

Нефелометрический метод измерения пыли в аспирационном воздухе и отходящих газах на цементных заводах

С. А. Лысенко, М. М. Кугейко

*Белорусский государственный университет, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: kugeiko@bsu.by*

На основе разработанной статистической микрофизической модели цементной пыли определен набор наиболее информативных длин волн полупроводниковых лазерных источников и углов приема рассеянного излучения относительно массовой концентрации и эффективного размера пылевых частиц. Получены полиномиальные множественные регрессии между оптическими и микрофизическими характеристиками пыли, позволяющие определять микрофизические характеристики пыли для широких диапазонов ее физико-химических свойств.

Ключевые слова: цементная пыль, массовая концентрация, эффективный размер, нефелометр, множественные регрессии.

Введение

Деятельность цементных заводов неизбежно связана с интенсивным выделением газопылевых потоков в атмосферу. Высокая концентрация твердых загрязняющих веществ (пыли) в выбросах наносит огромный вред окружающей среде, ухудшает условие жизни людей, приводит к безвозвратной потере большого количества сырья и готового продукта.

Для уменьшения количества пыли в отходящих газах и аспирационном воздухе в рабочих зонах и цехах используются различные пылеулавливающие аппараты (циклоны, рукавные фильтры, электрофильтры и т. п.). В соответствии с действующими в настоящее время правилами и стандартами для контроля эффективности существующих и оценки производительности проектируемых пылеулавливающих аппаратов используется массовая концентрация пыли (МКП) в отходящих газах. Данный параметр также используется санитарно-гигиеническими и эпидемиологическими службами для количественной оценки промышленных выбросов пыли в атмосферу.

Оптические методы измерения МКП основаны на регистрации ослабления (фотометрические) или рассеяния (нефелометрические) светового потока, при его прохождении через объем с пылевыми частицами. При этом главным недостатком первого класса методов является их низкая чувствительность при измерении малых концентраций (менее 30 мг/м³), а также невозможность контроля высоких концентраций (более 10 г/м³) вследствие сильного ослабления светового излучения. Кроме того, данным методам свойственна резкая потеря чувствительности при измерении концентрации частиц с размером более 8.0...10.0 мкм, характерным для частиц цементной пыли.

Для измерения аэрозольных частиц в промышленных процессах гораздо более эффективными оказываются нефелометры, использующие рассеяние под малыми углами. При этом переход от коэффициента рассеяния $\beta(\theta)$ под углом θ к массовой концентрации M аэрозоля осуществляется с использованием расчетного или эмпирического коэффициента K_θ , связывающие данные параметры. Значение коэффициента K_θ не является строго детерминированным, а может изменяться в широких пределах в зависимости от микроструктуры аэрозоля, что приводит к необходимости перекалибровки прибора на конкретный тип аэрозоля.

Устранить влияние на результат измерения M физико-химических свойств аэрозоля можно с использованием измерений рассеянного излучения под некоторыми углами θ . В этом случае некоторые оценки параметров распределения аэрозольных частиц по размерам могут быть получены в результате решения обратной задачи [1].

1. Регрессионный метод определения размера и массовой концентрации частиц цементной пыли

Регрессионный метод решения обратных задач предполагает, что искомые микрофизические параметры (МФП) аэрозоля (в частности его массовая концентрация и эффективный размер r_{eff} частиц) могут быть найдены при помощи некоторой статистической функции от измеряемых оптических характеристик аэрозоля. В настоящей работе качестве функциональной связи между МФП цементной пыли и значениями ее коэффициента направленного рассеяния $\beta(\theta_i)$ под углами θ_i использовались кубические полиномы следующего вида:

$$\ln M = a + \sum_{i=1}^{N_\theta} \sum_{k=1}^3 b_{ik} [\ln \beta(\theta_i)]^k, \quad (1)$$

где N_θ – число углов приема рассеянного излучения.

Численные значения коэффициентов a и b_{ik} получаются на основе представительной выборки оптических и микрофизических характеристик цементной пыли. Для этой цели авторами разработана статистическая микрофизическая модель пыли, параметры которой рассматриваются ниже.

1.1 Функция распределения частиц по размерам

Спектр размеров промышленных аэрозолей дисперсионного происхождения хорошо описывается логарифмически нормальным распределением:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(r/r_0)}{\sigma}\right)^2\right], \quad (2)$$

где r – радиус сферической частицы с эквивалентным объемом; r_0 – модальный радиус; σ – стандартное отклонение для $\ln r$. На основании литературных данных исследования цементной пыли, выбрасываемой в атмосферу, а также на выходе рукавных фильтров газоочистных установок (в аспирационном воздухе) выбраны следующие диапазоны вариаций параметров распределения (2): $r_0 = 0.1 \dots 5.0$ мкм, $\sigma = 0.2 \dots 1.0$.

1.2 Комплексный показатель преломления вещества частиц

Химический состав цемента достаточно сложен и может значительно отличаться в зависимости от применяемого сырья и способа производства клинкера. Основные составляющие цемента – это известь CaO, кремнезем SiO₂, оксид алюминия Al₂O₃ и гематит Fe₂O₃. Химический состав портландцемента представлен в основном известью и кремнеземом. Глиноземистый цемент, кроме оксидов кальция и алюминия, содержит в небольших количествах также оксиды железа, магния MgO, титана TiO₂ и др.

Спектр КПП $m(\lambda)$ цементной пыли рассчитывался как линейная комбинация спектров КПП компонентов цемента с учетом их объемных концентраций v_i :

$$m(\lambda) = v_{\text{CaO}} m_{\text{CaO}}(\lambda) + v_{\text{SiO}_2} m_{\text{SiO}_2}(\lambda) + v_{\text{Al}_2\text{O}_3} m_{\text{Al}_2\text{O}_3}(\lambda) + \\ + v_{\text{Fe}_2\text{O}_3} m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}(\lambda) + v_{\text{MgO}} m_{\text{MgO}}(\lambda) + v_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \quad (3)$$

Диапазоны вариаций объемного содержания основных составляющих портландцемента и глиноземистого цемента выбирались на основании анализа литературных данных по химическому составу цемента различных марок.

1.3 Концентрация частиц

МКП в аспирационном воздухе и отходящих газах на цементных заводах в зависимости от технологической операции и производительности оборудования изменяется на несколько порядков – $M = 0.01 \dots 60 \text{ г/м}^3$. Эффективная плотность вещества пылевых частиц, определяемая аналогично их КПП по формуле (3), в соответствии с объемными содержаниями компонент цемента и воды в составе частиц.

Расчет $\beta(\theta, \lambda)$ производился для длин волн λ и углов θ из диапазонов $\lambda = 0.4 \div 0.9 \text{ мкм}$ и $\theta = 1 \div 10^\circ$. Выбор спектрального диапазона обусловлен наличием соответствующих ему эффективных полупроводниковых лазерных источников, углового диапазона – минимальным влиянием на малоугловую индикатрису рассеяния формы и показателя преломления частиц, а также ее информативностью относительно крупных частиц, вносящих определяющий вклад в массовую концентрацию. Объем выборки характеристик цементной пыли составляет 10^3 реализаций, причем одна половина выборки соответствует портландцементу, другая – глиноземистому цементу.

2. Решение обратной задачи

Для оценки информативности и выбора оптимальных (в плане точности восстановления M и r_{eff}) длин волн и углов регистрации рассеянного излучения важно проанализировать степень взаимозависимости измеряемых спектральных и угловых значений $\beta(\theta, \lambda)$. Это означает, что необходимо определить, количество независимых компонент содержащихся в вариациях спектра, обусловленных изменениями микрофизических характеристик пыли. Такой анализ был проведен на основе рассмотрения собственных чисел ковариационной матрицы, соответствующей измерениям $\beta(\theta, \lambda)$ для $\lambda = 0.4, 0.67$ и 0.87 мкм и $\theta = 1 \dots 15^\circ$, образующих случайный вектор из 45 компонент. Оказалось, что на первые три собственные вектора ковариационной матрицы приходится 99.7 % суммарной дисперсии $\beta(\theta, \lambda)$, что говорит о возможности восстановления искомых микрофизических параметров с использованием трех измерений $\beta(\theta, \lambda)$.

Для выбора наиболее информативных относительно параметра M длин волн λ и углов θ проведен расчет коэффициентов корреляции между $\beta(\theta, \lambda)$ и M . Как видно из рис. 1 а, наиболее тесной корреляции соответствуют малые углы, причем с увеличением λ этот угол также увеличивается, что качественно находится в полном соответствии с зависимостью индикатрисы рассеяния от безразмерного параметра $x = 2\pi r/\lambda$. Наиболее тесная корреляционная связь между $\beta(\theta, \lambda)$ и M , соответствующая $\theta = 3^\circ$ и $\lambda = 0.87 \text{ мкм}$, приведена на рис. 1 б. Использование для аппроксимации данной связи полиномиальной регрессии (1), позволяет восстанавливать M со среднеквадратичной погрешностью 17.6 %.

Как было отмечено выше, для восстановления параметров M и r_{eff} достаточно ограничиться тремя измерениями $\beta(\theta, \lambda)$ (спектральными и(или) угловыми). Оптимальный набор длин волн λ_{opt} и углов θ_{opt} для параметров M и r_{eff} выбран, исходя из среднеквадратичной погрешности их восстановления при наличии 5 %-й погрешности оптических измерений: $\beta(3^\circ, 0.87 \text{ мкм})$, $\beta(5^\circ, 0.87 \text{ мкм})$ и $\beta(15^\circ, 0.87 \text{ мкм})$ – для M ; $\beta(15^\circ, 0.4 \text{ мкм})$, $\beta(3^\circ, 0.87 \text{ мкм})$ и $\beta(5^\circ, 0.87 \text{ мкм})$ – для r_{eff} . На рис. 2 приведены результаты численного эксперимента по восстановлению параметров M и r_{eff} при 5 %-й погрешности оптических измерений.

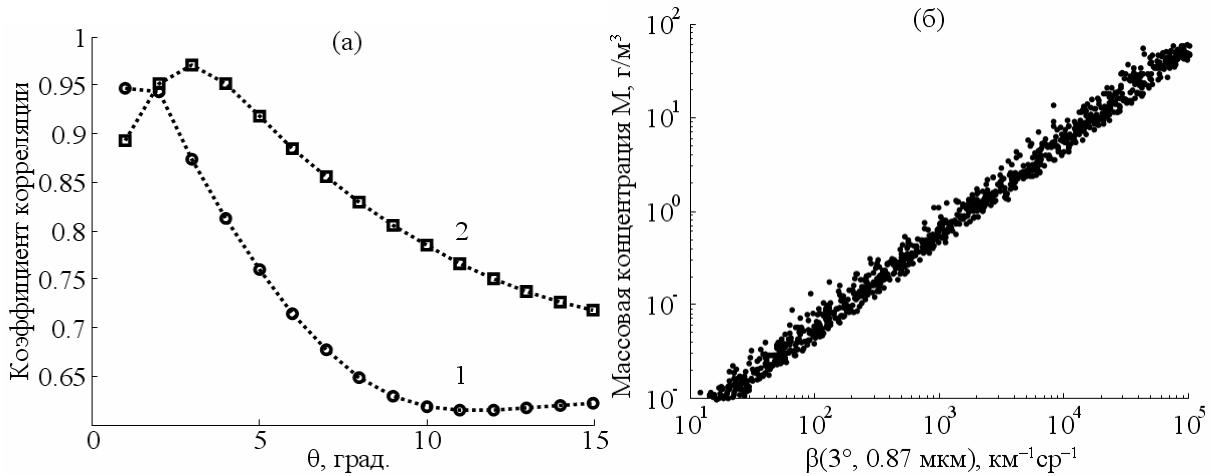


Рис. 1. Оптико-микроструктурные корреляции цементной пыли:
 (а) угловые зависимости коэффициента корреляции между $\beta(\theta, 0.4 \text{ мкм})$ (1),
 $\beta(\theta, 0.87 \text{ мкм})$ (2) и M ; (б) корреляционная связь между $\beta(3^\circ, 0.87 \text{ мкм})$ и M .

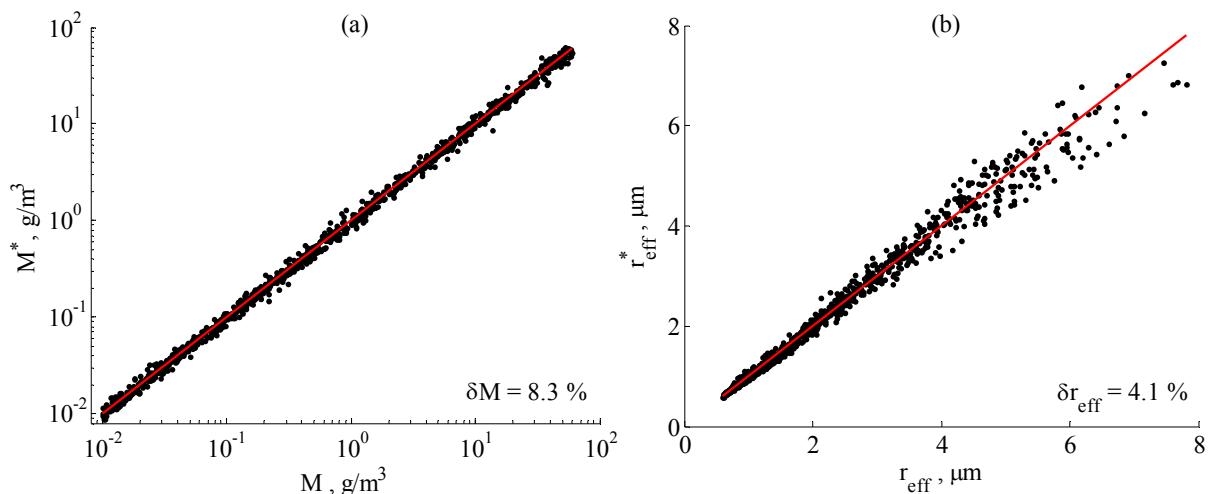


Рис. 2. Результаты восстановления M (а) и r_{eff} (б) для модельной выборки
 характеристик цементной пыли.

Заключение

Таким образом, нефелометр, реализующий измерение направленного рассеяния под углами 3° и 5° на длине волны 0.87 мкм и под углом 15° на длинах волн 0.4 и 0.87 мкм , совместно с полученными авторами для интерпретации данных измерений полиномиальными регрессиями (1), позволит с высокой точностью осуществлять оперативный мониторинг содержания пыли в аспирационном воздухе и отходящих газах на цементных заводах.

Литература

1. В. Е. Зуев, И. Э. Нац. Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 286 с.