

УДК 541.182;681

НОВЫЙ МЕТОД МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Р. В. КАЗАРЯН

СКТБ «Аэрозоль»

(Поступила в редакцию 3 июля 1984 г.)

Предложен метод метрологического обеспечения оптико-электронных аэрозольных спектрометров, рассматривающий их как оператор, переводящий истинную функцию распределения аэрозольных частиц по размерам в приборную функцию распределения. Дан способ нахождения общего вида оператора в линейном приближении. Оператор разбит на произведение двух не зависящих друг от друга операторов, вид которых обусловлен соответственно физическими процессами взаимодействия прибор-среда и оптическими эффектами из-за неравномерности поля чувствительности счетного объема. Приведен вид последнего оператора в линейном приближении. Показана возможность экспериментальной проверки теории Ми по результатам градуировки оптико-электронных аэрозольных спектрометров.

1. Размеры природных аэрозольных частиц колеблются от сотых долей микрометра до миллиметра, а возможная концентрация обычно меняется в пределах $10-10^8 \text{ см}^{-3}$. Поэтому для различных диапазонов изменения размеров и концентраций аэрозольных частиц применяются различные методы отбора [1, 2].

В настоящее время задача измерения аэрозольного спектра наиболее удачно решается с помощью оптико-электронных спектрометров аэрозолей с оптическим формированием счетного объема [3]. Устранению некоторых систематических ошибок измерений посвящены работы [4—8], в которых предлагаются различные модельные подходы для введения поправок в результаты измерений.

В настоящей работе развивается феноменологический подход, в котором прибор рассматривается как оператор, переводящий истинную функцию распределения частиц по размерам в приборную функцию. Предполагается, что характер взаимодействия частиц с прибором — макроскопическим телом — такой же, как и в [9], что всегда имеет место при достаточно малых концентрациях аэрозольных частиц.

Пусть $g(\lambda, r)$ — однопараметрическая система плотности распределения по радиусу r в единице объема, которая создается некоторой системой генераторов аэрозолей, $f(r)$ — произвольная плотность распределения частиц по r в единице объема. Если система функций $g(\lambda, r)$ является полной при $\lambda \in A$ (A — некоторое числовое множество), то $f(r)$ можно разложить по функциям $g(\lambda, r)$:

$$f(r) = \int_A c(\lambda) g(\lambda, r) d\lambda. \quad (1)$$

Из вышесказанного следует, что прибор можно представить как «черный ящик», характеризуемый некоторым линейным оператором $\hat{R}$. Под действием на (1) оператором $\hat{R}$:

$$\hat{R}f(r) = \int_A c(\lambda) \hat{R}g(\lambda, r) d\lambda. \quad (2)$$

Функция $\hat{R}f(r)$ является показанием прибора и характеризует плотность распределения по радиусу r частиц, регистрируемых прибором за единицу времени. Функцию $\hat{R}g(\lambda, r)$ от двух переменных λ и r можно найти при градуировке прибора. Следовательно уравнение (2) представляет собой линейное интегральное уравнение первого рода относительно функции $c(\lambda)$ с ядром $\hat{R}g(\lambda, r)$. Решая уравнение (2) относительно $c(\lambda)$ и подставляя ее в соотношение (1), найдем истинную плотность $f(r)$ функции распределения.

Ядро $\hat{R}g(\lambda, r)$ интегрального уравнения (2) характеризует сам прибор и условия измерения спектра аэрозольных частиц. Моделируя эти условия в соответствии с техническими требованиями к аэрозольному спектрометру, можно найти ядро $\hat{R}g(\lambda, r)$, с помощью которого будут учитываться все систематические ошибки в комплексе.

Таким образом, задача метрологического обеспечения оптико-электронных спектрометров сводится к созданию полной системы функций $g(\lambda, r)$ ($\lambda \in A$) при помощи генераторов аэрозолей, что является технически разрешимой задачей.

2. При данной постановке задачи важное значение имеет разбиение оператора $\hat{R}$ на произведение нескольких операторов, не зависящих друг от друга. В настоящей работе рассматривается разбиение

$$\hat{R} = \hat{R}_0 \hat{R}_\Phi, \quad (3)$$

где $\hat{R}_\Phi$ — оператор, обусловленный физическими явлениями (аспирация, инерционный захват, испарение, разбиение аэрозольных частиц), $\hat{R}_0$ — оператор, обусловленный неоднородностью поля чувствительности счетного объема.

Пусть скорости проходящих через счетный объем частиц перпендикулярны к плоскости xy . Если не интересоваться формой электрического сигнала u , который соответствует световому потоку, рассеянному частицей и попавшему на ФЭУ, и считать скорости частиц не зависящими от их радиуса, то можно записать

$$u = E(x, y) F(r), \quad (4)$$

где $E(x, y)$ — максимальная освещенность счетного объема на прямой, проходящей через точку (x, y, z) параллельно скорости движения частиц.

$F(r)$ — некоторая функция радиуса r частицы, которая может быть найдена, например, по теории Ми [10].

Предположим, что счетный объем настолько мал, что случайный вектор (x, y) распределен равномерно по всей области счетного объема, т. е.

$$d\sigma = \frac{dx dy}{S}, \quad (5)$$

где $d\sigma$ — вероятность попадания частицы в области $[x, x + dx]$, $[y, y + dy]$, S — площадь проекции поверхности максимальной освещенности счетного объема на плоскость, перпендикулярную движению частиц. Пренебрегая кратным попаданием частиц в счетный объем (что имеет место при малых значениях концентрации аэрозоля и счетного объема), учитывая независимость случайных величин (x, y) и r и принимая во внимание (4) и (5), можно получить

$$H(u) = \int_0^{\infty} K(u, r) n(r) dr, \quad (6)$$

где $H(u) du$ — число частиц, каждая из которых дает импульс в интервале $[u, u + du]$, $n(r) dr$ — число частиц с размерами в интервале $[r, r + dr]$,

$$K(u, r) \equiv v \int_B \frac{D(x, y)}{D(x, u)} dx, \quad (7)$$

v — скорость частиц, проходящих через счетный объем, $B \equiv \{x | E(x, y) \times \times F(r) = u\}$, $D(x, y)/D(x, u)$ — якобиан, соответствующий уравнению (4).

Ядро (7) интегрального уравнения (6) является характеристикой прибора, так как оно зависит только от структуры поля чувствительности счетного объема. Легко видеть, что ядро $K(u, r)$ является откликом δ -функции Дирака, которая описывает распределение монодисперсного аэрозоля, входящего в прибор. Это значит, что ядро $K(u, r)$ можно найти при градуировке прибора монодисперсным аэрозолем.

Для градуировки оптико-электронных спектрометров также можно использовать полидисперсную аэрозоль. Для этого предположим, что мы имеем заранее известную плотность $n_0(r)$ распределения частиц по радиусу r в единице объема, которая создается некоторой системой генераторов аэрозолей. После градуировки прибора найдем

$$H_0(u) \equiv \hat{R}_0 n_0(r). \quad (8)$$

Число частиц, имеющих размер в интервале $[r, r + dr]$, проходящих через счетный объем в единицу времени, равно $v S n_0(r) dr$. Каждая из этих частиц даст импульс в интервале $[u, u + du]$ согласно соотношению (4). Обозначим вероятность попадания частицы в область поля чувствительности счетного объема с освещенностью в интервале $[E, E + dE]$ через $p(E) dE$. Тогда, учитывая независимость случайных величин E и r и принимая во внимание соотношение (4), получим

$$H_0(u) = \int_0^{\infty} n_0(F^{-1}(u/E)) \left| \frac{\partial}{\partial u} F^{-1}(u/E) \right| v S_p(E) dE. \quad (9)$$

Соотношение (9) можно рассматривать как интегральное уравнение относительно величины $v S_p(E)$, характеризующей прибор и условие измерения, с ядром $n_0(F^{-1}(u/E)) |\partial/\partial u [F^{-1}(u/E)]|$. Выполнив несколько экспериментов, можно найти также $F(r)$ и проверить одновременно теорию Ми (если это нужно по каким-либо причинам).

Легко видеть, что имеет место соотношение

$$H(u) = \int_0^{\infty} v S_p(u/F(r)) (F(r))^{-1/n(r)} dr. \quad (10)$$

Найдя из (9) функцию $v S_p(E)$, мы можем интерпретировать соотношение (10) как интегральное уравнение первого рода относительно $n(r)$ с ядром

$$K(u, r) = \frac{v S}{|F(r)|} p(u/F(r)). \quad (11)$$

Таким образом, зная из градуировки $n_0(r)$ и $H_0(r)$, т. е. один пример отображения $H(r) = \hat{R}_0 n(r)$, мы можем по формуле (10) построить оператор $\hat{R}_0$, т. е. учесть все оптические искажения одновременно.

В заключение автор приносит благодарность Г. М. Амирджаняну за основные идеи настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Л. М. Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей. Изд. Наука, М., 1961.
2. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. Изд. Наука, М., 1955.
3. Беляев С. П. и др. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. Энергоиздат, М., 1981.
4. Волощук В. М. Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. Изд. Наука, М., 1965.
5. Беляев С. П., Левин Л. М. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 14, 11 (1970).
6. Яламов Ю. И., Мурадян С. М., Амирджанян Г. М. Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные рукописи», 1980, № 2, 6/о 4 (№ 3829—79 Деп. 11 ноября 1979 г.).
7. Яламов Ю. И., Ивченко И. Н., Мурадян С. М. ДАН СССР, Физика, 258, 5 (1981).
8. Александров Э. Л., Волошин А. Е. Труды ИЭМ, вып. 19 (72), 83 (1978).
9. Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. Изд. Наука, М., 1966.
10. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. Изд. ИЛ, М., 1961.

ԱՆԴՐՈՂՈՒՆԵՐԻ ՕՊՏԻԿԱ-ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՍՊԵԿՏՐՈՄԵՏՐԵՐԻ
ՉԱՓԱՐԱՆԱԿԱՆ ՍՊԵԿՏՐՈՄԵՏՐԱՆ ՆՈՐ ՄԵԹՈԴ

Բ. Վ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Առաջարկվում է օպտիկա-էլեկտրոնային սպեկտրոմետրի շախմատական ապացույցման նոր մեթոդ, որում սպեկտրոմետր դիտարկվում է որպես բաշխման իրական ֆունկցիան

ստորագրելի փոխարկող օպերատոր: Օպերատորը ներկայացված է երկու իրարից անկախ օպերատորների արտադրյալի տեսքով, որոնցից մեկը պայմանավորված է սպեկտրոմետրի հաշվիչ ծավալում զգայնության դաշտի անհամառոտությամբ, իսկ մյուսը՝ սարք-անբողոլ համակարգի փոխադրելիությամբ: Բերված է առաջին օպերատորի տեսքը զծաշին մոտավորությամբ, որը կիրառելի է նաև Միի անստեփյամբ ստացված արդյունքները փորձնական եղանակով ստուգելու:

A NEW METHOD OF METROLOGICAL SUPPLY OF AEROSOL OPTOELECTRONIC SPECTROMETERS

R. V. KAZARYAN

A new method of metrological supply of aerosol optoelectronic spectrometers, in which the spectrometer is considered as an operator that transforms the truth distribution function into the experimental one, is proposed. This operator is represented as a product of two independent operators, the forms of which are stipulated respectively by optical effect due to the inhomogeneity of the counting volume sensitivity and by the interaction between the instrument and aerosol. The form of the first operator in linear approximation is given, that could be applied for experimental verification of data obtained by using the Mee theory.

