

КАЛИБРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГРАНУЛОМЕТРА АЭРОЗОЛЕЙ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ОСАЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ

Х.Ф. Таммет

I. Математические модели

Гранулометрический спектр аэрозоля описывается функцией $f(r) = dn/dr$, где dn — счетная концентрация частиц, размеры которых заключены в интервале от r до $r+dr$. Эмпирический спектр представляется конечным набором чисел, которые могут быть или параметрами некоторой теоретической модели спектра, или координатами f_i линейного разложения спектра по априорным элементарным спектрам $f^i(r)$:

$$f(r) = \sum_i f_i f^i(r). \quad (1)$$

Обозначим нормы элементарных спектров через F^i :

$$F^i = \int f^i(r) dr. \quad (2)$$

Известная фракционная модель гранулометрического спектра соответствует модели (I) при условии непересекающихся элементарных спектров, например, монодисперсных элементарных спектров. При этом произведения $F^i f_i$ называются фракционными концентрациями частиц. В общем случае можно говорить о распределении частиц на группы со спектрами $f^i(r)$ и рассматривать f_i как интенсивности спектральных групп. Пример использования пересекающихся элементарных спектров можно найти в работе [1], где предлагаются такие элементарные спектры, что функции $r^3 f^i(r)$ изображаются треугольниками на шкале $1/r$. Это соответствует аппроксимации спектра кусочно-линейной функцией на шкале $1/r$.

Электрический гранулометр аэрозолей состоит из входного устройства с зарядником частиц и анализатора электрических подвижностей частиц, который выдает измерительную информацию в виде некоторого конечного набора канальных сигналов y_j . Допустим, что эти сигналы линейно зависят от интенсивностей спектральных групп:

$$y_i = \sum_j H_{ji} f_j. \quad (3)$$

Уравнение (3) называется аппаратным и таблица коэффициентов H_{ji} — аппаратной матрицей гранулометра. Процесс определения элементов аппаратной матрицы называется калибровкой прибора, процесс определения канальных сигналов — измерением, а процесс определения интенсивностей спектральных групп путем решения аппаратного уравнения — обработкой наблюдений или проявлением спектра.

2. Задача калибровки

Способ теоретического вычисления элементов аппаратной матрицы описан в работах [1, 2]. При этом должны быть известны вероятность $p_j(\tau)$ заряда q_e на частице с размером τ и вероятность прохождения частицы через входное устройство и зарядник гранулометра. Если эти вероятности известны, то электрический гранулометр аэрозолей может быть рассмотрен как абсолютный измерительный прибор, не требующий прямой эмпирической калибровки.

На практике функция зарядки частиц $p_j(\tau)$ достаточно точно известна только в случае равновесной биполярной зарядки частиц. Это дает приборам с равновесной биполярной зарядкой определенное преимущество [3]. Однако такие приборы намного уступают в чувствительности приборам с принудительной униполярной зарядкой частиц. Затрачено много усилий и достигнут некоторый успех в создании основ теоретического вычисления функции для униполярной зарядки. К сожалению, это не решает задачу калибровки гранулометра аэрозолей. Условия зарядки в эффективных униполярных зарядниках существенно неоднородны и мы не располагаем достаточно точными методами для определения распределения полей в реальном заряднике. Теоретические расчеты полезны в стадии проектирования аппаратуры, но не обеспечивают необходимой при калибровке точности. Поэтому электрический гранулометр аэрозолей с униполярной зарядкой частиц рассматривается как относительный измерительный прибор, требующий эмпирической калибровки.

Теоретически простейший метод калибровки гранулометра осуществляется при условии использования тест-аэрозолей, спектры которых пропорциональны изолированным элементарным спектрам разложения (I). Тогда элемент аппаратной матрицы H_{ji} непосредственно измеряется как сигнал j -того канала в

случае i -того изолированного элементарного спектра. Теоретически простейший метод оказывается практически сложным из-за трудностей генерирования и аттестирования тест-аэрозолей для диапазона размеров, охватываемого электрическим гранулометром. Проблема калибровки стала основной проблемой, от которой зависит практический успех метода электрической гранулометрии аэрозолей.

3. Процедура калибровки

Для калибровки гранулометра по предлагаемой методике необходимо, чтобы:

1. Коэффициенты осаждения частиц каждой группы в анализаторе η_i были определены независимо от описываемой процедуры калибровки. Соответствующая методика в настоящей статье не рассматривается. Эти коэффициенты не достигают единицы потому, что некоторые частицы осаждаются уже во входном устройстве и заряднике или проходят через анализатор без осаждения.

2. Осажденные в анализаторе частицы прилипали к электродам и могли быть измерены при помощи электронного или оптического микроскопа отдельно по измерительным каналам. Это возможно только в случае анализатора с пространственно разделенными каналами.

3. Электрические подвижности частиц, осаждающихся в каждом измерительном канале, были бы заключены в ограниченные интервалы и их средние значения k_j^* были известны. Это требование легко выполняется в случае дифференциального анализатора подвижностей второго порядка.

Условия 2 и 3 выполнены в случае гранулометра со структурой, описанной в работе [4]. В приборах [3] и [5] каналы разделены по времени и второе условие не выполнено. В случае прибора [6] не выполнено третье условие.

При калибровке через гранулометр протягиваются полидисперсные аэрозоли с приблизительно сферическими частицами, размеры которых покрывают весь диапазон, подлежащий калибровке. Точное распределение частиц по размеру может быть неизвестно. Всю необходимую информацию дает микроскопический анализ осадка, накопленного на канальных электродах. Регистрирование канальных сигналов не обязательно, однако полезно, поскольку оно позволяет осуществить дополнительную проверку всей процедуры калибровки. Эксперимент можно провести так, что через гранулометр протягивается аэрозоль, который покрыв-

вает весь диапазон размеров, а также другим способом, когда вначале протягивается аэрозоль, покрывающий один субинтервал спектра размеров, затем аэрозоль, покрывающий другой субинтервал и т.д.

4. Предварительный анализ

В стадии предварительного анализа калибровочных наблюдений измеряются размеры частиц, накопленных на электродах разных каналов, и на основе первичной таблицы размеров вычисляются спектры размеров частиц по каналам. Канальные спектры описываются функциями $f_j(r) = dn_j/dr$, где dn_j число частиц на электроде j -того канала в диапазоне размеров от r до $r+dr$. Эти функции могут быть аппроксимированы разложениями по элементарным спектрам принятой модели спектра:

$$f_j(r) = \sum_i f_{ji} f^i(r). \quad (4)$$

Информация, которая представляется таблицей коэффициентов f_{ji} , достаточна для калибровки гранулометра.

Для разложения канальных спектров на суммы элементарных спектров можно использовать разные известные статистические методы. В случае непересекающихся элементарных спектров простейшую оценку коэффициентов f_{ji} дает количество частиц, входящих в поддиапазоны размеров разных фракций. В усложненной ситуации можно вначале составить для каждого канала таблицу эмпирического кумулятивного распределения частиц по размеру, а затем разложить кумулятивные разложения по элементарным кумулятивным спектрам, которые определены как интегралы дифференциальных элементарных спектров.

5. Вычисление аппаратной матрицы

Число частиц i -той группы, входящих в гранулометр за время t , равно $F^i f_i \Phi t$, где Φ — расход аэрозоля и числа f_i описывают усредненный по времени спектр. В анализаторе задерживается $\eta_i F^i f_i \Phi t$ частиц i -той группы. Эти частицы подсчитываются при анализе осадка на электродах, число частиц i -той группы на электроде l -того канала равно $F^i f_{li}$. Число частиц i -той группы на всех электродах $F^i \sum_l f_{li}$ должно быть равно числу задержанных в анализаторе частиц.

Отсюда найдем, что

$$f_i = \sum_{\ell} f_{\ell i} / (\eta_i \Phi t). \quad (5)$$

Частицы i -той группы передают в j -тый канал заряд $F^i f_{ji} \gamma_{ji} e$, где γ_{ji} - среднее число элементарных зарядов на частицы i -той группы, осаждающейся на электрод j -того канала. Это число с достаточной точностью вычисляется по отношению средней подвижности канала к средней подвижности k_i частиц i -той группы, несущих ровно один элементарный заряд - $\gamma_{ji} = k_j^* / k_i$. Подвижности k_i вычисляются с помощью формулы Стокса-Милликена. Средняя сила электрического тока частиц i -той группы в j -том канале должна быть $I_{ji} = F^i f_{ji} \cdot (k_j^* / k_i) e / t$. Соответствующая составляющая сигнала гранулометра $y_{ji} = \xi_j I_{ji}$. Канальные чувствительности ξ_j определяются просто и рассматриваются как известные величины. Элемент аппаратной матрицы по определению равен составляющей сигнала j -того канала, которая вызывается аэрозолем со спектром $f(\nu) = f^i(\nu)$. Следовательно, $H_{ji} = y_{ji} / f_i$. Используя полученные результаты, найдем:

$$H_{ji} = e \Phi \xi_j \eta_i F^i f_{ji} k_j^* / (k_i \sum_{\ell} f_{\ell i}). \quad (6)$$

Вычисленная по формуле (6) оценка аппаратной матрицы может быть сглажена использованием дополнительной информации, полученной из других источников. Например, если известна некоторая теоретически обоснованная параметрическая модель аппаратной матрицы, то можно определить параметры этой модели так, чтобы получить наилучшую аппроксимацию результатов эмпирической калибровки.

6. Проверка процедуры калибровки

При вычислении аппаратной матрицы по формуле (6) канальные сигналы y_j не используются. Если эти сигналы известны, то можно осуществить проверку процедуры калибровки, учитывая также дополнительное сглаживание аппаратной матрицы. Для этого надо вычислить по формуле (5) оценки интенсивностей групп и затем по формуле (3) ожидаемые канальные сигналы, используя при этом значения H_{ji} , полученные в результате калибровки. Сравнение ожидаемых сигналов с непосредственно

Измеренными сигналами позволяет оценить суммарное действие некоторых факторов, которые не были учтены в вышеизложенной теоретической схеме.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. Кусочно-линейная модель спектра в аэроионных и аэрозольных измерениях. - Учен. зап. Тартуск. гос. ун-та, вып. 534. Тарту, 1980, с. 45-54.
2. Таммет Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Учен. зап. Тартуск. гос. ун-та, вып. 348. Тарту, 1975, с. 30-34.
3. Knutson, E.O. Extended electric mobility method for measuring aerosol particle size and concentration. - In: Fine particles. New York, San Francisco, London, Academic Press, Inc., 1976, p. 739-762.
4. Мирме А.А., Тамм Э.И. Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - Учен. зап. Тартуск. гос. ун-та, вып. 588. Тарту, 1981, с. 84-92.
5. Liu, B.Y.H., Pui, D.Y.H. On the performance of the electrical aerosol analyzer. - J. Aerosol Sci., 1975, vol. 6, p. 249 - 264.
6. Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф., Салым Я.И. Многоканальный автоматический спектрометр аэроионов. - Учен. зап. Тартуск. гос. ун-та, вып. 320. Тарту, 1973, с. 48-75.

CALIBRATION OF AN ELECTRICAL AEROSOL GRANULOMETER USING THE DISTRIBUTION OF COLLECTED PARTICLES

H. Tammet

S u m m a r y

A method has been developed for the calibration of an electrical aerosol granulometer equipped with a second-order differential parallel-multi-channel mobility analyzer [4]. The aerosol particle size spectrum is described by means of the spectral intensities f_i according to formula (1), where $f^i(r)$ are elementary spectra. The elementary spectra may be interpreted as unit spectra of particle size groups. The li-

near dependence of the mobility analyzer channel signals y_j on the spectral intensities is proposed (formula 3) and calibration is treated as determination of the apparatus matrix H . A polydisperse aerosol is used in the calibration procedure. The particles collected on the channel electrodes of the mobility analyzer must be measured by using an electron or an optical microscope. The channel particle size distributions $f_j(r)$ and the coefficients f_{ji} of the sum (4) must be established in the initial stage of data handling. The apparatus matrix may be calculated using formula (6), where Φ is the aerosol flow rate, $\xi_j = y_j/I_j$ - channel sensitivities, η_i - total particle collecting coefficients, F_i - norms of elementary spectra (formula 2), k_j^* - average mobilities for the channels of the analyzer, and k_i - average mobilities of single elementary-charge particles for particle size groups. The coefficients η_i must be determined independently of the calibration procedure described.