

## Особенности обработки данных оптических измерений дисперсных параметров бимодальных сред

А.А. Жирнов<sup>1</sup>, О.Б. Кудряшова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия

### Аннотация

Работа, описанная в статье, посвящена повышению информативности оптических методов измерений параметров дисперсных сред. Проблема заключается в том, что априори задаваемая аналитическая функция (например, логарифмически нормального) распределения частиц по размерам недостаточно точно описывает дисперсную среду с бимодальным и мультимодальным распределением. В работе рассматривается возможность аппроксимации экспериментальных данных с помощью многопараметрической функции распределения частиц по размерам вместо априори задаваемого логарифмически нормального распределения. Для сравнения результатов аппроксимаций были проведены эксперименты на стандартных образцах гранулометрического состава ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ отдельно и совместно путём их смешивания. Регистрация экспериментальных данных производилась турбидиметрическим высокоселективным методом на водных суспензиях данных образцов.

Целью работы является представление результатов измерений в виде функции распределения, позволяющей более точно определять форму распределения частиц по размерам и соответствующие дисперсные характеристики исследуемой среды в оптических методах измерений параметров дисперсных сред.

Основной задачей работы является разработка, реализация и проверка алгоритма поиска функции распределения частиц по размерам в виде многопараметрической функции. Как показано в работе, такое решение данной задачи является более универсальным, так как позволяет исследовать медленные и быстропротекающие процессы в суспензиях и аэрозольных средах с меньшей погрешностью. Алгоритм может быть применён для задач, основанных на решении уравнения Фредгольма I рода.

**Ключевые слова:** аэрозоли, мутная среда, неразрушающий контроль, дистанционное зондирование и датчики, оптический метод, монодисперсный полистирольный латекс, турбидиметрический метод, логарифмически нормальное распределение, многопараметрическая функция распределения, средний объёмно-поверхностный диаметр частиц ( $D_{32}$ ).

**Цитирование:** Жирнов, А.А. Особенности обработки данных оптических измерений дисперсных параметров бимодальных сред / А.А. Жирнов, О.Б. Кудряшова // Компьютерная оптика. – 2019, Т. 43, № 4. – С. 692-698. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-692-698.

### Введение

В настоящее время дисперсные среды широко применяются в повседневной жизни человека: в ингаляторах, в пожаротушающей технике, в двигателях внутреннего сгорания [1] и т.д. Для создания технических устройств с заданными характеристиками необходимо контролировать дисперсность созданной среды [2]. Подобные задачи также встают в связи с необходимостью экологического мониторинга атмосферы и воздуха помещений, особенно в производстве, где существует опасность выбросов частиц класса PM2.5, PM10. Поэтому улучшение существующих методов диагностики параметров дисперсных сред [3] является актуальной задачей.

Большинство дисперсных систем являются полидисперсными, монодисперсные среды в основном получают искусственным путём [4] и используют в качестве стандартных образцов в поверке аппаратуры, измеряющей дисперсность. Примером такого стандартного образца является монодисперсный полистирольный латекс.

Полидисперсные среды могут быть мономодальными, но могут быть и би- и многомодальными. Попытка описать функцию распределения частиц по размерам в таких случаях в виде аналитической функции с одной модой, очевидно, приведет к ошибке. Но насколько велика будет такая погрешность, до сих пор не было исследовано.

Данная работа направлена на совершенствование математической обработки результатов измерений в оптических методах измерения дисперсных параметров на примере турбидиметрического высокоселективного метода. Поиск решения обратной задачи оптики дисперсных систем осуществляется в виде многопараметрической функции распределения частиц по размерам. Проводится сравнение полученного решения с решением в виде аналитической функции (логарифмически нормальное распределение).

В качестве стандартных образцов были взяты монодисперсный полистирольный латекс марок ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ. Эти стандартные образцы по паспортным характеристиками, если их рассматривать

совместно в диапазоне от 300 нм до 5 мкм, не имеют частиц в диапазоне от 400 нм до 3 мкм. Система из смеси частиц данных образцов должна иметь выраженное бимодальное распределение. Стандартные образцы перед измерениями были проанализированы на электронном микроскопе (рис. 1).

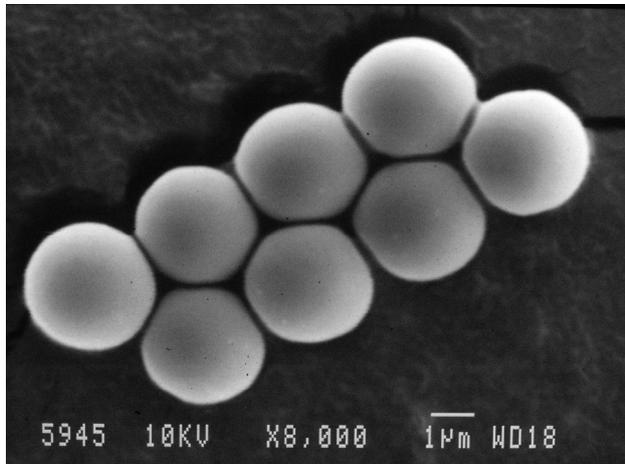


Рис. 1. Форма и размер стандартных образцов ОГС-08ЛМ при исследовании на электронном микроскопе

### 1. Постановка задачи

При исследовании дисперсных сред дистанционными методами диагностики [5–7] в условиях, когда среда уже сформировалась, распределение частиц по размерам успешно описывается функциями Гаусса, гамма-распределением, распределением Райса и их разновидностями (1).

$$f(D) = \frac{1}{D\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\ln(D) - \ln(\mu))^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$ ,  $\mu$  – параметры распределения;  $D$  – диаметр частиц, нм.

Однако в нестационарных, быстропротекающих процессах форма распределения может выглядеть иначе [8].

Так как с помощью логарифмически нормального распределения невозможно описать среду с двумя пиками распределения и более, для представления результатов выбрана многопараметрическая функция распределения частиц по размерам для турбидиметрического высокоселективного метода [9], основная формула расчётов которого выглядит следующим образом (2):

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

где  $i$  – номер длины волны;  $\lambda$  – длина волны, нм;  $\tau_{\lambda_i}^{теор}$  – теоретически рассчитанная оптическая плотность;  $m(\lambda_i)$  – комплексный показатель преломления для полистирольных латексных шариков;  $Q(\pi D/\lambda_i, m(\lambda_i))$  – фактор эффективности ослабления.

Для решения задачи восстановления функции распределения частиц по размерам используется экспериментальная информация об оптических плотностях, определяемых выражением (3).

$$\tau_{\lambda_i}^{эксн} = \ln \frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}, \quad (3)$$

где  $I_0(\lambda_i)$  – значение интенсивности при прохождении зондирующего излучения через кварцевую кювету с дистиллированной водой;  $I(\lambda_i)$  – значение интенсивности при прохождении зондирующего излучения через кварцевую кювету с дистиллированной водой и полистирольными латексными шариками.

Из выражения (3) находятся отношения оптических плотностей для набора длин волн (4).

$$k_{\lambda_i}^{эксн} = \frac{\tau_{\lambda_i}^{эксн}}{\tau_{\lambda_1}^{эксн}}. \quad (4)$$

В методе [9] нахождение функции распределения частиц по размерам происходит путем решения серии прямых задач оптики аэрозолей при различных параметрах распределения (1) и нахождения минимума функционала (5).

$$\Omega = \min_{\sigma, \mu} \left\{ \sum_{i=1}^n |k_{\lambda_i}^{эксн} - k_{\lambda_i}^{теор}| \right\}, \quad (5)$$

где  $k_{\lambda_i}^{эксн}$  и  $k_{\lambda_i}^{теор}$  соответственно – экспериментально полученные и теоретически рассчитанные отношения оптических плотностей на  $i$ -й длине волны.

Данный алгоритм был реализован ранее на высокоуровневом языке программирования в виде компьютерной программы.

Для описания дисперсных систем с бимодальным распределением необходимо распределение (1) заменить на многопараметрическое, которое позволит описать дисперсность любых аэрозольных сред.

### 2. Алгоритм решения

Алгоритм подразумевает на первом шаге – разбиение всего диапазона измерений на  $A_i$  параметров, т.е. каждый параметр имеет ширину в  $D$  мкм/нм. После этого в каждом диапазоне, найденном на первом шаге, производится поиск решения  $M_j$  – параметрической функцией, которая умножается на вес параметра, найденного на первом шаге. Таким образом, получается  $A_i M_j$  параметрическая функция распределения частиц по размерам. Дальнейшее разбиение производится аналогичным образом. Алгоритм схематически представлен на рис. 2. Многократными показана, что разбиение на  $M$  параметров производится для каждого из  $A$  параметров, определённых на первом этапе.

По мере уточнения вида распределения на каждом последующем этапе значение невязки  $\Omega$  в формуле (5) становится всё меньше и меньше, тем самым приближаясь к истинной форме распределения. Процесс разбиения продолжается до тех пор, пока  $\Omega$  не будет меньше заранее заданной величины  $\epsilon$ .

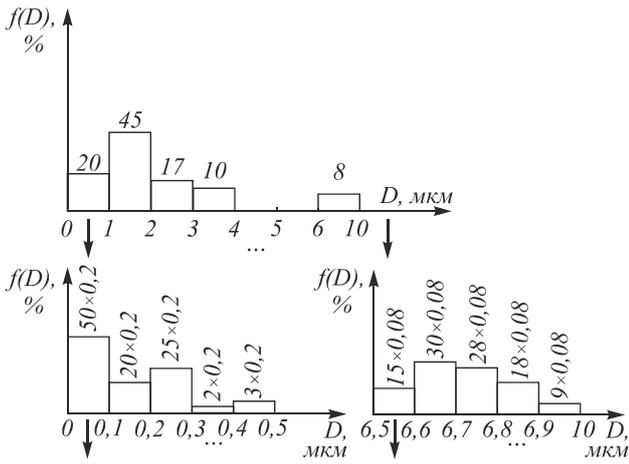


Рис. 2. Схематическое представление алгоритма нахождения многопараметрической функции

Данный алгоритм был реализован в виде программы на языке C++ с использованием MS Visual Studio 2012 в качестве среды разработки. Общее время расчётов составляет до 5 минут, что является приемлемым в лабораторных исследованиях.

Для поиска решения на первом и втором шаге в виде многопараметрической функции использовались формулы (6), (7).

$$f(D) = \begin{cases} A_1 & \text{при } D \leq D_1; \\ A_2 & \text{при } D_1 < D \leq D_2; \\ A_3 & \text{при } D_2 < D \leq D_3; \\ A_i & \text{при } D_{i-1} < D \leq D_i; \\ 1 - \sum_i^N A_i & \text{при } D_i < D_N, \end{cases} \quad (6)$$

где  $A_1, \dots, A_i$  – параметры функции распределения;  $N$  – число столбцов (параметров) распределения;  $D$  – диаметр частиц, мкм/нм.

$$f(D) = \begin{cases} M_1 & \text{при } d \leq d_1; \\ M_2 & \text{при } d_1 < d \leq d_2; \\ M_3 & \text{при } d_2 < d \leq d_3; \\ M_j & \text{при } d_{j-1} < d \leq d_j; \\ 1 - \sum_j^N M_j & \text{при } d < D_1, \end{cases} \quad (7)$$

где  $M_1, \dots, M_j$  – параметры функции распределения в поддиапазоне;  $d$  – диаметр частиц в поддиапазоне, мкм/нм.

Для сравнения результатов будем использовать усредненную характеристику  $D_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр, мкм/нм. Для  $N$  – параметрической функции распределения  $D_{32}$  вычисляется по формуле (8).

$$D_{32} = \frac{A_1 D_1^3 + A_2 D_2^3 + \dots + A_i D_i^3 + \left(1 - \sum_i^N A_i\right) D_{i+1}^3}{A_1 D_1^2 + A_2 D_2^2 + \dots + A_i D_i^2 + \left(1 - \sum_i^N A_i\right) D_{i+1}^2} \quad (8)$$

### 3. Эксперимент

Были проведены три эксперимента, для которых получены точки во времени. Во всех экспериментах стандартные образцы помещались в одну и ту же предварительно подготовленную кварцевую кювету с длиной оптического пути 5,075 мм. В первом эксперименте в кювету помещалась водная суспензия со стандартным образцом ОГС-01ЛМ. Во втором эксперименте в кювету помещалась водная суспензия со стандартным образцом ОГС-08ЛМ. В третьем эксперименте в кювету помещалась водная суспензия со стандартным образцом ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ вместе. Результаты эксперимента аппроксимировались функцией логарифмически нормального распределения и 50 параметрической функцией. Разбиение 50 параметрической функцией производилось таким образом: на первом этапе 10 параметрическая функция (грубое приближение); на втором этапе 5 параметрическая функция (более точное приближение). На рис. 3а, 3б показаны счётные функции распределения частиц по размерам для стандартного образца ОГС-01ЛМ (первый эксперимент).

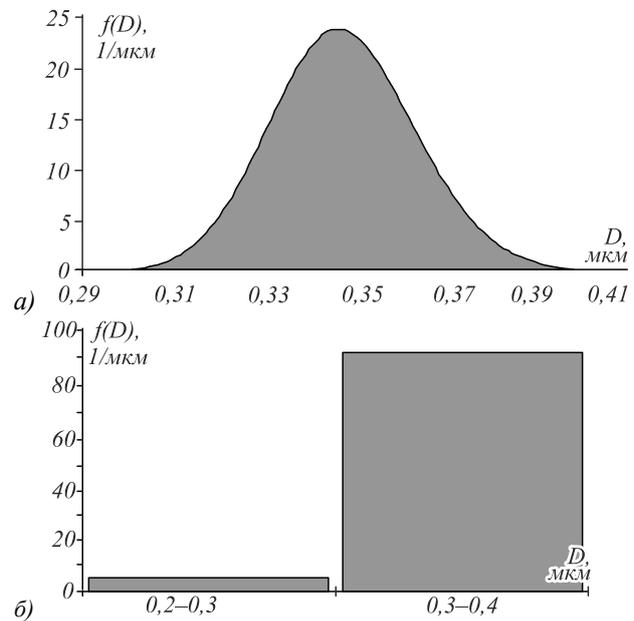


Рис. 3. Счётные функции распределения частиц по размерам для ОГС-01ЛМ

Для разных экспериментальных точек вид функций распределения меняется незначительно. Значения  $D_{32}$  в обоих случаях обработки входят в диапазон для данных стандартных образцов.

При исследовании стандартного образца ОГС-08ЛМ (второй эксперимент) были получены аналогичные результаты по  $D_{32}$ . На рис. 4а, б отражены

счётные функции распределения частиц по размерам для каждого метода обработки.

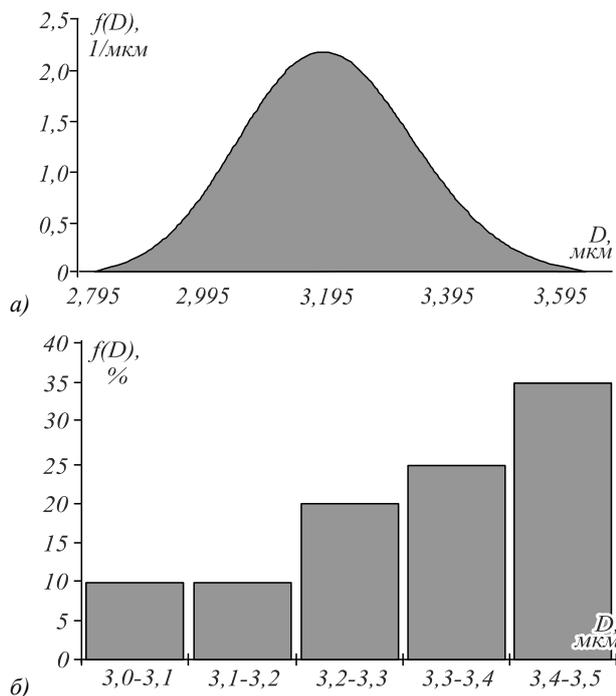


Рис. 4. Счётные функции распределения частиц по размерам для ОГС-08ЛМ

В третьем эксперименте при анализе водной суспензии с частицами стандартного образца ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ вместе были получены результаты, представленные на рис. 5а и 5б.

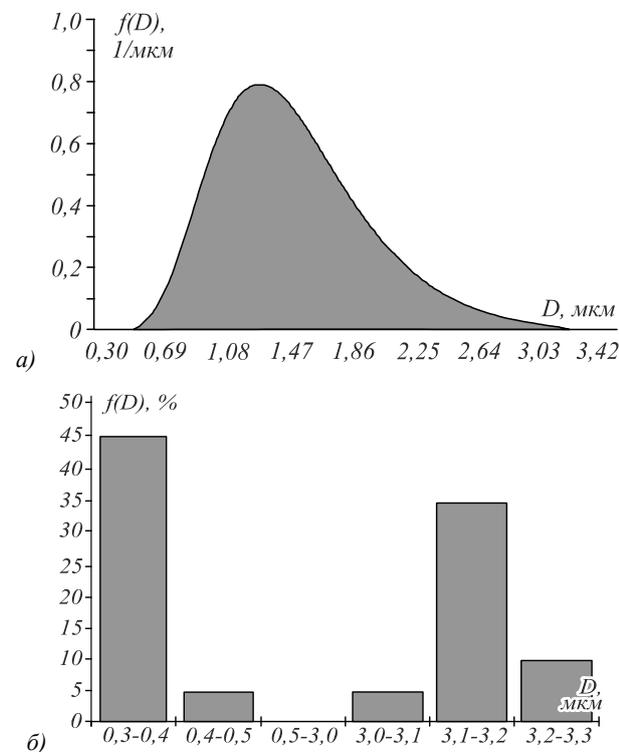


Рис. 5. Счётные функции распределения частиц по размерам для водной суспензии с ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ

Здесь можно сделать вывод, что диапазон размеров частиц обеих функций распределения соответствует паспортным характеристикам, однако существенно отличаются формы распределений. На рис. 5а мода приходится примерно на 1,2 мкм. На рис. 5б функция распределения имеет 2 моды [10, 11]: на диапазон 300–400 нм, что соответствует стандартному образцу ОГС-01ЛМ; на диапазон 3–5 мкм, что соответствует образцу ОГС-08ЛМ.

Значения  $D_{32}$  для 10 экспериментальных точек представлены на рис. 6.

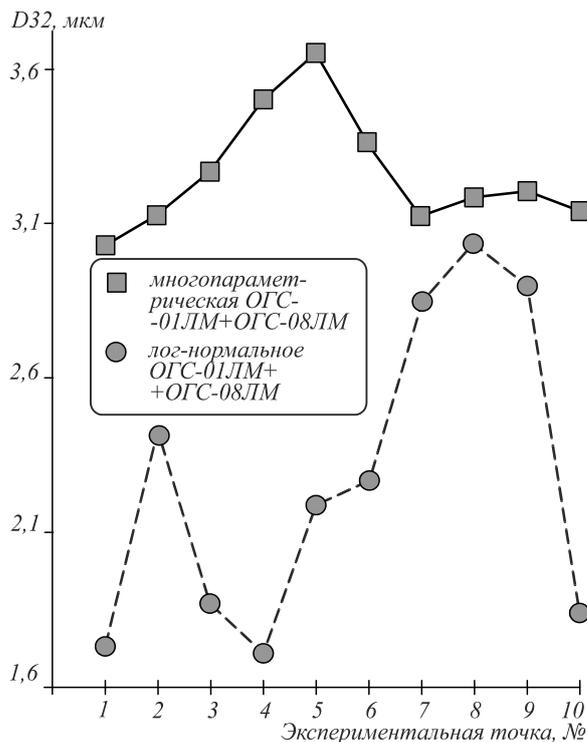


Рис. 6. Графики зависимости  $D_{32}$ , мкм для 10 экспериментальных точек

Из полученных графиков можно сделать вывод, что в некоторых точках значения  $D_{32}$  могут отличаться в 1,5–2 раза.

Таким образом, были получены данные, которые подтверждают корректность и большую точность по сравнению с ранее использовавшимся алгоритмом поиска функции распределения частиц по размерам.

В табл. 1 приведены статистические данные на основании 10 экспериментальных точек.

Из табл. 1 видно, что средние значения и дисперсия для  $D_{32}$  достаточно близки при разных вариантах обработки в стандартных образцах ОГС-01ЛМ и ОГС-08ЛМ. Значения третьего столбца ( $\Omega$ , среднее) для ОГС-01ЛМ+ОГС-08ЛМ показывают, насколько точнее подобралась форма функции распределения частиц по размерам: чем меньше значение, тем точнее.

**Заключение**

Из проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы: качественно изменён и реализован алгоритм для поиска функции распределения ча-

стиц по размерам; разработанный алгоритм позволяет точнее определять форму распределения частиц по размерам и сопутствующие дисперсные характеристики.

Табл. 1. Статистические данные по экспериментам

Вариант обработки	$D_{32}$ , среднее, мкм	$D_{32}$ , дисперсия, мкм	$\Omega$ , среднее
<b>ОГС-01ЛМ</b>			
лог-нормальное	0,360	0,0008	0,002
многопараметрическая	0,384	0,0001	0,001
<b>ОГС-08ЛМ</b>			
лог-нормальное	3,3	0,008	0,0006
многопараметрическая	3,3	0,015	0,0002
<b>ОГС-01ЛМ + ОГС-08ЛМ</b>			
лог-нормальное	2,28	0,25	3,53
многопараметрическая	3,25	0,034	0,87

Данный алгоритм наиболее актуален при мониторинге окружающей среды, так как имеются несколько источников образования аэрозоля разных дисперсных фракций, отработке устройств и способов мокрой очистки промышленных выбросов от дисперсных примесей, исследовании быстропротекающих процессов, а также нанодисперсных сред, где возможно появление мультимодальных функций распределения.

Разработанный алгоритм поиска решения в виде многопараметрической функции является универсальным, способным описать любые дисперсные системы. Он может быть применён в задачах, основанных на решении уравнения Фредгольма I рода, а также осуществляющих поиск неизвестной функции распределения.

Дальнейшая модификация метода может быть связана с увеличением числа параметров распределения для большего увеличения точности и оптимизацией обработки.

#### Благодарности

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

#### Литература

1. **Добринский, Э.К.** Оптимизация нанодисперсной добавки в моторное масло / Э.К. Добринский, В.В. Сафонов, А.В. Гороховский, В.Н. Буйлов, А.С. Азаров, К.В. Сафонов // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 3(15). – С. 12-16.
2. **Khmelev, V.N.** Determination of the modes and the conditions of ultrasonic spraying providing specified productivity and dispersed characteristics of the aerosol / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskih, A.V. Shalunova // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2017. – Vol. 10, Issue 5. – P. 1409-1419.
3. **Mitchell, J.P.** Particle standards: their development and application / J.P. Mitchell // KONA Powder and Particle Journal. – 2000. – Vol. 18. – P. 41-59.
4. **Duan, H.** Generation of monodisperse aerosols by combining aerodynamic flow-focusing and mechanical perturbation / H. Duan, F.J. Romay, C. Li, A. Naqwi, W. Deng, B.Y. Liu // Aerosol Science and Technology. – 2016. – Vol. 50, Issue 1. – P. 17-25.
5. **Becker, W.** Turbidimetric method for the determination of particle sizes in polypropylene/clay-composites during extrusion / W. Becker, V. Guschin, I. Mikonsaari, U. Teipel, S. Kölle, P. Weiss // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2017. – Vol. 409, Issue 3. – P. 741-751..
6. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред / В.Н. Лопатин, А.В. Приезжев, А.Д. Апонасенко, Н.В. Шепелевич, В.В. Лопатин, П.В. Пожиленкова, И.В. Простакова. – М.: Физматлит, 2004. – 384 с. – ISBN: 5-9221-0547-7.
7. **Архипов, В.А.** Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания: учеб. пособие / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 265 с.
8. **Mukhopadhyay, S.** Large-scale mode identification and data-driven sciences / S. Mukhopadhyay // Electronic Journal of Statistics. – 2017. – Vol. 11, Issue 1. – P. 215-240.
9. **Титов, С.С.** Турбидиметрический метод и быстродействующий измерительный комплекс определения параметров нестационарных многофазных сред : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.01 / Титов Сергей Сергеевич. – Бийск, 2011. – 153 с.
10. **Жирнов, А.А.** Модификация турбидиметрического высокоселективного метода для измерения быстропротекающих процессов / А.А. Жирнов, С.С. Титов, О.Б. Кудряшова // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 3. – С. 95-99. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.3.95.
11. **Peng, S.-J.** A new method to synthesize high solid content waterborne polyurethanes by strict control of bimodal particle size distribution / S.-J. Peng, Y. Jin, X.-F. Cheng, T.-B. Sun, R. Qi, B.-Z. Fan // Progress in Organic Coatings. – 2015. – Vol. 86. – P. 1-10.

#### Сведения об авторах

**Жирнов Анатолий Алексеевич**, 1988 года рождения, в 2013 году окончил Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по специальности «Прикладная информатика в экономике», работает научным сотрудником в ИПХЭТ СО РАН. Область научных интересов: оптические методы диагностики дисперсных сред, численные методы, программирование.

E-mail: [toluol\\_88@mail.ru](mailto:toluol_88@mail.ru).

**Кудряшова Ольга Борисовна**, 1962 года рождения, в 1985 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по специальности «Баллистика», д.ф.-м.н., работает старшим научным сотруд-

ником в ИПХЭТ СО РАН. Область научных интересов: физика аэрозолей, математическое моделирование, металлургия. E-mail: [olgakudr@inbox.ru](mailto:olgakudr@inbox.ru).

ГРТИ: 29.03.77

Поступила в редакцию 4 февраля 2019. Окончательный вариант – 2 апреля 2019 г.

## Peculiarities of data processing for optical measurements of disperse parameters of bimodal media

A.A. Zhirnov<sup>1</sup>, O.B. Kudryashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

### Abstract

This study is focused on enhancing the informativity of optical measurement techniques for particulate matter. The problem is that the description of particulate matter with bimodal and multimodal distributions by an a priori defined analytical function of particle size distribution (for example, a log-normal distribution) is not accurate enough. Here, we explore if experimental data can be approximated by a multivariable function of particle size distribution instead of using the a priori defined log-normal distribution. For the comparison of the approximation results, experiments are conducted on standard samples with granulometric compositions OGS-01LM and OGS-08LM separately and jointly in a mix. The experimental data are recorded by a high-selectivity turbidimetric technique in water suspensions of these samples. **The purpose** of this study is to present the measurement results as a distribution function that enables one to identify more accurately the particle-size distribution profile and the corresponding disperse characteristics of the aerosol in question when measuring parameters of disperse media by optical techniques. **The main objective** of this work is to develop, implement and verify a search algorithm for the particle-size distribution function by way of a multi-parameter function. We show that the solution to the problem proposed herein is more universal because it allows slow and fast processes in suspensions and aerosols to be examined with a lower error. The algorithm can be applied to the problems which are based on solving first-kind Fredholm equations.

**Keywords:** aerosols, turbid media, nondestructive testing, remote sensing and sensors, optical method, monodisperse polystyrene latex, turbidimetric technique, log-normal distribution, multi-variable function, Sauter mean diameter.

**Citation:** Zhirnov AA, Kudryashova OB. Peculiarities of data processing for optical measurements of disperse parameters of bimodal media. *Computer Optics* 2019; 43(4): 692-698. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-692-698.

**Acknowledgments:** The work was performed on the equipment provided by the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment of the SB RAS (IPCET SB RAS, Biysk).

### References

- [1] Dobrinsky EK, Safonov VV, Gorokhovskiy AV, Builov VN, Azarov AS, Safonov KV. Optimization of nanodisperse additives into the engine oil [In Russian]. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region* 2014; 3(15): 12-16.
- [2] Khmelev VN, Shalunov AV, Golykh RN, Nesterov VA, Dorovskikh RS, Shalunova AV. Determination of the modes and the conditions of ultrasonic spraying providing specified productivity and dispersed characteristics of the aerosol. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2017; 10(5): 1409-1419.
- [3] Mitchell JP. Particle standards: their development and application. *KONA Powder and Particle Journal* 2000; 18: 41-59.
- [4] Duan H, Romay FJ, Li C, Naqwi A, Deng W, Liu BY. Generation of monodisperse aerosols by combining aerodynamic flow-focusing and mechanical perturbation. *Aerosol Science and Technology* 2016; 50(1): 17-25.
- [5] Becker W, Guschin V, Mikonsaari I, Teipel U, Kölle S, Weiss P. Turbidimetric method for the determination of particle sizes in polypropylene/clay-composites during extrusion. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2017; 409(3): 741-751.
- [6] Lopatin VN, Priezzhev AV, Aponasenko AD, Shepelevich NV, Lopatin VV, Pozhilenkova PV, Prostakova IV. Light scattering methods in the analysis of disperse biological media [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2004. ISBN: 5-9221-0547-7.
- [7] Arhipov VA, Bondarchuk SS. Optical methods of diagnostics of heterogeneous plasma of products of combustion. *Uchebnoe posobie* [In Russian]. Tomsk: "Tomsk State University" Publisher; 2010.
- [8] Mukhopadhyay S. Large-scale mode identification and data-driven sciences. *Electronic Journal of Statistics* 2017; 11(1): 215-240.
- [9] Titov SS. Turbidimetric method is highly selective and fast measurement system of determining the parameters of non-stationary multiphase media [In Russian]. The thesis for the Candidate's degree in Technical Sciences. Biysk; 2011.
- [10] Zhirnov AA, Titov SS, Kudryashova OB. Modification of the turbidimetric high-selective method for measurement of fast processes [In Russian]. *J Information and Control Systems* 2016; 82(3). 95-99. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.3.95.

- [11] Peng S-A, Jin Y, Cheng X-F, Sun T-B, Qi R, Fan B-Z. A new method to synthesize high solid content waterborne polyurethanes by strict control of bimodal particle size distribution. *Progress in Organic Coatings* 2015; 86: 1-10.

---

*Authors' information*

**Anatoliy Alekseevich Zhirnov** (b. 1988) in 2013 graduated from the Biysk Institute of Technology (branch) of the Federal State-funded Educational Institution of the Higher Education "Altai State Technical University of I.I. Polzunov" in "Applied Informatics in the Economy", works as the researcher in IPCET of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. Area of scientific interests: optical methods of diagnostics of dispersion media, numerical methods, programming. E-mail: [toluol\\_88@mail.ru](mailto:toluol_88@mail.ru).

**Ol'ga Borisovna Kudrjashova** (b. 1962) in 1985 graduated from the Federal Public Independent Educational Institution of the Higher Education "National Research Tomsk State University" in "Ballistics", Doctor of Physicomathematical Sciences, works as the senior research associate in IPCET of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. Area of scientific interests: physics of aerosols, mathematical modeling, metallurgy.

E-mail: [olgakudr@inbox.ru](mailto:olgakudr@inbox.ru).

---

*Received February 04, 2019. The final version – April 02, 2019.*

---