

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

А.А. Павленко, С.С. Титов

Описана математическая модель нового метода определения дисперсности аэрозолей с широким диапазоном размеров частиц конденсированной фазы. Представлена лабораторная установка, реализующая новый метод. Приведены результаты тестовых экспериментов, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма и измерительного комплекса.

Ключевые слова: аэрозоль, дисперсность, спектральная прозрачность, теория Ми.

ВВЕДЕНИЕ

Определение параметров дисперсных сред необходимо осуществлять в различных производственных процессах и научных исследованиях. В промышленности результат такого определения может быть использован как показатель качества продукта. В технологических процессах вместе с крупно- и среднедисперсными средами используются и субмикронные. В такой системе размеры частиц варьируются от десятков нанометров до десятков микрометров, а выходной продукт может обладать существенно различными свойствами даже при малых изменениях размера конденсированной фазы используемого вещества. При измерении дисперсности аэрозольных сред оптическими методами необходимо осуществлять восстановление функции распределения по размерам с учётом вклада всех частиц, присутствующих в среде, что невозможно реализовать с использованием известных на сегодняшний день измерительных приборов. Подобная функциональность от измерительного устройства может потребоваться и при выборе режимов работы или создании распыливающих устройств, при контроле качества получения различных микро- и нанопорошков, при мониторинге экологической обстановки местности, исследовании запылённости рабочей зоны производственных помещений, зондировании атмосферы.

Существующие способы определения дисперсности конденсированной фазы можно условно разделить на две основные группы, основанные на: определении размера частиц в пробах, отобранных из исследуемой среды, и непосредственном бесконтактном определении размеров частиц, находящихся в среде. Методы отбора проб получили широкое распространение, однако существенным недостатком таких методов является внесение

возмущений в исследуемую среду и сложность обеспечения представительности отобранной пробы. К бесконтактным способам исследования аэрозолей относятся оптические методы. Они позволяют определять параметры дисперсной среды с высокой скоростью непосредственно в процессе её создания или эволюции без внесения каких-либо изменений в исследуемый объект. Эти методы основаны на явлениях рассеяния и поглощения зондирующего излучения, проходящего через аэрозоль. В дальнейшем рассматриваются только бесконтактные оптические методы, как более перспективные в целях их применения для исследования гетерогенных сред.

Проведённый анализ оптических методов диагностики гетерогенных сред показал, что наиболее оптимальным сочетанием сложности реализации, универсальности и большого потенциала в плане модернизации обладает метод спектральной прозрачности. Поэтому он был взят за основу при разработке нового метода определения дисперсности аэрозолей.

Целью работы являлось создание лабораторной установки для измерения и контроля параметров многофазных сред с широким диапазоном размеров частиц конденсированной фазы непосредственно в контролируемой зоне в условиях производства или в лабораторных условиях без влияния на исследуемую среду. Выбор такой цели был обусловлен тем, что на настоящий момент отсутствуют измерительные системы, сочетающие в себе подобные качества.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Метод спектральной прозрачности (МСП) определения дисперсности частиц относится к обратным задачам оптики аэрозолей [1]. Устойчивое решение задачи по опре-

делению параметров аэрозоля для метода спектральной прозрачности возможно, если прозрачность определена на всём интервале длин волн [2]. Однако, в известных на сегодняшний день приборах [3–11] реализовано измерение коэффициента спектральной прозрачности лишь на нескольких длинах волн, либо на некотором участке длин волн без селекции, что, несомненно, уменьшает точность и возможности метода.

МСП основан на измерении спектрального коэффициента пропускания оптического излучения двухфазным потоком в некотором диапазоне длин волн. Исходным для МСП является уравнение (1) [12]:

$$I(\lambda, t) = I_0(\lambda) \exp \left[-\frac{\pi C_n(t) I(t)}{4} \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) D^2 f(D) dD \right], \quad (1)$$

где $I(\lambda, t)$ – интенсивность прошедшего через аэрозоль излучения; $I_0(\lambda)$ – интенсивность зондирующего излучения; $C_n(t)$ – счётная концентрация конденсированной фазы аэрозоля; $I(t)$ – длина оптического пути; $Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right)$ – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения; D – диаметр частиц; λ – длина волны зондирующего излучения; $m(\lambda)$ – комплексный показатель преломления конденсированной фазы аэрозоля; $f(D)$ – функция распределения частиц по размерам.

Задача нахождения распределения диаметров частиц ($f(D)$) аэрозоля из выражения (1) по известным значениям интенсивностей излучения ($I(\lambda)$ и $I_0(\lambda)$) некорректна. Указанная некорректность является неизбежной для МСП. Предлагается решать эту задачу с помощью регуляризующих алгоритмов.

Регуляризующие алгоритмы строятся на основе привлечения дополнительной априорной (по отношению к эксперименту, на основании которого ставится обратная задача) информации об искомой функции. С помощью такой информации (сведения о гладкости искомого решения, его монотонности, выпуклости, принадлежности к конечно-параметрическому семейству и т.п.) отбирается из множества возможных решений такое, которое в определённом смысле близко к истинному. Регуляризующие алгоритмы позволяют получить устойчивое приближение к истинному решению некорректной задачи, т.е. при стремлении погрешностей измерений к нулю приближённое решение стремится к истинному.

Один из способов регуляризации – это метод параметризации. Для данной ситуации он будет заключаться в том, что считается априорно известным вид функции распределения:

$$f(D) = aD^\alpha \exp(-bD). \quad (2)$$

При этом параметры α и b задаются методом циклического покоординатного спуска, а нормирующий коэффициент a находится из выражения:

$$a = \left[\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^\alpha \exp(-bD) dD \right]^{-1}, \quad (3)$$

где D_{\min} и D_{\max} – соответственно минимальный и максимальный диаметры частиц, присутствующих в исследуемой среде. Гамма-распределение (2) для описания распределения частиц по размерам было выбрано ввиду его универсальности, применительно к аэрозолям, с одним механизмом получения дисперсной фазы [13]. Фактор эффективности ослабления зондирующего излучения ($Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right)$) рассчитывается в соответствии с точными формулами теории Ми по заданным параметрам функции распределения по формуле:

$$Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{2}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (4)$$

где a_n и b_n – коэффициенты Ми, они рассчитываются по формулам:

$$a_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\left[\frac{A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)}{m(\lambda)} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[\frac{A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)}{m(\lambda)} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}, \quad (5)$$

$$b_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\left[m(\lambda) A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[m(\lambda) A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}, \quad (6)$$

где A_n и ξ_n находятся по рекуррентным соотношениям:

$$\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \frac{2n-1}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-2}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right), \quad (7)$$

$$\xi_0\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) + i \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right), \quad (8)$$

$$\xi_{-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - i \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right), \quad (9)$$

$$A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) = -\frac{n}{\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)} + \left[\frac{n}{\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)} - A_{n-1}\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$A_0\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) = \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right). \quad (11)$$

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

Предел суммирования в выражении (4) наступает при выполнении условия:

$$\left[\sum_{n=1}^N (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \right] \cdot 10^{-8} > (2(N+1)+1) \operatorname{Re}(a_{N+1} + b_{N+1}). \quad (12)$$

При решении задачи в качестве экспериментальной информации используется коэффициент спектральной прозрачности, который рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\lambda}^{\text{эксп}}(t) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda, t)}. \quad (13)$$

После чего находится отношение экспериментально полученных коэффициентов спектральной прозрачности, найденных для некоторых длин волн λ_1 и λ_2 :

$$k_{\lambda_1 \lambda_2}^{\text{эксп}}(t) = \frac{\tau_{\lambda_1}^{\text{эксп}}(t)}{\tau_{\lambda_2}^{\text{эксп}}(t)}. \quad (14)$$

Далее рассчитывается отношение теоретически полученных коэффициентов спектральных прозрачностей для различных функций распределения (2) в соответствии с уравнением (1) для длин волн λ_1 и λ_2 по формуле:

$$k_{\lambda_1 \lambda_2}^{\text{теор}}(t) = \frac{\tau_{\lambda_1}^{\text{теор}}(t)}{\tau_{\lambda_2}^{\text{теор}}(t)} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_1}, m(\lambda)\right) D^2 f(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_2}, m(\lambda)\right) D^2 f(D) dD}. \quad (15)$$

После чего рассчитывается суммарное отклонение экспериментальных данных $k_{\lambda_1 \lambda_2}^{\text{эксп}}(t)$ от теоретических $k_{\lambda_1 \lambda_2}^{\text{теор}}(t)$ для всех используемых длин волн. При этом проведенные математические исследования показали, что от способа выбора пар длин волн λ_1 и λ_2 никаким образом не зависит точность и устойчивость работы предлагаемого алгоритма, следовательно, он может быть любым. Сравнение отношений коэффициентов спектральной прозрачности, а не их абсолютных величин, было использовано для того, чтобы избавиться от постоянного множителя перед знаком интеграла в выражении (1) при расчете теоретических значений коэффициентов пропускания исследуемой средой (15). На заключительном шаге осуществляется выбор того вида функции распределения частиц по размерам, для которого значение отклонения данных, полученных в эксперименте от теоретических является минимальным.

Таким образом, численными методами решается прямая задача определения спектрального коэффициента ослабления зондирующего излучения для различных параметров функции распределения.

Затем с помощью скоростной видеосъемки [14, 15] и использования программного

комплекса определяется оптическая длина пути зондирующего излучения в исследуемом аэрозоле (l), и рассчитывается массовая концентрация дисперсной фазы аэрозоля по формуле:

$$C_m(t) = \frac{\tau_{\lambda}^{\text{эксп}}(t) \rho D_{32}}{1.5l(t) \bar{Q}\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right)}. \quad (16)$$

где ρ – плотность вещества конденсированной фазы исследуемой среды; D_{32} – средний объёмно-поверхностный диаметр частиц; \bar{Q} – усреднённый фактор эффективности ослабления, они рассчитываются по формулам:

$$\bar{Q}\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) D^2 f(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 f(D) dD}; \quad (17)$$

$$D_{32} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 f(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 f(D) dD}. \quad (18)$$

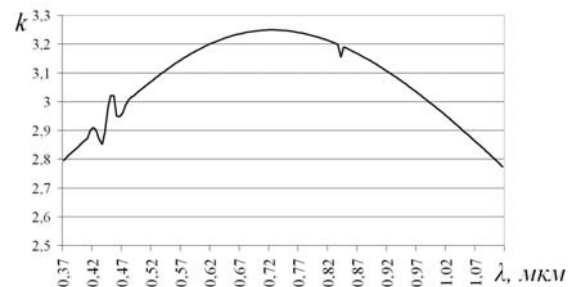


Рисунок 1. Зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны.

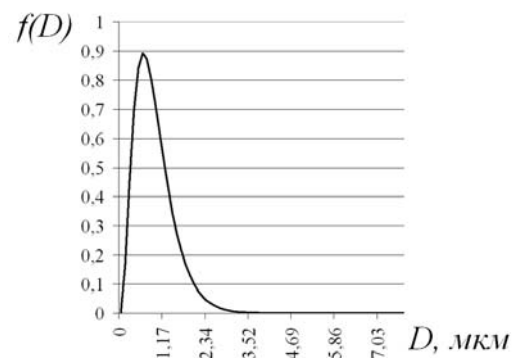


Рисунок 2. Гамма-распределение частиц по размерам.

Для проверки адекватности разработанного алгоритма восстановления функции распределения частиц по размерам был проведён математический эксперимент. В исходном состоянии предполагалась известной зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны (рисунок 1) для

некоторого гамма-распределения (2) (рисунок 2), после чего вид распределения считался неизвестным и определялся с помощью разработанного алгоритма.

Результаты такого определения полностью совпали с исходными данными, что подтверждает правильность реализации разработанного алгоритма. Для проверки устойчивости метода на исходную зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны (рисунок 1) был наложен нормально распределённый шум величиной 10 % (рисунок 3).

Восстановление функции распределения частиц по размерам с использованием начальных данных, представленных на рисунке 3, также привело к гамма-распределению, показанному на рисунке 2, что говорит об устойчивости метода к изменению входных данных, обусловленному присутствием в них неинформативных составляющих.

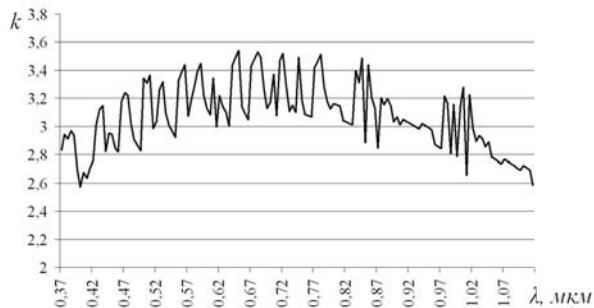


Рисунок 3. Зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны с наложенным шумом.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Величины $I_0(\lambda)$, $I(\lambda, t)$ и $I(t)$ в выражениях (13) и (16), соответственно, получают путём прямых измерений, для чего был разработан измерительный комплекс, блок-схема которого приведена на рисунке 4. В разработанном комплексе в качестве источника и приёмника оптического излучения применяется различная аппаратура в зависимости от диапазона размеров частиц исследуемого аэрозоля. Для среднedisперсных аэрозолей (размеры частиц от 1 до 10 мкм) приёмником оптического излучения является инфракрасный Фурье-спектрометр «Инфралуом ФТ-801», а источником излучения – инфракрасный прожектор, диапазон исследуемых длин волн для данной реализации 1,8 – 18 мкм. Для субмикронных аэрозолей приёмник излучения выполнен в виде конденсорной линзы, фокусирующей параллельный пучок

излучения на торце световода. Собранный конденсором излучение по световоду передаётся в спектроаналитический анализатор, реализованный на базе спектрометра S125 производства фирмы «SolarIII», где с помощью дифракционной решётки разлагается в спектр длин волн с шагом в 0,376 нм. Измерение интенсивности излучения осуществляется на участке длин волн от 360 до 1100 нм. Источником излучения служит галогенная газонаполненная лампа накаливания, запитанная от стабилизированного источника питания.

Для измерения длины пути зондирующего излучения применяются камеры скоростной видеосъёмки ВидеоСпринт /C/G4 и ВидеоСпринт /G4/NG, а также гелий-неоновые лазеры, используемые для подсветки облака аэрозоля с целью более точного определения его границ.

Вся информация с используемого оборудования передаётся на компьютер, где осуществляется её дальнейшая обработка с использованием разработанного программного обеспечения.

Процесс измерения происходит в следующей последовательности: сначала регистрируется опорный спектр без присутствия аэрозоля на пути зондирующего излучения ($I_0(\lambda)$), далее запускается процесс создания аэрозоля и регистрации спектральных и видеоданных. В случае использования разработанной установки в процессах, где генерация исследуемой среды происходит непрерывно, для регистрации опорного спектра установка дополняется обводным оптическим каналом. Последующая обработка полученной информации происходит программно с использованием персонального компьютера.

Существенным достоинством предлагаемой реализации метода является простота регулирования измеряемого диапазона размеров исследуемых частиц, которое осуществляется изменением диапазона длин волн зондирующего излучения.

При использовании оптического излучения с длинами волн всего видимого и ближнего инфракрасного диапазонов удаётся получать информацию о частицах размером от десятков нанометров до десятков микрометров. Для расширения возможностей метода, с целью учёта вклада в функции распределения частиц размером единицы нанометров и сотни микрометров, необходимо будет дополнить аппаратный комплекс измерительным каналом с ультрафиолетовой и дальней инфракрасной областями оптического спектра, соответственно. При этом математиче-

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

ская модель метода остаётся прежней, не требуя никаких модификаций. Также, большим преимуществом разработанного метода является возможность проводить исследования как в потоке, так и в кювете, при этом в качестве среды, в которой находятся исследуемые частицы, может выступать практически любое оптически прозрачное вещество.

Это стало возможным благодаря тому, что коэффициент спектральной прозрачности находится как относительная величина, поэтому единственным дополнительным требованием для различных сред будет выступать необходимость снятия опорного спектра для этой среды без исследуемой дисперсной фазы.

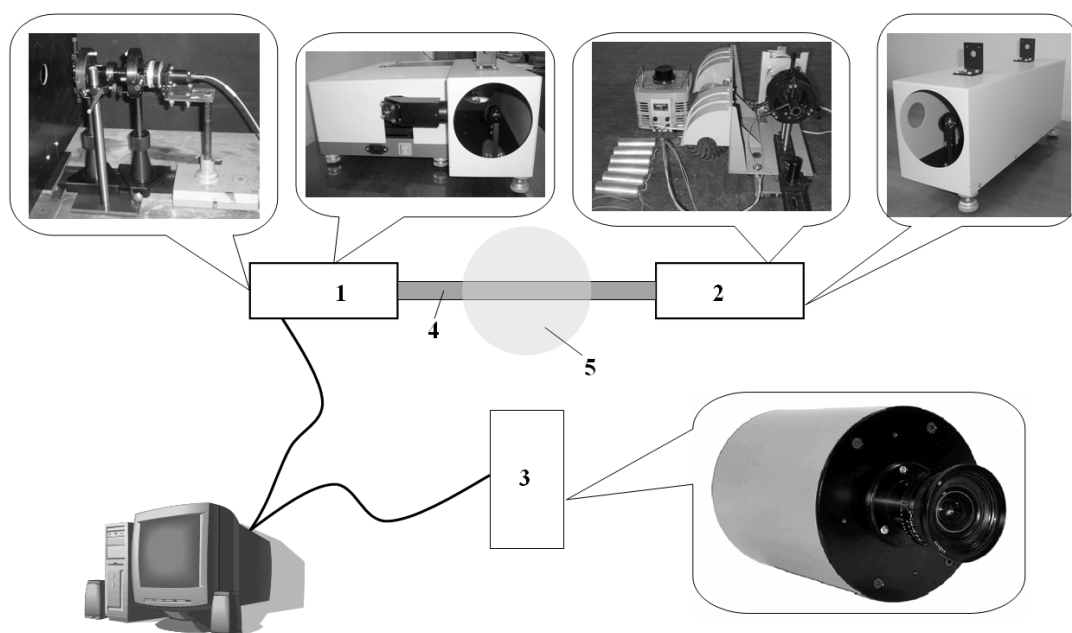


Рисунок 4. Блок-схема лабораторной установки: 1 – приёмник зондирующего излучения; 2 – источник зондирующего излучения; 3 – камера скоростной видеосъёмки; 4 – коллимированный поток оптического излучения; 5 – облако исследуемого аэрозоля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С применением разработанного метода и лабораторной установки проведён ряд тестовых экспериментов по исследованию параметров различных аэрозолей.

В качестве модельного эксперимента для проверки работоспособности аппаратной части, отвечающей за измерение параметров субмикронных аэрозолей, проводилось измерение ослабления оптического излучения взвесью химически чистого субмикронного порошка Al_2O_3 в дистиллированной воде. Выбор оксида алюминия был обусловлен известностью эмпирических зависимостей показателей преломления (n) и поглощения (φ) от длины волны зондирующего излучения [16]:

$$n = \sqrt{1 + \lambda^2 \left(\frac{1.024}{\lambda^2 - 0.003776} + \frac{1.058}{\lambda^2 - 0.01225} + \frac{5.281}{\lambda^2 - 321.4} \right)} \cdot 0.99636 \quad (19)$$

$$\varphi = 0.002(0.06\lambda^2 + 0.7\lambda + 1) \cdot 0.007391. \quad (20)$$

Выражения (19) и (20) записаны для температуры $20^\circ C$, при этом комплексный показатель преломления запишется как:

$$m(\lambda) = n(\lambda) - i\varphi(\lambda). \quad (21)$$

Как было установлено в предварительных экспериментах пренебрежение зависимостью комплексного показателя преломления от длины волны и использование вместо него постоянных величин для всех длин волн приводит к ошибкам.

Суспензия оксида алюминия подвергалась воздействию ультразвука, с целью избавления от образовавшихся в ней агломератов, после чего помещалась в стеклянную кювету, в которой и проводилось её исследование. Перед измерением кювета выставлялась в покое в течение трёх суток, с целью осаждения оставшихся неразрушенных агломератов. Концентрация оксида алюминия в используемой суспензии составляла $0,4 \text{ кг/м}^3$. Кюветная часть разработанного измерительного комплекса приведена на рисунке 5 (все размеры приведены в миллиметрах). Длина пути оптического излучения в исследуемой

среде (расстояние между внутренними поверхностями стёкол кюветы) составляла 5,075 мм.

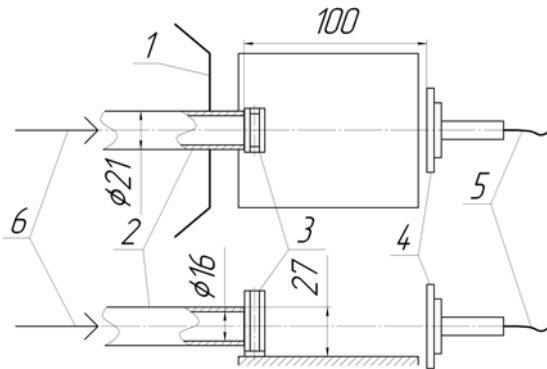


Рисунок 5. Кюветная часть измерительного комплекса: 1 – светозащитный экран; 2 – выходная труба коллиматора; 3 – кювета; 4 – конденсор; 5 – световод; 6 – направление прохождения оптического излучения.

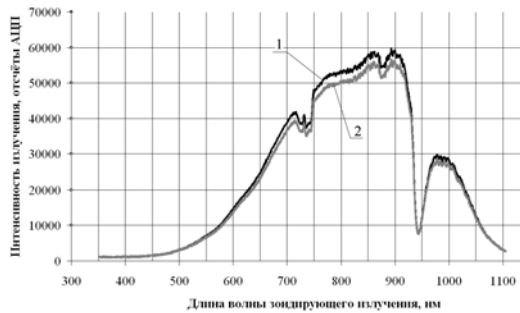


Рисунок 6. Спектры пропускания оптического излучения: 1 – спектр пропускания кюветы с чистой дистиллированной водой; 2 – спектр пропускания кюветы с суспензией Al_2O_3 .

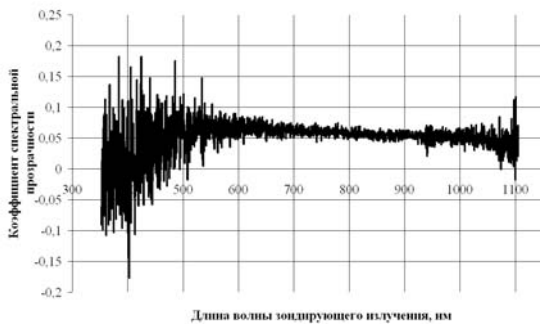


Рисунок 7. Экспериментально полученный коэффициент спектральной прозрачности.

Перед измерением пропускания излучения кюветой с суспензией оксида алюминия измерялся базовый спектр пропускания излучения кюветой с чистой дистиллированной водой. Базовый спектр и спектр пропускания исследуемой суспензии приведены на рисунке 6.



Рисунок 8. Экспериментальные и теоретические коэффициенты спектральной прозрачности: 1 – экспериментально полученные данные; 2 – теоретически полученные данные.

По приведённым спектральным данным проводился расчёт коэффициента спектральной прозрачности по формуле (13). Полученная при этом зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны приведена на рисунке 7.

К зависимости, приведённой на рисунке 7, была применена фильтрация методом скользящего среднего для исключения высокочастотных шумов, в результате чего была получена зависимость, приведённая под номером 1 на рисунке 8.

Под номером 2 на рисунке 8 приведена теоретически рассчитанная зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны зондирующего излучения, отличие для которой от экспериментальных данных оказалось минимальным. Отличие экспериментальных данных от теоретических на участке длин волн до 480 нм обусловлено малым уровнем полезного сигнала в этом диапазоне, что хорошо иллюстрирует рисунок 6. Такое отличие является следствием особенностей аппаратной реализации измерения ослабления оптического излучения в этом диапазоне спектра и не характеризует применяемый алгоритм.

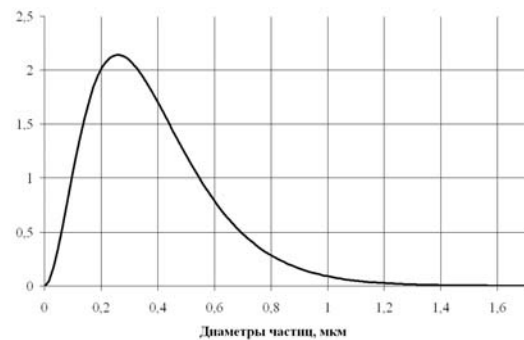


Рисунок 9. Восстановленная функция распределения частиц по размерам.

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

Найденной теоретической зависимости коэффициента спектральной прозрачности от длины волны (кривая 2 на рисунке 8) соответствует функция распределения частиц по размерам исследуемой среды, приведённая на рисунке 9.

Для проверки применимости разработанного метода, для исследования среднедисперсных аэрозолей проводились измерения счётной функции распределения частиц по размерам среды, создаваемой генератором холодного аэрозоля «NEBULO» производства фирмы «Igeba», а также изменение размеров частиц в зависимости от расхода распыляемого вещества, в качестве которого применялась дистиллированная вода. Зависимость комплексного показателя преломления от длины волны для дистиллированной воды была взята в [17].

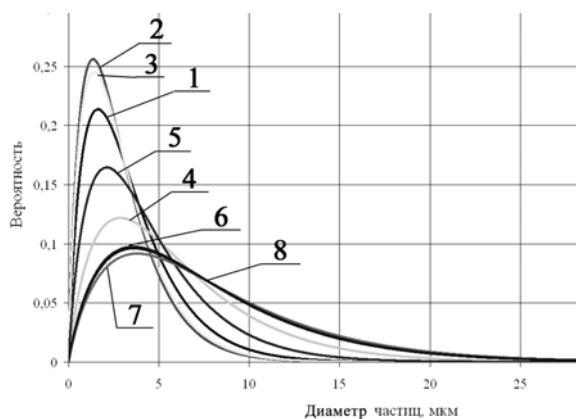


Рисунок 10. Изменение счётной функции распределения частиц по размерам в зависимости от расхода рабочей жидкости для генератора холодного аэрозоля «NEBULO»: 1 – 5 мл/мин; 2 – 40 мл/мин; 3 – 75 мл/мин; 4 – 110 мл/мин; 5 – 145 мл/мин; 6 – 180 мл/мин; 7 – 215 мл/мин; 8 – 250 мл/мин.

Серия экспериментов с генератором холодного аэрозоля начиналась с измерения дисперсности на минимальном расходе рабочей жидкости (5 мл/мин), в результате которого была получена счётная функция распределения частиц по размерам, вид которой приведён на рисунке 10 (кривая 1). Далее для генератора холодного аэрозоля проводилось увеличение расхода рабочей жидкости (вплоть до 250 мл/мин), и осуществлялось измерение дисперсности с помощью разработанной установки. Как и указано разработчиком генератора, при этом наблюдался общий рост размера капель, однако с небольшими локальными отклонениями. Изменение счётной функции распределения частиц по размерам в зависимости от расхода рабочей

жидкости для генератора холодного аэрозоля «NEBULO» представлено на рисунке 10.

ВЫВОДЫ

Проведён анализ методов измерения дисперсности гетерогенных потоков и установлено, что для разработки нового оптического метода исследования аэрозольных сред с широким диапазоном размеров частиц конденсированной фазы за основу нужно взять метод спектральной прозрачности, а дополнительное использование скоростной видеосъёмки даёт возможность определять концентрацию аэрозоля. Кроме того, МСП наиболее адаптивный метод, в плане его использования в технологических аппаратах, так как он нечувствителен к высокому фоновому излучению и не требует существенной модернизации производственного оборудования.

Предложен новый алгоритм решения обратной задачи оптики аэрозолей с использованием технологии прямого поиска, позволяющий проводить измерения дисперсных параметров частиц с различными оптическими свойствами. Данная математическая реализация совместно с МСП ранее не применялась.

В результате проведённого математического эксперимента было установлено, что разработанная модель восстановления функции распределения частиц по размерам является верной и работоспособной в условиях появления паразитной составляющей во входных данных до 10 %.

Разработан вариант конфигурации оборудования в программно-аппаратном комплексе, реализующем новый алгоритм восстановления функции распределения частиц аэрозольного облака по размерам с ещё неиспользовавшимся способом получения измерительной информации. Данная реализация является впервые разработанной измерительной системой.

Установлена работоспособность разработанного метода определения дисперсности гетерогенных сред и программно-аппаратного комплекса, реализующего этот метод как в области субмикронных, так и среднедисперсных аэрозолей при восстановлении функции распределения частиц по размерам субмикронного порошка Al_2O_3 и среды, создаваемой генератором холодного аэрозоля «NEBULO», соответственно. Подтверждена зависимость дисперсности аэрозоля от расхода рабочей жидкости для генератора «NEBULO», получение которой также доказывает возможность

исследования динамики изменения размеров частиц аэрозольного облака во времени.

Разработанный метод и устройство позволяют определять дисперсность природных аэрозолей, аэрозолей, применяемых в технологических процессах, и конденсированной фазы продуктов горения высокоэнергетических материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-02-90708.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов, В.А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Издательство Томского университета. – 1987. – 140 с.
2. Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света / под ред. Б.И. Степанова, А.П. Иванова. – Минск: Наука и техника, 1971. – 487 с.
3. Пат. SU 1435955 A1 G 01J 1/44. Фотометр дисперсных сред.
4. Пат. SU 1420474 A1 G 01N 15/02. Способ определения параметров частиц аэрозоля в газовом потоке.
5. Пат. SU 717628 G 01N 15/02. Способ измерения среднего радиуса металлических капель в двухфазных потоках.
6. Пат. SU 1467447 A1 G 01N 15/02. Способ оптического анализа вирусных суспензий.
7. Пат. SU 811108 G 01N 15/02. Прибор для определения дисперсности и концентрации аэрозоля.
8. Пат. RU 2335760 C2 G 01N 15/02. Оптический способ определения размеров частиц дисперсной системы.
9. Пат. RU 2235990 C1 G 01N 15/02. Способ определения дисперсности аэрозольных частиц.
10. Пат. RU 2098794 C1 G 01N 15/02. Оптический способ определения размера частиц в суспензии.
11. Пат. RU 2061223 C1 G 01N 15/14. Способ измерения размеров микрочастиц.
12. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами. – Москва, 1961. – 460 с.
13. Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Лернер М.И. // Горный журнал – 2006. – № 4. – С. 58 – 64.
14. Титов, С.С. // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 25 сент. – 26 сент. 2008. – Бийск, 2008. – С. 173–179.
15. Титов, С.С. // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 16 апр. – 17 апр. 2009. – Бийск, 2009. – С. 103 – 106.
16. Домбровский, Л.А. // ТВТ. – 1982. – №3. – С. 549 – 557.
17. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / под ред. М.А. Колосова – М.: Наука, 1977. – 176 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.А. Антонникова, Н.В. Коровина, О.Б. Кудряшова, И.Р. Ахмадеев,
К.В. Шалунова, В.Н. Хмелев

В работе представлены результаты исследования эволюции дисперсных характеристик и концентрации аэрозоля при его осаждении с помощью высокочастотного ультразвукового воздействия. Приведены графики зависимостей среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля (вода, мука) от времени. Показано, что воздействие на среднедисперсный аэрозоль ультразвуковых колебаний существенно ускоряет его осаждение за счет коагуляции частиц.

Ключевые слова: аэрозоль, ультразвуковое воздействие, средний объемно-поверхностный диаметр, метод малоуглового рассеяния, метод спектральной прозрачности.

Важной экологической проблемой является осаждение образующихся в современном промышленном производстве аэрозолей, как жидко-капельных, так и твердофазных. Перспективным направлением решения указанной проблемы является создание систем коагуляции дисперсных частиц ультразвуко-

выми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности [1-3] (и др. этих авторов). В работе [1] показано, что для целей осаждения вредных субмикронных аэрозолей наиболее эффективным является диапазон длин волн от 20 кГц и выше.