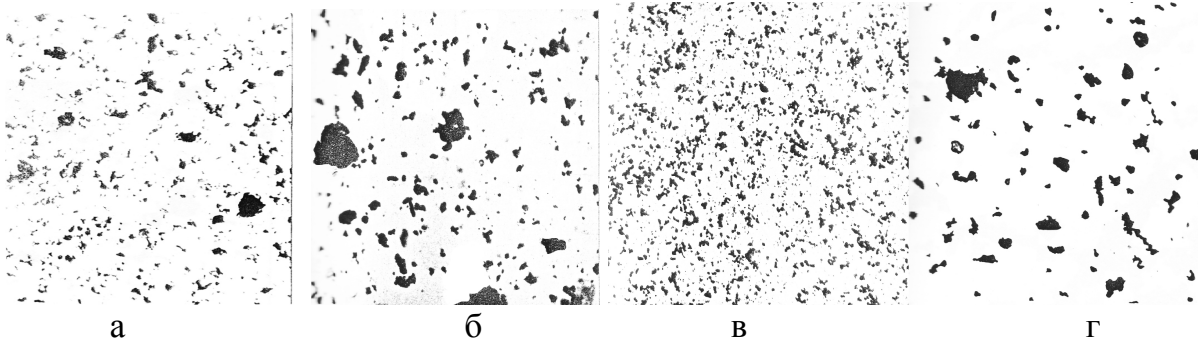


Рис. 3. Результаты исследования коагуляции мелкодисперсных частиц пыли заряженных в поле импульсного коронного разряда:
а и в – соответственно, частицы угольной и железорудной пыли до входа в зарядное устройство; б и г – частицы пыли после выхода из камеры коагуляции

Коагуляция разноименно заряженных частиц в отсутствие электрического поля заключается в том, что кулоновские силы притяжения способствуют сближению частиц, в результате чего увеличивается коэффициент захвата и в конечном итоге эффективность коагуляции [6].

Объединение частиц происходит по всей длине камеры коагуляции, длина которой определяется эффективностью протекания процесса коагуляции. Чем больше длина камеры коагуляции, тем большее количество заряженных мелкодисперсных частиц аэрозоля будут взаимодействовать и тем больше будет образовано конгломератов. Однако при слишком большой длине камеры эффективность коагуляции может снизиться вследствие снижения ионной активности потока. Кроме того, при коагуляции пыли могут образовываться неустойчивые агрегаты (взвеси) в виде хлопьев, поэтому для более устойчивого агрегатирования частиц мелкодисперсной пыли в камеру коагуляции можно вводить водный туман. Для этой цели в отверстия по периметру камеры коагуляции вставляются туманообразующие форсунки.

Результаты исследований кварцевой и угольной пыли приведены в табл. 1-4.

Загальні питання технологій збагачення

Таблиця 1

Результаты микроскопического анализа кварцевой пыли на входе в камеру зарядки

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц						Число частиц во всех полях зрения N
	1-е поле	2-е поле	3-е поле	4-е поле	5-е поле	6-е поле	
1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	65	58	68	70	64	66	391
2,0	24	25	22	19	23	24	137
3,5	10	8	9	7	9	10	53
5,0	1	3	2	2	3	1	12
6,5	3	1	1	1	2	1	9
8,0	1	–	2	1	2	2	8
9,5	–	1	2	2	1	1	7
11,0	1	2	1	1	1	–	6
12,5	–	1	–	1	1	1	4
14,0	1	–	1	1	–	–	3
15,5	–	1	–	1	1	–	3
1	2	3	4	5	6	7	8
17,0	–	1	–	–	–	1	2
18,5	1	–	1	–	–	–	2
20,0	–	–	–	1	1	–	2
21,5	–	–	–	1	–	–	1
	107	101	109	108	108	107	$\Sigma N = 640$

Таблиця 2

Результаты микроскопического анализа угольной пыли на входе в камеру зарядки

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц						Число частиц во всех полях зрения N
	1-е поле	2-е поле	3-е поле	4-е поле	5-е поле	6-е поле	
0,5	41	48	39	51	55	43	277
2,0	33	21	24	16	17	15	126
3,5	10	7	8	3	9	10	47
5,0	2	3	–	4	1	2	12
6,5	–	2	1	2	2	2	9
8,0	2	1	1	2	–	2	8
9,5	2	–	2	–	2	1	7
11,0	–	2	–	1	2	2	7
12,5	2	1	1	2	–	–	6
14,0	1	–	1	1	1	1	5
15,5	–	1	1	–	1	–	3
1	2	3	4	5	6	7	8
17,0	1	–	1	–	–	1	3
18,5	–	1	–	–	1	–	2
20,0	–	–	–	–	–	–	0
21,5	–	–	–	1	–	–	1
							$\Sigma N = 513$

Загальні питання технологій збагачення

Таблиця 3

Результаты микроскопического анализа кварцевой пыли на выходе из камеры коагуляции

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц						Число частиц во всех полях зрения N
	1-е поле	2-е поле	3-е поле	4-е поле	5-е поле	6-е поле	
0,5	–	–	–	–	–	–	–
2,0	–	–	–	–	–	–	–
3,5	–	–	–	–	–	–	–
5,0	2	3	3	2	2	3	15
6,5	5	3	5	3	5	6	27
8,0	3	4	4	3	2	5	21
9,5	1	2	1	1	3	2	10
11,0	1	2	2	1	2	1	9
12,5	2	1	1	–	2	2	8
14,0	1	–	1	–	1	–	3
15,5	–	1	1	–	–	–	2
17,0	1	–	–	–	1	–	2
18,5	–	–	–	1	–	–	1
20,0	–	–	–	–	–	1	1
21,5	–	1	–	–	–	–	1
	16	17	18	11	18	20	$\Sigma N = 100$

Таблиця 4

Результаты микроскопического анализа угольной пыли на выходе из камеры коагуляции

Диаметр частиц δ , мкм	Число частиц						Число частиц во всех полях зрения N
	1-е поле	2-е поле	3-е поле	4-е поле	5-е поле	6-е поле	
1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	–	–	–	–	–	–	–
2,0	–	–	–	–	–	–	–
3,5	–	–	–	–	–	–	–
5,0	4	5	3	6	4	5	27
6,5	3	4	5	4	4	5	25
8,0	4	5	3	2	4	3	21
9,5	2	1	1	1	3	2	10
1	2	3	4	5	6	7	8
11,0	1	2	1	2	–	1	7
1	2	3	4	5	6	7	8
12,5	–	1	1	–	2	1	5
14,0	1	–	–	1	1	1	4
15,5	–	1	–	1	–	1	3
17,0	1	–	1	–	–	–	2
18,5	1	–	1	–	–	1	3
20,0	–	1	–	1	–	–	2
21,5	–	–	–	–	–	1	1
	17	20	16	18	18	21	$\Sigma N = 110$

По данным таблиц 1-4 построены интегральные кривые распределения (рис. 4) для кварцевой и угольной пыли.

Сопоставительный анализ дисперсного состава кварцевой и угольной пыли

Загальні питання технологій збагачення

по результатам микроскопического анализа на входе в камеру зарядки и на выходе из камеры коагуляции показывает, что пыль в этих местах отличается по фракционному составу.

Сравнение интегральных кривых распределения изображенных на рис. 4 показывает, что кривые полученные на выходе из камеры коагуляции значительно смещены по отношению к кривым полученным на входе в камеру зарядки в область более крупных частиц пыли.

Кривые имеют более пологий характер, что указывает на определенное увеличение доли крупных фракций в пробе взятой после процесса коагуляции частиц.

Для получения количественной оценки степени коагуляции, на основании обработки интегральных кривых получены данные для построения дифференциальных кривых распределения, из которых находили величину эквивалентного диаметра, соответствующую максимальному числу частиц в данной системе.

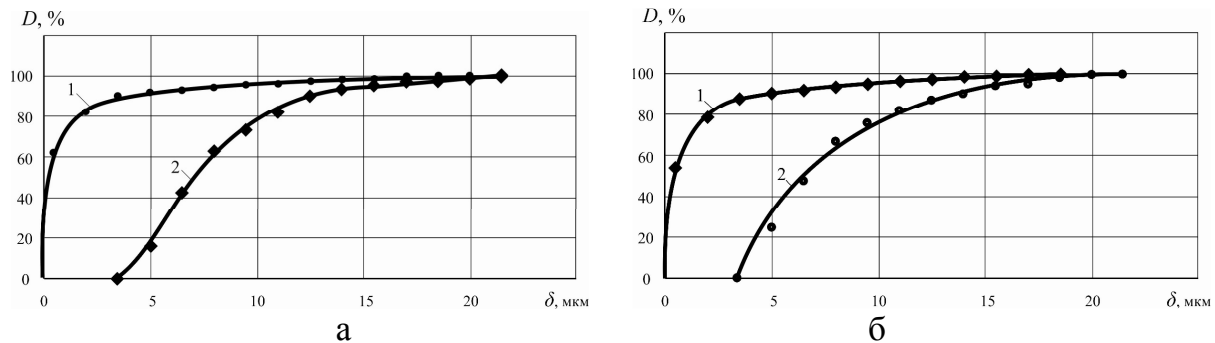


Рис. 4. Интегральные кривые распределения частиц:

а – кварцевой пыли; б – угольной пыли;

1 – на входе в камеру зарядки; 2 – на выходе из камеры коагуляции

Интегральные кривые обрабатывали следующим образом: через равные интервалы диаметров, которые выбирали произвольно, строили ординаты до пересечения с интегральной кривой и находили значения ΔD – приращение процентного содержания частиц в выбранном интервале диаметров $\Delta\delta$ (очевидно, ΔD равна разности двух соседних ординат).

Полученные таким образом данные приведены в таблицах 5-8.

Таблица 5

Данные для построения дифференциальной кривой распределения числа частиц по размерам кварцевой пыли на входе в камеру зарядки

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %	82,5	9,5	2	1,2	1,2	1,2	1	0,4	0,6	0,4	0,2
$\Delta D/\Delta\delta$	41,25	4,75	1	0,6	0,6	0,6	0,5	0,2	0,3	0,2	0,1

Таблиця 6

Данные для построения дифференциальной кривой распределения числа частиц по размерам угольной пыли на входе в камеру зарядки

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %	80	8	4	2	2	2	1,5	1	1
$\Delta D/\Delta\delta$	40	4	2	1	1	1	0,75	0,5	0,5

Таблиця 7

Данные для построения дифференциальной кривой распределения числа частиц по размерам кварцевой пыли на выходе из камеры коагуляции

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %	0	4	26	33	15	6	9	3	2	1	1
$\Delta D/\Delta\delta$		2	13	16,5	7,5	3	4,5	1,5	1	0,5	0,5

Таблиця 8

Данные для построения дифференциальной кривой распределения числа частиц по размерам угольной пыли на выходе из камеры коагуляции

δ , мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\Delta\delta$, мкм	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ΔD , %		12	32	20	12	8	8	4	2
$\Delta D/\Delta\delta$		6	16	10	6	4	4	2	1

Откладывая на оси абсцисс значения эквивалентного диаметра δ , а по оси ординат – функцию распределения $\Delta D/\Delta\delta$, строили прямоугольники, принимая за их основания равные интервалы диаметров $\Delta\delta$, а за высоту – $\Delta D/\Delta\delta$.

Полученные дифференциальные кривые распределения (рис. 5), позволяют определить диаметр частиц, которых больше всего в данной дисперсной системе, их наиболее вероятный радиус.

Из графиков, приведенных на рис. 5 видно, что мода отлагающейся на фильтре кварцевой пыли при выходе из камеры коагуляции (8 мкм) превышает моду на входе в камеру зарядки (2 мкм) в 4 раза (рис. 5, а), а угольной пыли при выходе из камеры коагуляции (6 мкм) превышает моду на входе в камеру зарядки (2,5 мкм) в 2,4 раза (рис. 5, б).

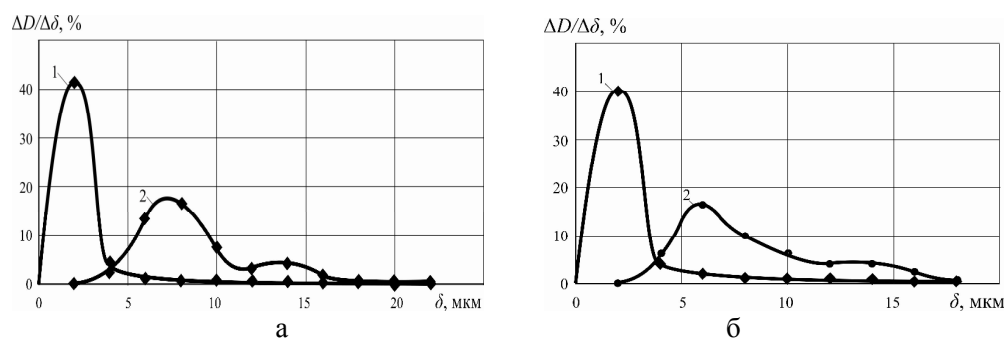


Рис. 5. Дифференциальные кривые распределения частиц:

а – кварцевой пыли; б – угольной пыли;

1 – на входе в камеру зарядки; 2 – на выходе из камеры коагуляции

Выводы

На основании выполненных экспериментальных исследований можно утверждать, что при зарядке мелкодисперсных частиц разделенного пылегазового потока разноименными зарядами в зарядной камере и дальнейшем смешивании двух потоков, происходит интенсивное соединение разноименно заряженных частиц пыли в более крупные агрегаты за счет поляризационного взаимодействия, что в свою очередь дополнительно повышает эффективность пылеочистки.

Взаимно противоположное движение частиц с разноименными зарядами способствует их сближению и коагуляции под воздействием электростатических сил. При этом, ввиду отсутствия внешних электростатических сил, направленное движение частиц пыли к стенкам зарядной камеры и их осаждение на них практически не происходит.

После камеры коагуляции также происходит полный вынос всех вновь образовавшихся фракций.

Список литературы

1. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Шалунова К.В. Разработка и исследование ультразвуковой коагуляционной камеры // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 303-309.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1974. – 207 с.
3. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
4. Голинько В.И., Пустовой Д.С. Обоснование параметров процесса зарядки пыли в поле импульсного униполярного коронного разряда // Металургійна та гірничорудна пром-сть. – 2015. – № 1. – С. 151-156.
5. Мирзабекян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда // Сильные электрические поля в технологических процессах. – М.: Энергия, 1969. – С. 20-39.
6. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

© Пустовой Д.С., 2017

*Надійшла до редколегії 22.04.2017 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голенько*