



УДК 517.912

С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов, О.Б. Кудряшова, С.С. Бондарчук

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, Россия,
659322, Бийск, Социалистическая ул., 1, E-mail: admin@ipcet.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПО РАЗМЕРАМ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Предложена новая аппаратная модификация метода спектральной прозрачности (МСП) для определения функции распределения частиц по размерам и их концентрации с использованием широкого диапазона длин волн зондирующего излучения и применением скоростной видеосъёмки. Рассмотрены проблемы решения обратной задачи оптики аэрозолей с использованием регуляризирующего алгоритма – метода параметризации. Разработан новый алгоритм решения обратной задачи оптики аэрозолей с применением технологии прямого поиска и использованием в качестве измерительной информации не абсолютных значений спектральных коэффициентов ослабления, а их отношений для конкретных длин волн. Данная реализация МСП позволяет проводить измерения дисперсных параметров потоков субмикронного аэрозоля, в том числе определять дисперсность природных аэрозолей, аэрозолей, применяемых в технологических процессах, и конденсированной фазы продуктов горения высокоэнергетических материалов. Разработан программно-аппаратный комплекс, который реализует модифицированный МСП.

ДИСПЕРСНОСТЬ, КОНЦЕНТРАЦИЯ, МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ, СУБМИКРОННЫЕ АЭРОЗОЛИ, ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное получение информации о распределении частиц по размерам в какой-либо многофазной системе является необходимым для многих областей науки и техники. От размеров конденсированных частиц зависят как оптические, так и микрофизические свойства среды. В области размеров частиц от единиц микрометров и более эта задача успешно решается с применением метода малоуглового рассеяния с использованием длин волн видимого диапазона спектра [1], однако при меньших размерах частиц такой метод не применим. Быстрое развитие и применение нанотехнологий обуславливает необходимость в приборах, способных определять параметры частиц субмикронного диапазона. На сегодняшний день существует много измерительных устройств, реализующих подобные функции, однако, большинство из них основаны на принципах пробоотбора. Такая аппаратура вносит искажения в исследуемую среду и не всегда применима в технологических процессах. Отличительной особенностью приборов, основанных на оптических методах диагностики, является дистанционность и высокая скорость измерений [2]. Среди оптических методов диагностики гетерогенных сред оптимальным сочетанием сложности реализации и информативности обладает метод спектральной прозрачности (МСП). С учётом этого преимущества, а также значительного потенциала в плане модернизации МСП он был принят за основу при разработке метода исследования динамики дисперсных

параметров субмикронных аэрозольных сред. МСП на настоящий момент не получил широкого практического применения из-за значительной сложности измерений ослабления излучения в широком диапазоне длин волн, вызванной отсутствием адаптированных для этого высокоразрешающих спектральных приборов. Известные приборы, реализующие МСП, осуществляют измерения ослабления излучения только для нескольких десятков длин волн в узких спектральных диапазонах [3-11], что не только снижает точность восстановления размеров частиц, но и может привести к грубым ошибкам [12]. Эта проблема разрешима при использовании современных быстродействующих спектроанализаторов, благодаря им также отпадает необходимость в использовании прецизионных источников излучения, единственным требованием к которым остаётся стабильность. Ещё одной причиной малой популярности МСП является высокая сложность точных математических расчётов, связанных с реализацией метода. Чтобы избежать трудоёмких вычислений, МСП ранее применялся с использованием приближенной формулы расчёта фактора эффективности ослабления для оптически «мягких» частиц, что значительно снижало его универсальность [13]. Однако с использованием современной вычислительной техники появилась возможность проводить вычисления в соответствии с математической моделью МСП, основанной на точных формулах теории Ми, что позволяет получать математически строгий результат.

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

Математическая модель метода

МСП относится к обратным задачам оптики аэрозолей. Аналитическое решение для данного метода было найдено только для оптически «мягких» частиц [14]. В общем случае для различных аэрозолей, комплексный показатель преломления конденсированной фазы которых может быть любым, в МСП записывается уравнение:

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

Для восстановления счётной функции распределения частиц по размерам с использованием уравнения (1) был применён метод параметризации [15]. Сначала измеряется ослабление зондирующего излучения в широком диапазоне длин волн с шагом не менее 0,4 нм, и рассчитывался коэффициент спектральной прозрачности:

$$\tau(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}. \quad (2)$$

После чего проводится нахождение ансамбля значений расчётного коэффициента спектральной прозрачности, найденного по формуле (1), для различных параметров функции счётного распределения частиц по размерам. В качестве такой функции было взято обычное гамма-распределение ввиду его универсальности применительно к аэрозолям с одним механизмом получения дисперсной среды [16]. Далее по минимальной невязке между экспериментальными и расчётными данными выбирались параметры гамма-распределения. Параллельно с процессом измерения ослабления измеряется длина пути зондирующего излучения в исследуемой среде с использованием скоростной видеосъёмки. По известному виду счётного распределения частиц по размерам и длине пути зондирующего излучения в аэрозоле определяется концентрация частиц конденсированной фазы.

Измерительная установка

Схема экспериментального комплекса, применяемого для измерения ослабления оптического излучения и длины его пути в аэрозоле, приведена на рисунке 1.

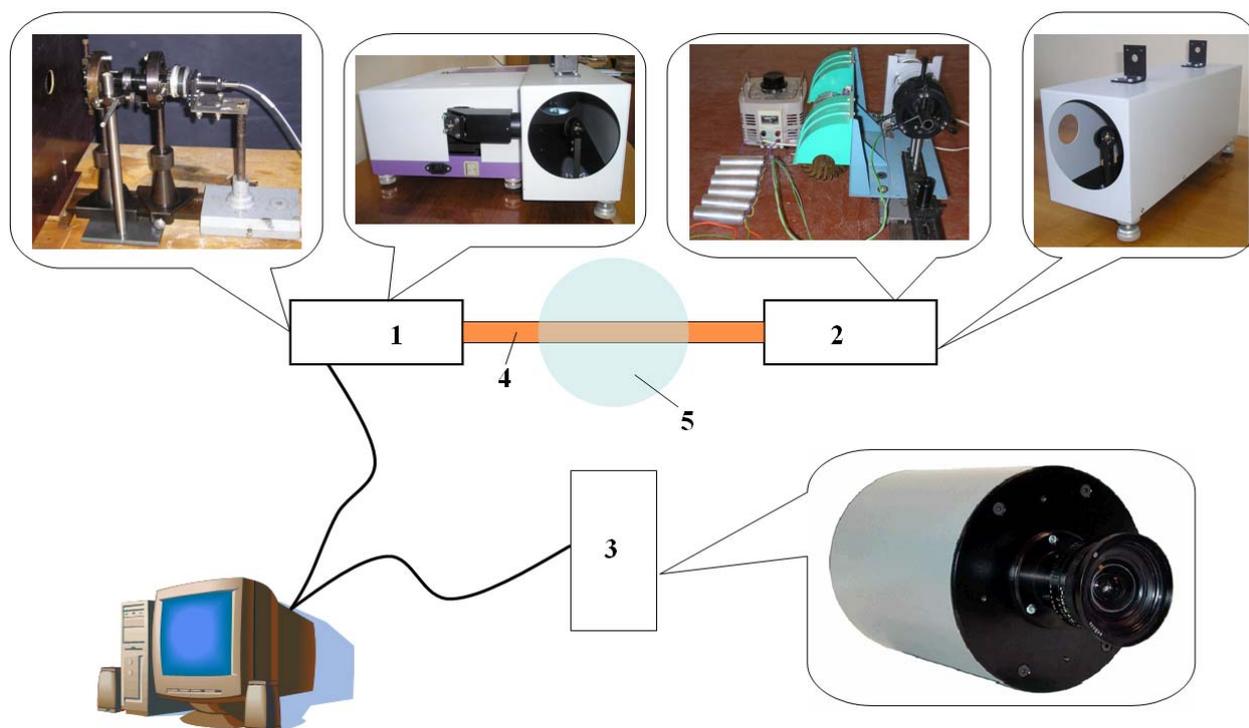


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса (вид сверху):

1 – приёмник зондирующего излучения; 2 – источник зондирующего излучения; 3 – камера скоростной видеосъёмки; 4 – коллимированный поток оптического излучения; 5 – облако исследуемого аэрозоля

В разработанном комплексе в качестве источника и приёмника оптического излучения применялась различная аппаратура в зависимости от диапазона размеров частиц исследуемого аэрозоля. Для среднедисперсных аэрозолей (размеры частиц от 1 до 10 мкм) приёмником оптического излучения был инфракрасный Фурье-спектрометр «Инфралюм ФТ-801» и использовалось разрешение 4 см^{-1} , а источником излучения – инфракрасный прожектор, диапазон исследуемых длин волн для данной реализации был 1,8 – 18 мкм. Для субмикронных аэрозолей приёмником излучения был спектроаналитический анализатор на базе спектрометра S125, измерение интенсивности излучения осуществлялось на участке длин волн от 360 до 1100 нм с шагом 0,376 нм, а источником излучения – галогенная газонаполненная лампа, запитанная от стабилизированного источника питания. Во всех экспериментах, где проводилось измерение длины пути зондирующего излучения, применялись камеры скоростной видеосъёмки ВидеоСпринт /С/Г4 и ВидеоСпринт /Г4/NG, а также гелий-неоновые лазеры, используемые для подсветки облака для более точного определения его границ. В тестовых экспериментах в качестве источника излучения использовался гелий-неоновый трёхволновой лазер, основанный на стандартном лазере ЛГ-75 [18], а приёмниками были кремниевые фотодиоды и пироприёмник.

Вся информация с используемого оборудования поступала на компьютер, где осуществлялась её обработка с использованием разработанного программного обеспечения.

Экспериментальная часть

С применением разработанного измерительного комплекса и предложенной методики был проведён ряд экспериментов по исследованию параметров различных аэрозолей. В качестве модельного эксперимента для проверки работоспособности аппаратной части

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. Выбор дистиллированной воды в качестве конденсированной фазы был обусловлен известностью зависимостей показателя преломления и поглощения от длины волны оптического излучения для данного вещества [18]. Как показали предварительные эксперименты, данными зависимостями нельзя пренебрегать, принимая за комплексный показатель преломления для вещества постоянную величину, определённую лишь для узкого участка длин волн.

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 2 (кривая 1).

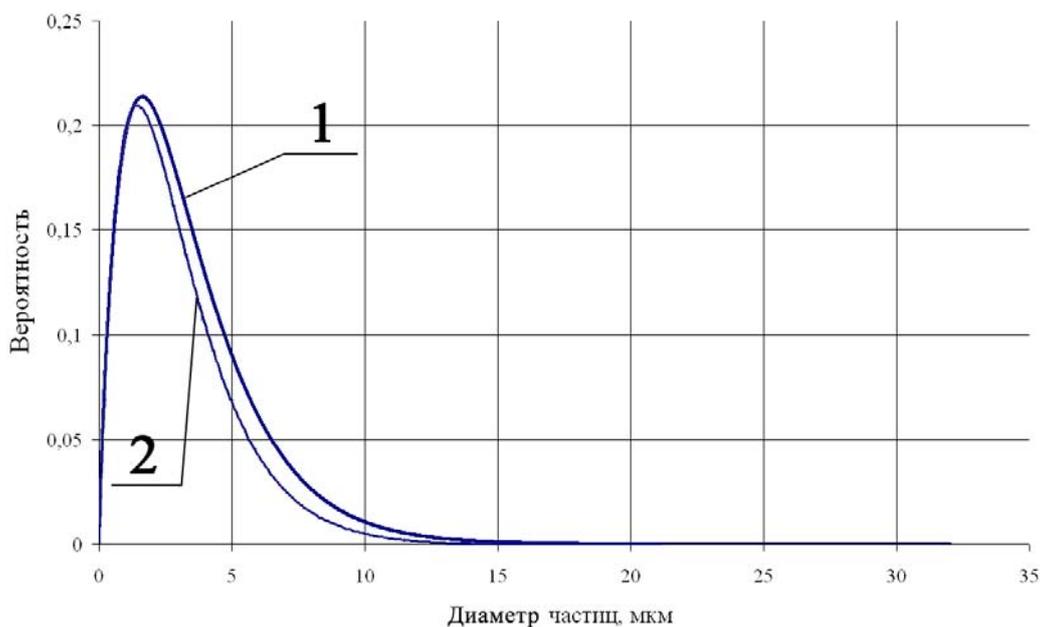


Рис. 2. Счётная функция распределения частиц аэрозоля по размерам, измеренная разработанным методом (1) и методом малоуглового рассеяния (2)

Также счётная функция распределения частиц по размерам для данного расхода была измерена с помощью установки, реализующей метод малоуглового рассеяния (ММУ) [19] (кривая 2 на рисунке 2). Погрешность восстановления функции распределения с помощью разработанного метода относительно данных, полученных при использовании установки, основанной на ММУ не превысила 10 %.

В дальнейшем 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 провалами. Изменение счётной функции распределения частиц по размерам в зависимости от расхода рабочей жидкости для генератора холодного аэрозоля «NEBULO» представлена на рисунке 3.

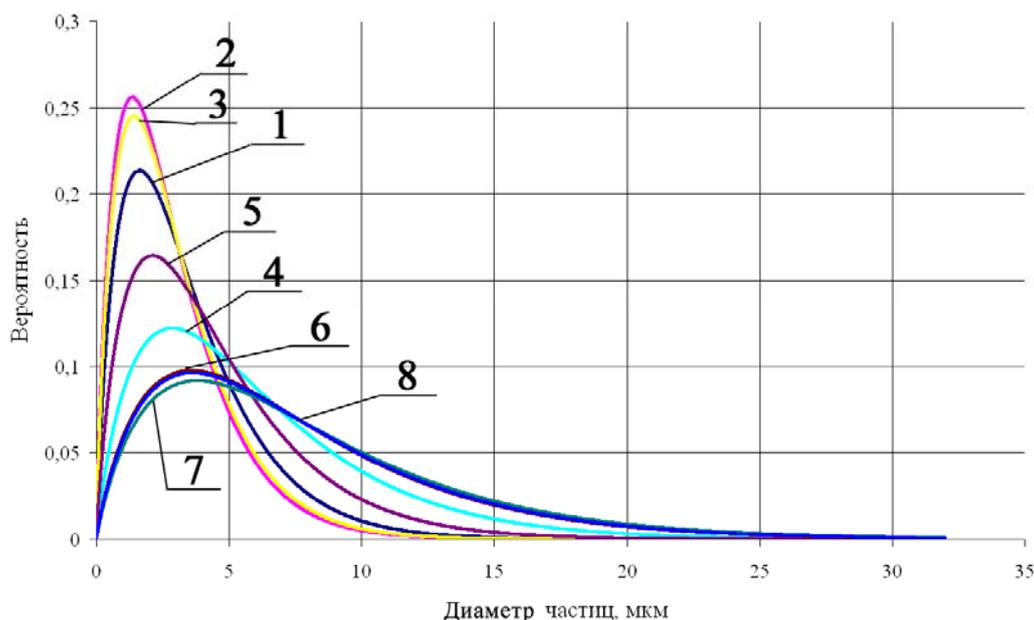


Рис. 3. Изменение счётной функции распределения частиц по размерам в зависимости от расхода рабочей жидкости для генератора холодного аэрозоля «NEBULO»: 1 – 5 мл/мин; 2 – 40 мл/мин; 3 – 75 мл/мин; 4 – 110 мл/мин; 5 – 145 мл/мин; 6 – 180 мл/мин; 7 – 215 мл/мин; 8 – 250 мл/мин

В таблице 1 приведены данные по изменению среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля в зависимости от расхода рабочей жидкости.

Таблица 1. Зависимость среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц от расхода

Расход жидкости, мл/мин	5	40	75	110	145	180	215	250
D_{32}	7,0	5,9	6,1	12,3	9,1	15,4	16,4	15,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы предложен и апробирован новый алгоритм решения обратной задачи оптики аэрозолей для метода спектральной прозрачности с использованием параметризации. Осуществлена модернизация МСП и разработана математическая модель, позволившая распространить данный метод для исследования дисперсных параметров микронных и субмикронных аэрозолей в реальных условиях технологического процесса.

Разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий новый метод исследования динамики дисперсных параметров аэрозолей с использованием инфракрасного спектрометра и источника излучения, спектроаналитического анализатора для видимого участка оптического излучения и скоростной видеокамеры.

Установлена работоспособность разработанного измерительного комплекса при проведении тестового эксперимента по исследованию дисперсности аэрозоля, получаемого с использованием генератора холодного аэрозоля «NEBULO». Подтверждена зависимость дисперсности аэрозоля от расхода рабочей жидкости для генератора.

БЛАГОДАРНОСТИ, СВЕДЕНИЯ О СПОНСОРАХ

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

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$I(\lambda)$ – интенсивность зондирующего излучения, прошедшего через исследуемый аэрозоль;

$I_0(\lambda)$ – интенсивность зондирующего излучения до прохождения через исследуемый аэрозоль;

λ – длина волны зондирующего излучения, мкм;

C_n – счётная концентрация частиц в потоке аэрозоля;

l – длина оптического пути зондирующего излучения в исследуемом аэрозоле, мкм;

Q – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения;

D – диаметр частиц конденсированной фазы исследуемого аэрозоля, мкм;

m – комплексный показатель преломления вещества конденсированной фазы аэрозоля;

$f(D)$ – счётная функция распределения частиц по размерам;

τ – коэффициент спектральной прозрачности;

D_{32} – средний объёмно-поверхностный диаметр частиц.

Сокращения:

МСП – метод спектральной прозрачности;

ММУ – метод малоуглового рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахмадеев И.Р.** Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объёме: дис ... канд. тех. наук. – АлтГТУ – Бийск, 2008. – 98 с.
2. **Голубев, А.Г.** Оптические методы измерения дисперсности аэрозолей / Ягодкин В.И. // Труды ЦИАМ – 1978. – № 828 – С. 1 – 21.
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. **Титов, С.С.** К вопросу решения обратной задачи оптики аэрозоля в реализации метода спектральной прозрачности // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 24 сент. – 26 сент. 2009. – Бийск, 2009. – С. 261 – 267.
13. **Ван де Хюлст, Г.** Рассеяние света малыми частицами // Москва, 1961. – 460 с.
14. **Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света** / под ред. Б.И. Степанова, А.П. Иванова. – Минск: Наука и техника, 1971. – 487 с.
15. **Титов, С.С.** Метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей по их спектральной прозрачности / А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, Е.В. Максименко // Ползуновский вестник / АлтГТУ – 2009. – № 3. – С. 262 – 266.

16. **Архипов, В.А.** Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия / С.С. Бондарчук, А.Г. Коротких, М.И. Лернер // Горный журнал – 2006. – № 4. – С. 58 – 64.
17. **Лушев, В.П.** Трёхволновой He–Ne–лазер с амплитудно-частотной модуляцией излучения / О.А. Москалец, А.А. Павленко, Е.В. Подлесная // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 2. – С. 178 – 179.
18. **Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах** / под ред. М.А. Колосова – М.: Наука, 1977. – 176 с.
19. **Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С., Павленко А.А.** Измерение размеров конденсированных частиц в гетерогенной плазме продуктов сгорания // Известия ВУЗов. Физика, 2006. – Т. 49. – № 6. – С. 16 – 19.

S.S. Titov, A.A. Pavlenko, V.A. Arkhipov, O.B. Kudryashova, S.S. Bondarchuk

*Institute for problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the RAS,
Russia, 659322, Biysk, Socialisticheskaya Str., 1, E-mail: admin@ipcet.ru*

DETERMINATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF SUBMICRON AEROSOLS BY THE SPECTRAL TRANSPERANCY METHOD

A new hardware modification of the spectral transparency method (STM) to estimate the particle size distribution function and particle concentration using a wide range of probe radiation wavelengths and applying high-speed video recording is suggested. Issues of solving the reverse problem of aerosol optics using a regularizing algorithm, the parameterization method, are identified. A new algorithm for solving the aerosol optics inverse problem is designed using direct search technology and employing, as measuring data, not absolute values of spectral attenuation coefficients but their relations for specified wavelengths. This effectuation of the STM enables measurement of disperse parameters of submicron aerosol fluxes, as well as to determine dispersivity of natural aerosols and those used in technological processes and of the condensed phase of combustion products from high-energy materials. A hardware-software system that implements the modified STM is developed.

DISPERSIVITY, CONCENTRATION, SPECTRAL TRANSPARENCY METHOD,
SUBMICRON AEROSOLS, PARAMETERIZATION