

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУРБИДИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия
mezlered@mail.ru

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR DETERMINING DISPERSE PARAMETERS OF AEROSOL MEDIA BY TURBIDIMETRIC METHOD

E.A. Metsler, S.S. Titov, A.A. Pavlenko

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia

Аннотация. В работе представлена методика восстановления функции распределения нано и субмикронных частиц по размерам аэрозольных сред. На примере исследования водного аэрозоля приведены результаты определения динамики среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, функции распределения частиц по размерам.

Ключевые слова: турбидиметрический, аэрозоль, теория Ми, функция распределения частиц по размерам.

Abstract. The paper reports a procedure for the restoration of the nano-scale and submicron-scale aerosol particle size distribution function. The results from measuring the dynamics of the Sauter mean particle diameter and particle size distribution function are given by the example of the water aerosol study.

Keywords: turbidimetric, aerosol, Mie theory, size distribution functions.

Введение

Работа направлена на развитие и модификацию турбидиметрического метода (метода спектральной прозрачности [Титов, Павленко, Кудряшова и др., 2012]) путем перехода от использования непрерывного спектра к набору дискретных длин волн зондирующего излучения. При замене источника излучения с непрерывным спектром на набор монохроматических источников излучения (лазеров) необходима замена приемника излучения (спектрометра) на набор фотодиодов с системой селекции длин волн излучения. К преимуществам разработанного метода относятся:

- возможность диагностики дисперсных сред с увеличенной (до нескольких метров) длиной оптического пути за счет использования коллимированного излучения с большой пространственной плотностью энергии;

- возможность исследования оптически плотных сред с обеспечением выполнимости закона Бугера-Ламберта-Бера.

Основная часть

Восстановление дисперсных параметров аэрозольных сред осуществляется по измеренным значениям спектральной оптической плотности $\tau(\lambda)$ (λ — длина волны) исследуемой среды на разных длинах волн. Для решения обратной задачи оптики аэрозолей используется вариационный подход к построению регуляризирующего алгоритма А.Н. Тихонова. При этом искомая функция распределения частиц по размерам $f(D)$ априорно задается в виде логарифмически нормального распределения частиц по размерам:

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

где D — диаметр частицы; $\ln \sigma$ — логарифм среднеквадратического отклонения диаметров (σ — параметр, определяющий ширину функции распределения частиц по размерам); $\ln \bar{D}$ — логарифм математического ожидания диаметров частиц.

На рассматриваемое множество функций распределения частиц по размерам $\{f\}$ ($f=f(D)$) накладывается ограничение, используя априорную информацию о среднем объемно-поверхностном диаметре (D_{32}). Задача сводится к поиску минимума функционала Тихонова $\min_{f \in G} M^\xi[f]$ на множестве G , где G — замкнутое множество, ξ — параметр регуляризации. В соответствии с алгоритмом решения некорректных задач по Адамару, осуществляется минимизация функционала Тихонова [Ягола, Янфей, Степанова и др., 2014]:

$$M^\xi[f] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{\pi}{4} C_n l \int_0^\infty Q(\rho, m(\lambda)) f(D) D^2 dD - \tau_\delta(\lambda) \right)^2 \times d\lambda + \xi \int_0^\infty \left[f^2(D) + (f'(D))^2 \right] dD,$$

где C_n — счетная концентрация частиц; l — длина оптического пути; $Q(\rho, m(\lambda))$ — фактор эффективности ослабления; $m(\lambda) = (n - i\kappa)$ — комплексный показатель преломления материала частиц (n — показатель преломления; κ — показатель поглощения);

$\rho = \pi D/\lambda$ — безразмерный параметр дифракции (параметр Ми); $\tau_0(\lambda)$ — экспериментально определенная спектральная оптическая плотность исследуемой дисперсной среды с погрешностью δ ; λ_{\min} , λ_{\max} — минимальная и максимальная длина волны зондирующего излучения.

Восстановление функции распределения частиц по размерам осуществляется с привлечением дополнительной априорной информации о среднем объемно-поверхностном диаметре частиц (D_{32}) этой исследуемой дисперсной среды. Определение D_{32} осуществляется с использованием информации о спектральной оптической плотности $\tau(\lambda_i)$ из исходного массива данных (например, для водного аэрозоля определение D_{32} осуществляется с использованием двух длин волн $\lambda = 3.390$ мкм, $\lambda = 0.405$ мкм). Знание D_{32} исследуемой среды позволяет привлечь дополнительную априорную информацию, которая характеризует искомую функцию распределения частиц по размерам.

Основным уравнением метода определения D_{32} является выражение для отношения спектральной оптической плотности τ_{λ} слоя равномерно распределенных полидисперсных частиц для двух соответствующих длин волн λ_1 и λ_2 , которое является однозначной функцией D_{32} :

$$\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} = \frac{\bar{Q}(\lambda_2, D_{32})}{\bar{Q}(\lambda_1, D_{32})} = F(D_{32}). \quad (3)$$

Путем математического моделирования установлено, что функция $F(D_{32})$ зависит от ширины функции распределения частиц по размерам (σ), что может приводить к возникновению методической погрешности в определении D_{32} . На рис. 1 приведены зависимости $F(D_{32})$ для ЛНР с $\sigma = 1.2$ и $\sigma = 1.6$ для длин волн $\lambda = 3.390$ мкм и $\lambda = 0.405$ мкм (водный аэрозоль).

Таким образом, используя информацию об ослаблении оптического излучения аэрозольной среды, решается обратная задача оптики аэрозоля по восстановлению функции распределения частиц по размерам. Область решения обратной задачи ограничивается диапазоном ΔD_{32} . Далее осуществляется минимизация функционала А.Н. Тихонова. Выбирается $f(D)$, соответствующая положению минимума. Затем по известным параметрам $f(D)$ уточняется значение D_{32} .

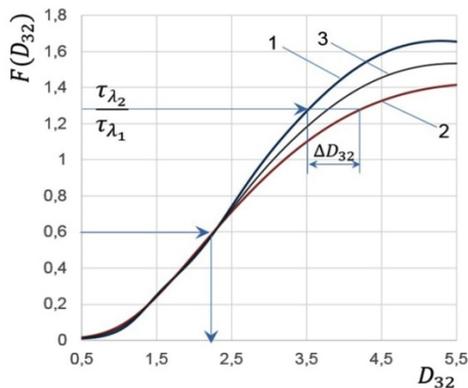


Рис. 1. Зависимости $F(D_{32})$ для ЛНР с различной шириной распределения. 1 — ЛНР для $\sigma = 1.2$; 2 — ЛНР для $\sigma = 1.6$; 3 — среднее

Структурная схема экспериментальной установки (рис. 2) состоит из семи источников лазерного излучения (1): гелий-неоновый лазер $\lambda = 3.39$ мкм и $\lambda = 0.632$ мкм, полупроводниковые лазеры $\lambda = 0.905$ мкм, $\lambda = 0.850$ мкм и $\lambda = 0.780$ мкм, диодные лазеры $\lambda = 0.532$ мкм и 0.405 мкм. Сведение лазерного излучения один световой пучок в диапазоне длин волн от 0.405 мкм до 0.905 мкм происходит с использованием блока дихроических зеркал. Затем объединение светового пучка с лазерным излучением $\lambda = 3.39$ мкм происходит с использованием плоскопараллельной пластины из германия (Ge). Лазерное излучение, пройдя диафрагму (3), попадает в измерительный объем (4), где ослабляется аэрозольной средой. Далее ослабленное лазерное излучение попадает в фотоприемный блок, где происходит разделение лазерного пучка на исходные составляющие с использованием дифракционной решетки (5).

Проведена серия экспериментов по определению динамики D_{32} аэрозольной среды. Определение дисперсных характеристик аэрозольной среды осуществлялось при заполнении измерительного объема облаком аэрозоля, создаваемым распылителем «Муссон-2». Типичные зависимости изменения параметров аэрозоля в измерительном объеме приведены на рис. 3. Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3. а, можно сделать вывод, что процесс образования облака аэрозоля является нестационарным. В течение всего времени распыливания (до 9 с.) водного аэрозоля в замкнутый объем наблюдается общая тенденция уменьшения размера D_{32} аэрозольной среды. Далее наблюдается тенденция плавного снижения размеров D_{32} .

Внешний вид зависимостей, приведенных на рис. 3. б, демонстрирует деформацию функции распределения частиц по размерам в сторону меньших диаметров в течение времени эксперимента, вследствие основных действующих процессов: коагуляция, испарение и гравитационное осаждение.

Заключение

Разработана экспериментальная лазерная установка для определения концентрации, среднего размера частиц и функции распределения частиц по размерам аэрозольной среды в динамическом режиме. Разработан математический аппарат решения обратной задачи оптики аэрозолей, позволяющий определять функцию распределения частиц по размерам с использованием априорной информации об экспериментально измеренном значении среднего объемно-поверхностного диаметра частиц исследуемой среды. Проведена серия экспериментальных исследований по определению динамики среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозольной среды, также для каждого момента времени определена функция распределения частиц по размерам и массовая концентрация частиц. Показана возможность исследования эволюции различных аэрозоль-

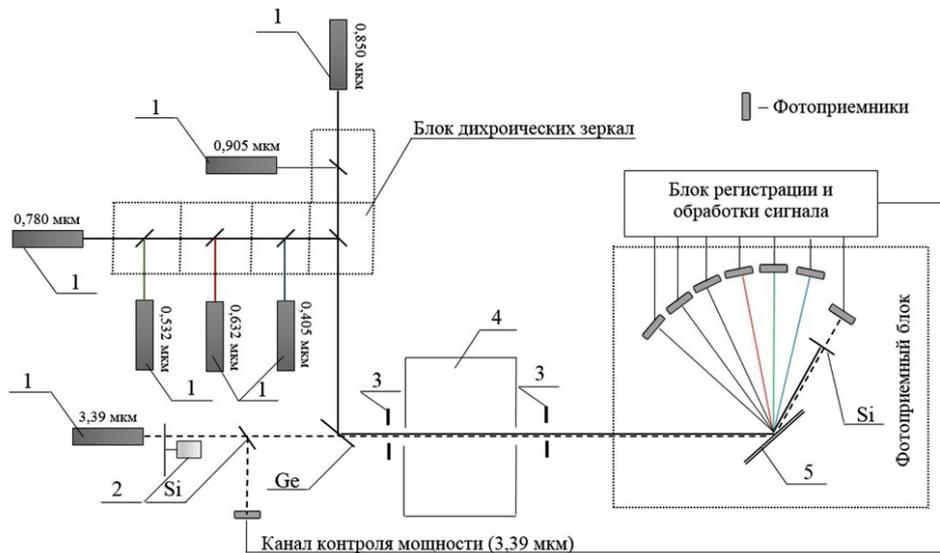


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки. 1 — лазерные источники излучения; 2 — механический модулятор света; 3 — диафрагмы; 4 — измерительный объем; 5 — дифракционная решетка; Si — плоскопараллельная пластина из кремния; Ge — плоскопараллельная пластина из германия

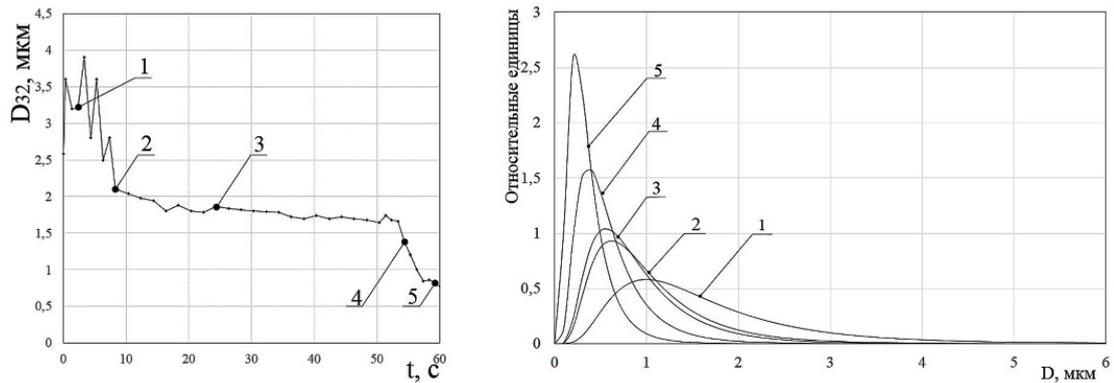


Рис. 3. Зависимость изменения параметров водного аэрозоля во времени в измерительном объеме: изменение D_{32} во времени (слева); функции распределения частиц по размерам

ных сред с использованием разработанной установки. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-79-20193).

Список литературы

Титов С.С., Павленко А.А., Кудряшова О.Б. др. Турбидиметрический метод определения параметров субмикронных аэрозольных сред // Автометрия. 2012. Т. 48, № 3. С. 68–74.

Ягола А. Г. Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 216 с.