

УДК 544.772.43

М.И. Коломеец,

В.В. Севриков, профессор, д-р техн. наук

А.П. Васютенко, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: sntu-peot@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ ЦЕМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Представлен анализ дисперсного состава пылевых отходов, образующихся при производстве цемента Бахчисарайским комбинатом «Стройиндустрия», как объекта исследования. Проанализированы основные методы определения дисперсного состава сыпучих веществ, вследствие чего принят к исследованию фотоседиментационный метод. Приведены результаты исследования: экспериментальные данные, графические и аналитические регрессионные зависимости.

Ключевые слова: цемент, пыль, дисперсность, гранулометрический состав, гистограмма, регрессия.

Актуальность вопроса

Одной из основных отраслей экономики является строительная. В Украине, несмотря на резкое сокращение промышленного производства в переходный период рыночных отношений, строительная отрасль довольно успешно функционирует даже при кризисе в экономике. В основе строительной отрасли находится цементное производство. Объём производства цемента в стране составляет около 21,1 млн. т в год. При ориентировочной потере цемента в виде пылевых отходов, составляющей от 3 до 10%, годовой объём цементной пыли, выбрасываемой в окружающую среду Украины, составляет 1,3 млн. т. Это сопровождается огромными потерями сырья и продукта, загрязнением окружающей среды и вредным воздействием пыли на здоровье людей.

Попытка Владимировского шамотного завода (Донецкая область) и Бахчисарайского завода (Крым) уловленную электрофильтрами пыль возвращать в технологический цикл, как добавку к сырью, успеха не принесла, так как интенсивность пылевых выбросов только возрастает. Возврат, уловленной воздухоочистными сооружениями пыли в карьеры с целью их рекультивации, является так же нецелесообразным, так как её количество мизерно по отношению к объёму извлеченных пород, а транспортные расходы при этом велики. Кроме того, транспортируемая и выброшенная в карьер пыль раздувается ветром и воздушными потоками, дополнительно загрязняет окружающую среду. Это и отрицательное воздействие на организм человека цементной пыли свидетельствует о необходимости изыскания новых направлений и методов утилизации её. При изучении пыли, как с целью возможной утилизации, так и для исследования санитарно-гигиенических свойств, одной из наиболее важных её характеристик является дисперсный состав. Без исследования степени дисперсности промышленных и, в частности, цементных пылей нельзя объективно оценивать эффективность действующих пылеочистных устройств, загрязненность окружающей среды, влияние их на здоровье людей и другие биологические объекты. Всё это определяет *актуальность* данного вопроса.

Состояние изученности вопроса и цель исследования

С размерами пылевых частиц связаны длительность пребывания их во взвешенном состоянии в воздухе, глубина проникновения в дыхательные пути, физико-химическая активность и другие свойства. Вне зависимости от физико-химических свойств все виды пылевых частиц вначале оказывают на легочную ткань механическое действие. При этом легочная ткань реагирует на них, как на инородное тело, стремясь удалить его. Пыль, попавшая в легкие, поглощается так называемыми «пылевыми клетками» (клетками легочного эпителия), которые затем стремятся удалить пыль из легких различными путями. Один из путей – удаление пыли вместе с мокротой. Другой путь – удаление пыли по лимфам. Частицы пыли размером менее 1 мкм фагоцитируются легче; более крупные пылинки удаляются медленно и накапливаются в легких и в лимфатических узлах, приводя их к поражению. Пыль, проникшая глубоко в дыхательные пути, может привести к развитию в них специфического заболевания – пневмокониоза, сущность которого заключается в развитии фиброза (замещение легочной ткани соединительной тканью).

Особую опасность представляют респираторные и трахеобронхиальные пылинки, способные проникать в альвеолы и периферию лёгкого. В мировой практике с учётом рекомендации Всемирной организации здравоохранения в ряде стран осуществлён переход на нормированное содержание в воздушной среде частиц с размерами менее 2,5 мкм. Таким образом, для объективной оценки опасности

здоровью человека в воздухе рабочей и санитарно-защитной зон требуется знать, в первую очередь, процентное содержание частиц малых размеров. Именно поэтому изучение данной характеристики столь необходимо.

Сыпучие материалы и, в частности, промышленные пыли довольно широко изучены. С целью утилизации пылей и оценки запылённости окружающей среды особый интерес представляют их физико-химические свойства [1,2]. Пылевидные дисперсные вещества в воздухе рабочей и санитарно-защитной зон в инженерно-экологических системах, как правило, являются полидисперсными, т.е. содержат достаточно широкий диапазон размеров частиц. Согласно П.А. Коузову, действительное зерновое распределение измельченного материала зависит от условий его образования, но распределения одного и того же материала различны в зависимости от применяемого метода дисперсного анализа [2]. Однако достоверность дисперсного состава зависит от более широкого набора обстоятельств разных производств и видов пылей, что вызывает необходимость их дальнейшего исследования.

Целью данной работы является исследование дисперсного состава пыли цементных производств с приемлемой достоверностью для её утилизации в качестве вторичного сырья и оценки запылённости воздушной среды.

Методика исследования

Для определения дисперсного состава могут быть использованы различные методы, среди которых метод сит, метод каскада проточных циклов, метод микрокопирования и др. В целом все они сводятся к определению размера частиц.

Имеется несколько способов выражения размеров пылевых частиц: по диаметру; по размеру ячеек сит; по диаметру шарообразных частиц, имеющих одинаковую массу; по наибольшему линейному размеру частиц неправильной формы; по условному диаметру и скорости витания шарообразной пылевой частицы. Наиболее доступно размер частицы выражать диаметром, приводя её к шарообразной форме. Однако пылинки такой формы практически не встречаются. Поэтому для выражения их размера пользуются понятиями условного диаметра, эквивалентного диаметра, седиментационного диаметра и др.

Эквивалентный диаметр – это диаметр шара, объем которого равен объему частицы, или диаметр круга, площадь которого одинакова с площадью проекции частицы неправильной формы. Седиментационный диаметр частицы – диаметр шара, скорость оседания и плотность которого соответственно равны скорости оседания и плотности частицы неправильной формы.

Интервал дисперсности аэрозольных частиц весьма велик. Нижний предел его определяется возможностью длительного самостоятельного существования весьма малых частиц во взвеси; верхний – ограничен быстрым осаждением крупных частиц под действием сил тяжести, которые во взвешенном состоянии практически не пребывают.

Проанализировав известные методы оценки дисперсного состава пылей с учетом доступности и достоверности принят в данном исследовании седиментационный метод, основанный на зависимости скорости осаждения однородных частиц в вязкой среде от их размеров. Гранулометрический состав определяется регистрацией фотоэлектрическим способом во времени на заданной высоте концентрации или массы осадка. Помимо быстроты к преимуществам фотоседиментационного метода относятся также возможность автоматизации и простота математической обработки результатов. Этот метод применяется в довольно широком диапазоне размера частиц (от 2 до 100 мкм). В нашем лабораторном эксперименте луч света от стабилизированного источника (рисунок 1) подавался через водный раствор (200 – 400 мл) в плоскую осадительную кювету на фотоседиментограф ФС-112, который фиксировал изменения импульса. Фракционный состав рассчитывался следующим образом: задавались граничные размеры фракций и по номограмме определялось время, в течении которого частицы больше каждого граничного размера опускаются от зеркала суспензии до горизонтальной оси светового потока.

Объектом исследований была принята пыль Бахчисарайского цементного завода, уловленная электрофильтрами.

Для обработки экспериментальных данных и аппроксимации их теоретическими выражениями приняты методы математической статистики и теории вероятности с использованием ЭВМ, в частности, метод наименьших квадратов в программе «Microsoft Excel» и корреляционно - регрессионный анализ. Оценка грубых погрешностей в рядах экспериментальных данных производилась по стандартному (ГОСТ 11.002 – 73) критерию

$$V_R = |(x_R - \bar{x})/S|,$$

где \bar{x} – среднее арифметическое; S – среднее квадратическое отклонение

$$\left(S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2} \right);$$

n – число наблюдений, x_R – наблюдение с подозреваемой грубой погрешностью, которое из выборки при наличии её исключается. Грубая погрешность имеет место если $V_R \geq \beta$, где β – табличное значение, при заданной доверительной вероятности γ , например $\gamma = 0,95$.

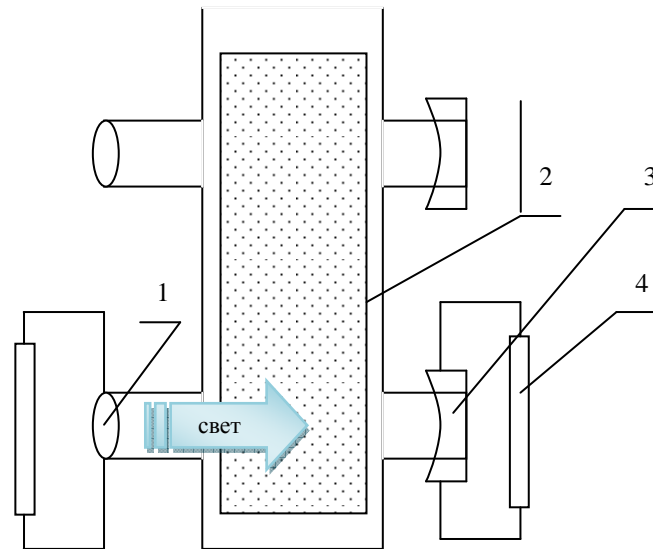


Рисунок 1 – Структурно – функціональна схема фотоседиментографа:
1 – источник света; 2 – кювета для суспензии; 3 – фотоприёмник; 4 - регистрирующий потенциометр.

Результаты исследования

Весь диапазон крупных частиц по предварительным данным анализа, принят от 0 до 100 мкм. Верхний предел 100 мкм был ограничен малым содержанием в общей массе пылевых частиц такого размера и их быстрым осаждением в воздушной среде. Середина нижнего интервала 5 мкм принята из расчёта того, что частицы пыли с диаметром ≤ 5 мкм витают в воздушной среде, т.е. практически не осаждаются на поверхностях в производственной зоне (в зоне их образования). Поскольку, интервалы лабораторного исследования неравномерны и имеют большой разброс, возникла необходимость представить исследуемый диапазон равными интервалами с шагом $d = 10$ мкм. Для этого использован метод интервалов с оценкой вероятности попадания частиц в заданные интервалы, в котором использованы интегральные функции плотности вероятности нормированного нормального распределения с центром группирования в середине интервала.

Упорядоченные таким образом данные дисперсного состава цементной пыли, полученные фотоседиментационным методом анализа приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что более 95 % пыли составляют частицы размером от 0 до 50 мкм, т.е. частицы наибольшее время находящиеся во взвешенном состоянии, и чем меньше частицы, тем более длительное такое их состояние. Наибольший выход пыли (более 50 %) из отмеченного диапазона составляют фракции с размером частиц от 10 до 30 мкм. Эти фракции образуют пылевоздушную смесь (аэрозоль), вдыхаемую человеком.

Таблица 1 – Дисперсный состав пыли

Происхождение пыли	Диапазон x , мкм	Средняя ордината в новом диапазоне \bar{x} , мкм	Выход фракций y , %
Цементная пыль Бахчисарайского комбината (CaCO ₃)	0...10	5	12,0
	10...20	15	36,2
	20...30	25	19,39
	30...40	35	17,2
	40...50	45	12,8
	50...60	55	0,3
	60...70	65	1,2
	70...80	75	0,8
	80...90	85	0,3
90...100	95	1,2	

Различные методы анализа и приборы, применяемые в этих методах, обладают различной точностью, критерием которой является погрешность измерения. Погрешность прибора является преобладающей составляющей погрешности метода. Эта погрешность вызывает различные отклонения значений от истинного (действительного) значения измеряемой физической величины, в нашем случае дисперсности пыли.

Построенная графическая зависимость по экспериментальным значениям (точкам) в виде ломанной кривой отличается от теоретической кривой. Необходимо эту ломанную кривую выровнять. Для этого принимаем аппроксимацию экспериментальных данных теоретической зависимостью (аналитическим выражением), приближающейся к действительной зависимости.

Характер экспериментальной кривой (ряд 1 точек ●, рисунок 2) предполагает, что эта зависимость может быть аппроксимирована уравнением полинома и выражениями классических распределений Гаусса и Рэлея.

Из полиномиальных выражений наиболее тесную связь даёт аппроксимация уравнением полинома четвёртого порядка (ряд 2). Значения оценочных статистических критериев в виде среднеквадратического отклонения $S=5,53$, свидетельствующего о разбросе экспериментальных данных от выровненной кривой, и коэффициента корреляции R (детерминации $R_g=R^2=0,9028$), свидетельствующего о мере тесноты линейной связи признаков X и Y , т.е. степени приближения зависимости между случайными величинами к линейной функциональной зависимости, характеризуют как хорошую аппроксимацию. В этом случае аппроксимирующее выражение имеет вид

$$Y = -0,6x^4 + 0,002x^3 - 0,155x^2 - 3,835x - 1,0943 - 9e. \quad (1)$$

Недостатком данной математической модели, как и многих других эмпирических зависимостей, является то, что она работает только в конкретных условиях эксперимента. Осуществлять прогноз характера распределения дискретности пыли за граничными пределами диапазона частиц 5...95 мкм проблематично. Более прогностическими моделями распределения плотности вероятности размеров частиц пыли являются выражения закона Гаусса и закона Рэлея (в механике законом эксцентриситета) соответственно:

$$Y = Z(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}; \quad (2)$$

$$Y = \varphi(x) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

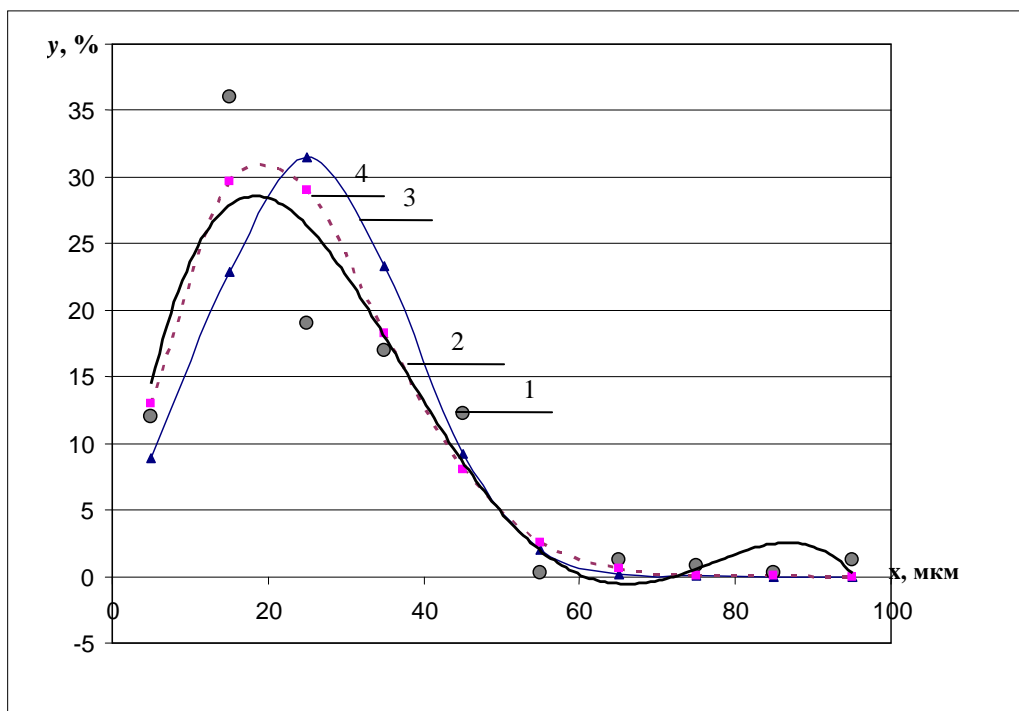


Рисунок 2 – Кривые аппроксимирующих выражений экспериментальных результатов:
1 – экспериментальные данные (ряд 1); 2 – аппроксимация выражением полинома 4го порядка (ряд 2);
3 – аппроксимация выражением закона Гаусса; 4 – аппроксимация выражением закона Рэлея

Для построения кривых распределения данных законов использовано стандартно нормированное распределение дифференциальной функции с новым аргументом t . В этом случае выражения (2) и (3) имеют вид:

$$Y = Z(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad \text{при} \quad t_i^z = \frac{x_i - \bar{x}}{S}; \tag{4}$$

$$Y = \varphi(t_i) = t \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad \text{при} \quad t_i^p = \frac{0,655x_i}{S}, \tag{5}$$

где $S = \sigma$ – среднеквадратическое отклонение; x_i – середина i -го интервала (при равномерном интервале шагом $d = 10$ мкм).

В выражении (5) параметра t появляется значение 0,655, так как отклонение Рэлея $S_r = \frac{S}{\sqrt{2 - \pi/2}}$,

т.е. $\sqrt{2 - \pi/2} = 0,665$.

Значения теоретических частот (плотностей вероятностей) вычисляются по выражениям:

$$m_i^z = \frac{nd}{S} Z(t_i) \quad \text{– для распределения Гаусса}; \tag{6}$$

$$m_i^p = \frac{0,655nd}{S} \varphi(t_i) \quad \text{– для распределения Рэлея}, \tag{7}$$

где n – объём выборки (число наблюдений).

Значение функций $Z(t_i)$ и $\varphi(t_i)$ вычисляются по формулам (4) и (5) или принимаются по таблицам [5].

Вычисленные значения по выражениям (4), (5) и (6), (7) занесены в таблицу 2, по которым построены теоретические кривые распределения дисперсности цементной пыли (рисунок 2).

Таблица 2 – Промежуточные вычисления и значения теоретических частот

№	Для нормального закона (Гаусса)			Для закона Рэлея		
	$t_i^z = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$	$Z(t_i)$	$m_i^z = \frac{nd}{S} Z(t_i)$	$t_i^p = \frac{0,655x_i}{S}$	$\varphi(t_i)$	$m_i^p = \frac{0,655nd}{S} \varphi(t_i)$
1	2	3	4	5	6	7
1	-1,589	0,113	8,922	0,259	0,250	12,929
2	-0,800	0,290	22,874	0,756	0,574	29,686
3	-0,010	0,399	31,504	1,293	0,561	29,013
4	0,779	0,259	23,293	1,818	0,352	18,205
5	1,569	0,117	9,199	2,327	0,155	8,016
6	2,358	0,025	1,974	2,844	0,050	2,586
7	3,148	0,003	0,221	3,361	0,012	0,621
8	3,938	0,00017	0,013	3,878	0,002	0,103
9	4,727	0,0000056	0,00044	4,395	0,0003	0,016
10	5,517	0,000000098	0,0000077	4,912	0,00003	0,0016

Оценка достоверности аппроксимации принятыми выше выражениями выполнено по среднеквадратическому отклонению

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{i3} - m_{i6})^2}{n-1}}, \tag{8}$$

где m_{i3} – экспериментальная вероятность (таблица 1, столбец 4), m_{i6} – вычисленная вероятность (таблица 2, столбцы 4, 7).

Выполнив вычисления по (8), имеем: для полинома $S_n = 4,1$; для гауссовского распределения $S_z = 6,6$; для рэлеевского распределения $S_p = 4,3$. Из сопоставления среднеквадратических отклонений следует принять, с учетом большей корректности прогнозирования дисперсности цементной пыли за пределами экспериментального исследования, выражения закона Рэлея.

Для полноты оценок характеристик рэлеевского распределения определим его асимметрию и островершинность кривой для сравнения с кривой нормального гауссовского распределения.

Асимметрия определяется по выражению $a_s = m_3 / \sigma^3$, где m_3 – третий центральный момент распределения (он определяется по начальным моментам распределения 1-го, 2-го и 3-го порядков; вычисленные значения для нашей задачи ровно 1235,36); σ – дисперсия (в нашем случае $\sigma = 12,8$).

Вычисленные значения $a_s = 0,579$. Это означает, что кривая распределения имеет правую асимметрию по отношению к кривой нормального гауссовского распределения, так как $a_s > 0$.

Островершинность кривой рэлеевского распределения определяется по выражению эксцесса $e_k = m_4 / \sigma^4$, где m_4 – четвёртый центральный момент распределения который так же определяется по выражениям начальных моментов, и он равен 87391,85).

Вычисленное значение $e_k = 0,185$. Кривая рэлеевского распределения более островершинная по отношению к кривой нормального распределения, так как $e_k > 0$.

Проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что определён гранулометрический состав (дисперсность) реальной цементной пыли Бахчисарайского комбината в реальном диапазоне размеров частиц, что свойственно цементным пылям других производств, так как технологии получения цемента практически одинаковы.

Перспективой дальнейших исследований является определение химического состава исследуемой пыли путём лабораторного анализа.

Библиографический список

1. Азаров В.Н. О фракционном составе пыли в рабочей зоне и инженерно-экологических системах / В.Н. Азаров // Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем: матер. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 25-29 сент. 2002 г. — СПб, 2002. — С. 67–68.
2. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. — Л.: Химия, 1974. — 280 с.
3. Утилизация минеральных пылей промышленных производств в качестве средств пожаротушения с целью снижения их стоимости и охраны воздушного бассейна: отчет о НИР (промежуточ.) / Севастопольский приборостроительный ин-т; рук. Севриков В.В.; исполн.: Петин В.А. [и др.]. — Севастополь, 1982. — 68 с. — № ГР 81050597. — Инв. № 02860000107.
4. Рудзит Я. А., Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении: учеб. пособие для студентов приборостроительных специальностей вузов / А.Я. Рудзит, В.Н. Плуталов. — М.: Машиностроение, 1991. — 304 с.
5. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей / Я.Д. Колкер. — К.: Техника, 1976. — 200 с.

Поступила в редакцию 27.01.2010 г.