

# 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  $30 \text{ мг/м}^3$ ), а также невозможность контроля высоких концентраций (более  $10 \text{ г/м}^3$ ) вследствие сильного ослабления светового излучения. Кроме того, данным методам свойственна резкая потеря чувствительности при измерении концентрации частиц с размером более  $8.0 \dots 10.0 \text{ мкм}$ , 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  $\theta$  к массовой концентрации  $M$  аэрозоля осуществляется с использованием расчетного или эмпирического коэффициента  $K_\theta$ , связывающие данные параметры. Значение коэффициента  $K_\theta$  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 несколькими углами  $\theta$ . 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  $r_{\text{eff}}$  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  $\theta_i$  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  $N_\theta$  – 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;  $\sigma$  – 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  $\text{CaO}$ , кремнезем  $\text{SiO}_2$ , оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Химический состав портландцемента представлен в основном известью и кремнеземом. Глиноземистый цемент, кроме оксидов кальция и алюминия, содержит в небольших количествах также оксиды железа, магния  $\text{MgO}$ , титана  $\text{TiO}_2$  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 глиназемистого 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  $\lambda$  и углов  $\theta$  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  $r_{\text{eff}}$ ) 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  $0.87 \text{ мкм}$  и  $\theta = 1 \dots 15^\circ$ , образующих случайный вектор из 45 компонент. Оказалось, что на первые три собственных 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  $\lambda$  и углов  $\theta$  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  $\lambda$  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  $r_{\text{eff}}$  достаточно ограничиться тремя измерениями  $\beta(\theta, \lambda)$  (спектральными и(или) угловыми). Оптимальный набор длин волн  $\lambda_{\text{opt}}$  и углов  $\theta_{\text{opt}}$  для параметров  $M$  и  $r_{\text{eff}}$  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  $r_{\text{eff}}$ . На рис. 2 приведены результаты численного эксперимента по восстановлению параметров  $M$  и  $r_{\text{eff}}$  при 5 %-й погрешности оптических измерений.

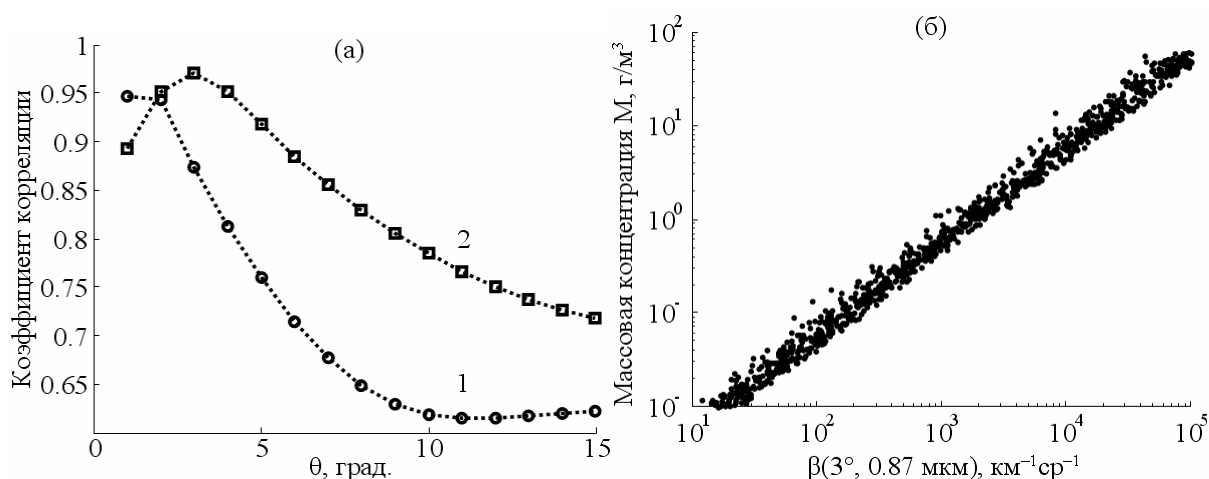


Рис. 1. Оптико-микроструктурные корреляции цементной пыли:  
(а) угловые зависимости коэффициента корреляции между  $\beta(\theta, 0.4 \text{ мкм})$  (1),  $\beta(\theta, 0.87 \text{ мкм})$  (2) и  $M$ ; (б) корреляционная связь между  $\beta(3^\circ, 0.87 \text{ мкм})$  и  $M$ .

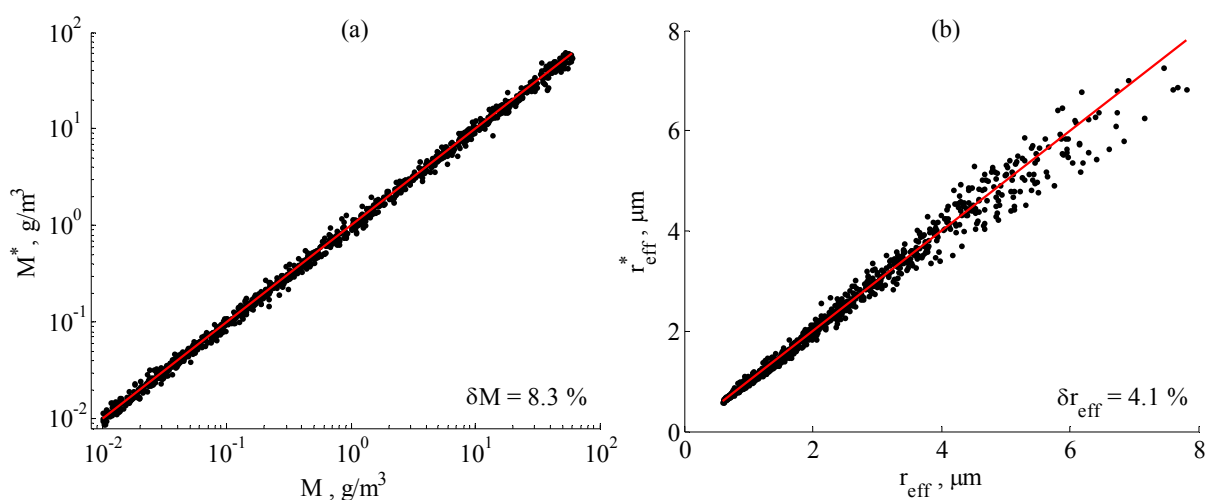


Рис. 2. Результаты восстановления  $M$  (а) и  $r_{\text{eff}}$  (б) для модельной выборки характеристик цементной пыли.

### Закключение

Таким образом, нефелометр, реализующий измерение направленного рассеяния под углами  $3^\circ$  и  $5^\circ$  на длине волны  $0.87 \text{ мкм}$  и под углом  $15^\circ$  на длинах волн  $0.4$  и  $0.87 \text{ мкм}$ , 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. Наац. Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 286 с.