

К ПРОБЛЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АЭРОЗОЛЕЙ

Х. Ф. ТАММЕТ, А. А. МИРМЕ, Э. И. ТАММ

1. Введение

Электрический анализ дисперсного состава аэрозолей нашел признание как один из основных методов изучения мелкодисперсных аэрозолей. Наибольшие заслуги в этом имеет лаборатория аэрозольной технологии университета штата Миннесота, где разработаны принципы приборов, выпускаемых фирмой «Термо-системс». Основные теоретические и методические концепции упомянутой лаборатории изложены в [12—15].

Несмотря на многочисленные публикации и практический успех, признается, что теория и методика электрического анализа аэрозолей далеко не завершены и в известных приборах не реализованы все принципиальные возможности метода. Отметим некоторые недостатки известной теории и методики:

- отсутствует методика оценки ошибок измерения,
- теория зарядки аэрозольных частиц неполная и неточная,
- разрешающая способность и быстродействие приборов не удовлетворительны.

В Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей Тартуского университета выполнен цикл исследований, направленных на развитие метода электрического анализа аэрозолей [3, 7, 10]. Мы выражаем благодарность Институту экспериментальной метеорологии за существенную помощь в этой работе. Ниже излагаются некоторые выводы из наших исследований в теоретическом и практическом аспектах электрического анализа аэрозолей.

2. Основные математические модели

2.1. Общие уравнения спектрометра

Распределение аэрозольных частиц по размеру, т. е. аэрозольный спектр, математически может быть представлено по-разному. Мы используем общее обозначение $\varphi(x)$ для функции, с помощью

которого описывается интересующий нас спектр. Аргумент этой функции определяется размером частиц. Непосредственным результатом измерения является выходной сигнал прибора ψ , зависящий от некоторого регулируемого параметра y . Функция $\psi(y)$ называется записью спектрометра. Обозначим запись спектрометра в случае единичного дискретного спектра $\varphi(x) = \delta(x - x_0)$ через $H(y, x_0)$. Функция H описывает спектрометр и является его аппаратной функцией. Если спектрометр удовлетворяет принципу суперпозиции, то в случае произвольного спектра

$$\psi(y) = \int H(y, x) \varphi(x) dx. \quad (1)$$

Это выражение — основное уравнение для спектрометра в непрерывной математической модели. Оно оказывается некорректно поставленным в смысле Адамара интегральным уравнением Фредгольма первого рода.

Реальная запись спектрометра содержит конечное число отсчетов прибора. Эти отсчеты могут быть рассмотрены как координаты m -мерного вектора записи $\psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m\}$. Отдельные значения ψ_j называются канальными сигналами, индексы j — номерами каналов в случае параллельного и последовательного измерения. Графический способ регистрирования не противоречит сказанному: графическое изображение перед обработкой наблюдений расчленяется на множество отдельных точек.

По конечному множеству данных нельзя вычислить бесконечное множество значений спектральной функции. Поэтому в реальной ситуации приходится и спектр описывать с помощью конечномерного вектора $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$. Если не учитывать ошибок измерения, то уравнение спектрометра записывается следующим образом:

$$\psi_j = \sum_{i=1}^n H_{ji} \varphi_i, \quad (2)$$

или в матричном виде

$$\psi = H \varphi. \quad (3)$$

Это — основное уравнение спектрометра в конечномерной математической модели. Матрица H состоит из $m \times n$ элементов H_{ji} и называется аппаратной матрицей спектрометра.

Непрерывная математическая модель (1) незаменима при теоретических рассуждениях, а конечномерная математическая модель (3) — при практической обработке наблюдений. Обычно от уравнения (1) переходят к уравнению (3) с помощью методов численного интегрирования. При этом значения φ_i лишены прямого физического смысла, что затрудняет использование предварительных знаний о структуре спектра и усложняет интерпретацию результатов.

Естественный способ перехода от непрерывной к конечномерной модели состоит в определении некоторого набора непрерывных элементарных спектров $\varphi^1(x), \varphi^2(x), \dots, \varphi^n(x)$. Действитель-

ный спектр рассматривается как взвешенная суперпозиция элементарных спектров:

$$\varphi(x) = \sum_i \varphi_i \varphi^i(x). \quad (4)$$

Весы φ_i рассматриваются как координаты конечномерного спектра. Путем подстановки выражения (4) в уравнение (1) и сравнения результата с уравнением (2) при условии $\psi_j = \psi(y_j)$ получим уравнение для вычисления элементов аппаратной матрицы:

$$H_{ji} = \int H(y_k, x) \varphi^i(x) dx. \quad (5)$$

2.2. Кусочно-линейная модель спектра

Если элементарные спектры выражаются треугольными функциями, то получим кусочно-линейную аппроксимацию спектра (рис. 1). Точки x_0, x_1, \dots, x_{n+1} называются узлами спектра. Коэффициенты разложения (4) или координаты вектора спектра равны значениям спектральной функции в узлах. Из этого следует, что свойство неотрицательности функции $\varphi(x)$ равносильно свойству неотрицательности координат конечномерного спектра.

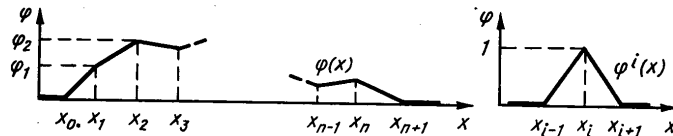


Рис. 1. Кусочно-линейный спектр и треугольный элементарный спектр

Функция распределения счетной концентрации аэрозольных частиц по размеру $f(r) = dN/dr$ в широком диапазоне размеров весьма неравномерна и плохо аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Определим вспомогательную функцию $\varphi(r) = r^3 f(r)$, которая пропорциональна распределению объема частиц, и вспомогательную переменную $x = 1/r$. Согласно Юнге для грубой фракции атмосферного аэрозоля $f(r) \sim r^{-4}$, откуда $\varphi \sim x$. Поэтому можно допустить $\varphi_{x=0} = 0$ и построить кусочно-линейное по шкале x приближение для спектра φ . Если $b = a + 1$, то между узлами x_a и x_b :

$$\varphi(r) = [(1 - r_b/r) r_a \varphi_a + (r_a/r - 1) r_b \varphi_b] / (r_a - r_b), \quad (6)$$

где

$$r_a = 1/x_a, \quad r_b = 1/x_b, \quad \varphi_a = \varphi(r_a), \quad \varphi_b = \varphi(r_b).$$

Если известны φ_i , то легко перейти к традиционному представлению спектра частными счетными концентрациями для межузловых интервалов

$$N(r_b, r_a) = \int_{r_b}^{r_a} \frac{\varphi(r)}{r^3} dr = \frac{r_a - r_b}{6 r_a^2 r_b^2} [(r_a + 2r_b) \varphi_a + (2r_a + r_b) \varphi_b]. \quad (7)$$

2.3. Аппаратная матрица

Для теоретического вычисления аппаратной матрицы необходимо знать конкретные выражения двух специальных функций: $P_\gamma(r)$ выражает вероятность заряда γe на частице и $k_\gamma(r)$ — электрическую подвижность частицы размером r и зарядом γe . Символ e обозначает элементарный заряд. Рассмотрим интервал размеров $(r, r + dr)$. Счетная концентрация всех частиц этого интервала $f(r) dr$, а счетная концентрация частиц с зарядом γe будет $P_\gamma(r) f(r) dr$. Эти частицы несут объемный заряд со средней плотностью $\rho^\gamma(k_\gamma) dk_\gamma = \gamma e P_\gamma(r) f(r) dr$, где значения k_γ и dk_γ зависят от r и dr согласно функции $k_\gamma(r)$. Все частицы с зарядом γe обуславливают следующую составляющую записи спектрометра:

$$\psi^\gamma(y) = \int G(y, k_\gamma) \rho^\gamma(k_\gamma) dk_\gamma = \gamma e \int G(y, k_\gamma(r)) P_\gamma(r) f(r) dr, \quad (8)$$

где G — аппаратная функция спектрометра подвижностей аэроионов.

Общее выражение аппаратной функции аспирационного спектрометра аэроионов можно найти в [6].

Суммирование уравнения (8) по γ дает выражение записи спектрометра

$$\psi(y) = \int [e \sum_\gamma \gamma P_\gamma(r) G(y, k_\gamma(r))] f(r) dr. \quad (9)$$

Квадратные скобки в выражении (9) стоят на месте аппаратной функции спектрометра для измерения спектра $f(r)$. Необходимые при обработке наблюдений элементы аппаратной матрицы вычисляются, согласно формуле (5), следующим образом:

$$H_{ji} = e \int \left(\sum_\gamma \gamma P_\gamma(r) G(y_j, k_\gamma(r)) \right) \varphi^i(r) r^{-3} dr. \quad (10)$$

Если конкретное выражение функции $P_\gamma(r)$ неизвестно, то аппаратная матрица не может быть определена только путем теоретического расчета. Для определения аппаратной матрицы с помощью экспериментальной калибровочной процедуры необходимо иметь набор тест-аэрозолей, спектры которых заранее известны. Для непосредственного измерения элементов аппаратной матрицы необходимы тест-аэрозоли, спектры которых равны отдельным элементарным спектрам. Обычно такой возможности нет и приходится прибегать к косвенному измерению. При этом целесообразно составить теоретическую модель аппаратной функции, которая содержит некоторые параметры, не определяемые путем теоретического расчета. Такими параметрами могут быть, например, параметры функции $P_\gamma(r)$. Если мы имеем несколько записей спектрометра для разных тест-аэрозолей, то можем записать несколько уравнений, в которых неизвестны только неопределенные пара-

метры аппаратной функции. После решения этих уравнений аппаратная функция будет полностью определена и элементы аппаратной матрицы могут быть вычислены по формуле (5).

2.4. Обработка наблюдений

В теории обработки наблюдений необходимо учитывать ошибки измерения или аппаратный шум, который описывается вектором $\Delta = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m\}$, состоящим из канальных шумов. При учете ошибок измерения в уравнение спектрометра (3) включается дополнительное слагаемое

$$\psi = H_\varphi + \Delta. \quad (11)$$

Поскольку шум неизвестен, уравнение (11) алгебраически не решается. Однако, если статистическое распределение аппаратного шума заранее известно, то возможно оценить правдоподобное значение спектра с помощью методов математической статистики. Распределение шума может быть предварительно экспериментально изучено методом повторных измерений одного и того же спектра, а в случае аддитивного шума — методом анализа записей нулевых спектров.

Предположим, что ошибки Δ распределены по многомерному нормальному закону с нулевым средним значением и ковариационной матрицей D . На главной диагонали этой матрицы стоят дисперсии ошибок отдельных координат записи. Известно, что в таких условиях наиболее правдоподобную оценку спектра обеспечит алгоритм метода наименьших квадратов Гаусса—Маркова:

$$\begin{aligned} C &= (H^T D^{-1} H)^{-1}, \\ \hat{\varphi} &= C H^T D^{-1} \psi. \end{aligned} \quad (12)$$

Поскольку алгоритм (12) описывает линейное преобразование записи в оценку спектра, то оценка спектра $\hat{\varphi}$ распределена в ансамбле повторных измерений также по нормальному закону, причем ковариационная матрица оценки равна C . Таким образом, алгоритм (12) одновременно решает задачу оценки спектра и оценки ошибок измерения спектра.

Ошибки измерения спектра зависят не только от аппаратного шума, но и от структуры аппаратной матрицы. Если эта матрица плохо обусловлена, то ошибки измерения спектра будут большие и в случае малого аппаратного шума. Простейший и обычно также наилучший способ ограничения эффекта «усиления» шума в процессе обработки наблюдений состоит в улучшении структуры аппаратной матрицы путем ограничения числа элементарных спектров и оптимизации системы узлов математической модели спектра. При практическом выполнении этой рекомендации умест-

но использовать метод математического эксперимента на ЭВМ, лучше всего осуществить поиск числа и системы узлов элементарных спектров в режиме диалога с ЭВМ.

Взаимосвязь проблемы ограничения ошибок измерения спектра с известной задачей регуляризации некорректно поставленных уравнений рассматривается в [5], где описаны также способы использования предварительной информации о спектре и разные алгоритмы обработки наблюдений.

Обработка наблюдений существенно упрощается при условии постоянных параметров аппаратного шума. Тогда можно заранее вычислить матрицу

$$K = (H D^{-1} H)^{-1} H^T D^{-1} \quad (13)$$

и оценить спектр по алгоритму

$$\hat{\varphi} = K \psi. \quad (14)$$

Последний алгоритм может быть реализован также с помощью простого аналогового вычислительного устройства.

3. Зарядка аэрозольных частиц

3.1. Физика процесса зарядки аэрозольных частиц легкими аэроионами

Для электрического измерения спектра аэрозольных частиц их необходимо зарядить в определенных условиях так, чтобы приобретаемая частицей электрическая подвижность \bar{k} однозначно определялась ее линейным размером, например радиусом (функциональная зарядка [10]). В силу стохастического характера процесса зарядки функциональную зарядку можно реализовать только приближенно. Тогда функцией радиуса оказывается среднее значение подвижности \bar{k} частиц фиксированного радиуса. При этом разрешающая способность спектрометра тем лучше, чем более крутой является функция $\bar{k} = \bar{k}(r)$.

В известных электрических спектрометрах частицы заряжают легкими аэроионами, получаемыми, как правило, в коронном разряде с проволоки или острия. Ионы попадают на аэрозольную частицу, находящуюся в ионизированном газе, за счет их теплового движения и за счет движения их по силовым линиям электрического поля, пересекающим частицу. Оба указанных механизма зарядки всегда действуют одновременно. В случае преобладания одного из них процесс зарядки называется преимущественно диффузионным (слабое поле) или преимущественно ударным (сильное поле).

Заряд, приобретаемый частицей определенного радиуса r за время t_q , определяется проводимостью воздуха λ и напряженностью электрического поля E в месте расположения частицы

[1, 2]. В случае прохождения частицы через некоторую зону зарядки, когда как λ , так и E могут не быть постоянными на траектории частицы, вводится понятие средней напряженности поля \bar{E} , а действие проводимости целесообразно описывать через параметр зарядки [7]:

$$\alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{t_q} \lambda dt, \quad (15)$$

где ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость газовой среды.

Общая теория зарядки частиц легкими аэроионами громоздка, общее уравнение зарядки решается только численно [2]. Простые решения получены для идеализированных предельных случаев чисто диффузионной и чисто ударной зарядки. Г. З. Мирзабекяном показано [2], что с точностью не хуже 20% заряд частицы можно получить суммированием зарядов, вычисленных для обоих названных предельных случаев. Некоторые результаты вычислений по этой модели Мирзабекяна, взятые из [7], приведены на рис. 2. Здесь относительная диэлектрическая проницаемость вещества частиц взята равной 4 (от нее зависит процесс ударной зарядки), а подвижность частиц рассчитана по известной формуле Милликена для температуры среды

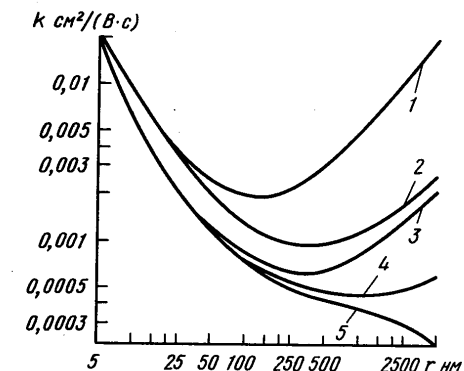


Рис. 2. Зависимость подвижности частиц от их радиуса и параметров зарядки по модели Мирзабекяна:

1 — $\alpha = 300$, $\beta = 30$ см/с, $E = 4500$ В/см; 2 — $\alpha = 300$, $\beta = 3$ см/с, $E = 450$ В/см; 3 — $\alpha = 30$, $\beta = 30$ см/с, $E = 450$ В/см; 4 — $\alpha = 30$, $\beta = 3$ см/с, $E = 45$ В/см; 5 — $\alpha = 30$, $\beta = 3$ см/с, $E = 45$ В/см; параметры вспомогательного зарядника — $\alpha' = 0,1$, $E = 4000$ В/см

18°C и давления 1000 мбар. Кривым соответствуют значения параметра α и напряженности поля E . Смысл параметра β , а также сущность нижней кривой получают объяснение ниже.

Кривые на рис. 2 имеют минимум; соответствующий радиус частицы r_k является критическим для данных условий зарядки. В этой точке производная функции $\bar{k} = \bar{k}(r)$ равна нулю, электрический спектрометр частиц вблизи r_k теряет разрешающую способность. Введенный в [10] критерий качества аналитической зарядки $\xi = \frac{r}{\sigma_r}$, где σ_r — стандартное отклонение радиусов частиц фиксированной подвижности, при критическом радиусе приближается к нулю.

Из рис. 2 также видно, почему к настоящему времени удалось реализовать электрическую спектрометрию только отдельно для

мелких и крупных частиц. При этом мелкие частицы полезно заряжать в преимущественно диффузионном режиме, а крупные — в преимущественно ударном режиме.

3.2. Зарядник электрического спектрометра аэрозолей

В электрическом спектрометре частиц, как правило, применяется трансверсальный зарядник, в котором потоки аэрозоля и ионов направлены перпендикулярно друг другу. В качестве выхода зарядника используется некоторый слой аэрозоля с ограниченной толщиной h (зона зарядки). Схематический разрез трансверсального зарядника изображен на рис. 3. За счет электростатического рассеивания концентрация ионов, а тем самым и проводимость

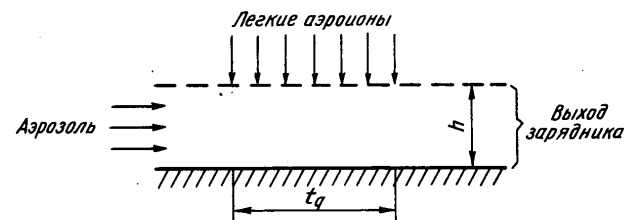


Рис. 3. Продольный разрез трансверсального зарядника

среды уменьшаются в направлении от источника ионов. Это создает неоднородность условий зарядки в таком заряднике. Степень неоднородности можно характеризовать параметром [7]:

$$\theta = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\sqrt{\alpha_{\max} \alpha_{\min}}} = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \quad (16)$$

При предположении, что концентрацию ионов у поверхности коронирующего электрода можно считать бесконечной, закон электростатического рассеивания ионов можно написать в виде

$$\lambda = \frac{\epsilon_0}{t}, \quad (17)$$

где t — возраст иона.

Определив через среднюю скорость ионов среднюю напряженность электрического поля \bar{E} в зоне зарядки

$$\frac{h}{\Delta t} = \bar{E} k_0,$$

(k_0 — подвижность ионов, Δt — время прохождения ионов через зону зарядки), получим

$$\theta = \frac{\Delta t}{t} = \frac{h}{\bar{E} t_q} \frac{\bar{\alpha}}{k_0} \quad (18)$$

Здесь значение λ принято постоянным на траектории частицы, тогда из (15) и (17) получится $\alpha = t_q / \lambda$.

Из (18) видно, что для уменьшения неоднородности условий зарядки необходимо увеличить \bar{E} или t_q либо уменьшить h и α . Увеличение E и уменьшение α означают повышение роли ударной зарядки. Для характеристики роли этого процесса в заряднике целесообразно ввести параметр зарядника [7]:

$$\beta = \frac{h}{\theta t_q} = \frac{1}{\alpha} \bar{E} k_c. \quad (19)$$

Значения этого параметра приписаны к кривым на рис. 2. Величина β пропорциональна средней скорости ионов в зоне зарядки и имеет размерность скорости.

Так как подвижность частицы при обоих механизмах зарядки зависит нелинейно от параметра α , то относительный разброс подвижностей частиц фиксированного радиуса всегда существенно меньше θ .

Уменьшению неоднородности условий зарядки способствуют развитый профиль скоростей течения аэрозоля в зоне зарядки и явление продольного расширения потока аэроионов в направлении от источника ионов. Первый эффект проявляется при существовании длинного входного канала для аэрозоля, а второй — в относительно коротком заряднике.

Неоднородность зарядки можно использовать как полезный эффект, если расположить зарядник и измерительный конденсатор (анализатор подвижностей) соосно один за другим. Если теперь частицы, входящие в анализатор дальше от собирающей обкладки, имеют большую подвижность, чем частицы, входящие ближе к этой обкладке, то это уменьшает рассеивание мест осаждения частиц на собирающей обкладке. Это позволяет использовать большее отношение расходов аэрозоля и чистого воздуха в анализаторе, т. е. повышать чувствительность прибора без ухудшения разрешающей способности.

4. Электрический спектрометр аэрозоля с широким пределом измерения

4.1. Пути расширения диапазона измеряемых размеров

Единственным способом создания широкодиапазонного электрического спектрометра аэрозоля является параллельное использование режимов преимущественно диффузионной и преимущественно ударной зарядки. Технически это можно сделать тремя следующими способами.

1. Попеременное включение зарядника в один и другой режим зарядки.

2. Последовательное расположение основного зарядника, работающего в преимущественно диффузионном режиме (D -зарядни-

ка) и вспомогательного зарядника, работающего преимущественно в ударном режиме (E -зарядника) с противоположной по сравнению с основным зарядником полярностью. Это можно назвать методом компенсационной зарядки [7]. Недостатком метода является малая подвижность крупных частиц и требование высокой стабильности зарядников. Нижняя кривая на рис. 2 иллюстрирует возможности метода компенсационной зарядки; параметры вспомогательного зарядника обозначены символами со штрихом.

3. Параллельное использование двух анализаторов подвижностей с зарядниками в различных режимах зарядки. Ниже приводится краткое описание прибора, в котором использован этот способ.

4.2. Принципы работы широкодиапазонного электрического спектрометра аэрозоля

Всякий электрический спектрометр аэрозоля содержит три основных функциональных узла: зарядник частиц, анализатор подвижностей для измерения спектра частиц по подвижностям и вычислительное устройство для расчета спектра по размерам.

В данном варианте используются два зарядника в различных режимах зарядки. Из рис. 2 видно, что в E -заряднике мелкие частицы приобретают такую же подвижность, как и крупные. Это создает в анализаторе ложный сигнал, который в данном приборе удается исключить на стадии обработки информации, используя показания анализатора с D -зарядником.

Во всех известных электрических спектрометрах аэрозоля анализатором подвижностей является аспирационный измерительный конденсатор. Лучшую разрешающую способность имеют дифференциальные конденсаторы второго порядка [4], в которых аэрозоль входит только через часть входного отверстия, через остальную часть входит неактивный воздух, а регистрации подлежат частицы, дошедшие до некоторого малого отрезка собирающей обкладки конденсатора.

Для измерения всего спектра подвижностей можно применить сканирование напряжением u на измерительном конденсаторе. Ввиду конечной разрешающей способности всякий спектральный прибор способен выдавать спектр только в виде набора конечного числа фракций, поэтому u следует изменить ступенчато. В таком процессе измерения каждую фракцию измеряют в различное время, что может привести в случае развивающихся аэрозольных систем и при существовании временных и пространственных флуктуаций концентрации частиц к существенным ошибкам. В данном спектрометре применены многоканальные (секционированные) измерительные конденсаторы [11], позволяющие измерить все фракции спектра одновременно.

Для регистрации частиц применен метод измерения тока, переносимого осаждающимися частицами на каждую секцию измерительных конденсаторов, как самый удобный в случае заряженных частиц. Во избежание существенных помех, причиняемых электро-

метрическим коммутатором [11], каждая секция имеет свой электрометр.

Для устранения влияния дрейфа нуля электрометров и подавления и оценки аддитивных шумов применяется модуляционный метод измерения с синхронным детектированием сигнала. Сигнал модулируется переключением полярности зарядника — частицы обратной полярности не осаждаются на измерительных обкладках конденсатора. Синхронное детектирование осуществляется лишь на стадии обработки данных [7]. Период модуляции выбирается в пределах от 20 с до 2 мин.

В зарядниках заряжающиеся частицы испытывают дрейф под влиянием электрического поля, и спектр частиц аэрозоля, проходящего ближе к источнику ионов зарядника, искажается. В данном спектрометре часть аэрозоля с искаженным спектром отсасывается, не попадая в анализатор подвижностей. В роли чистого (неактивного) используется воздух, прошедший сам измерительный конденсатор как электрофильтр.

4.3. Зарядники

На рис. 4 *E*-зарядник показан вместе с анализатором и с системой аспирации воздуха, а *D*-зарядник — отдельно в кружке. Источником ионов является коронирующее острие 1 (1') в виде платиновой проволоки диаметром 0,025 мм. Зона зарядки частиц в *E*-заряднике образуется кожухом 2 зарядника, в котором имеется щель для выхода ионов, и цилиндрическим токоизмерительным электродом 3. Подацией напряжения на кожух 2 в зоне зарядки создается электрическое поле с напряженностью порядка 5 кВ/см, обеспечивающее необходимое условие преимущественно ударной зарядки и высокую степень однородности параметра зарядки α на всей ширине зоны зарядки. Среднее значение этого параметра регулируется значением напряжения на коронирующем острие; оно выбрано порядка 2,5.

В *D*-заряднике требуется большое значение параметра зарядки ($\alpha \sim 30$), а для увеличения значения критического диаметра (рис. 2) напряженность поля должна быть минимальна. Этим требованиям отвечает зарядник открытой конструкции, с кожухом (2') без крышки. Расчет параметров такого зарядника выполняется весьма приближенно, поэтому напряжение на коронирующем острие, обеспечивающее необходимое значение параметра α , выбирается экспериментально в ходе испытания спектрометра по результатам измерения эталонных монодисперсных аэрозолей.

Токоизмерительные электроды 3 (3') служат стенками зоны зарядки и коллекторами сигнала обратной связи для стабилизации коронного тока.

4.4. Анализаторы подвижности

Способ разделения интервала измерения электрического спектрометра на размерные фракции заимствован у Уитби [15]. Промежуток радиусов частиц от 5 нм до 5 мкм разделяется логариф-

мически равномерно на 12 фракций, множитель деления равен $\sqrt[4]{10}$. Для повышения надежности прибора суммарное число каналов анализаторов выбрано примерно вдвое больше (26 шт).

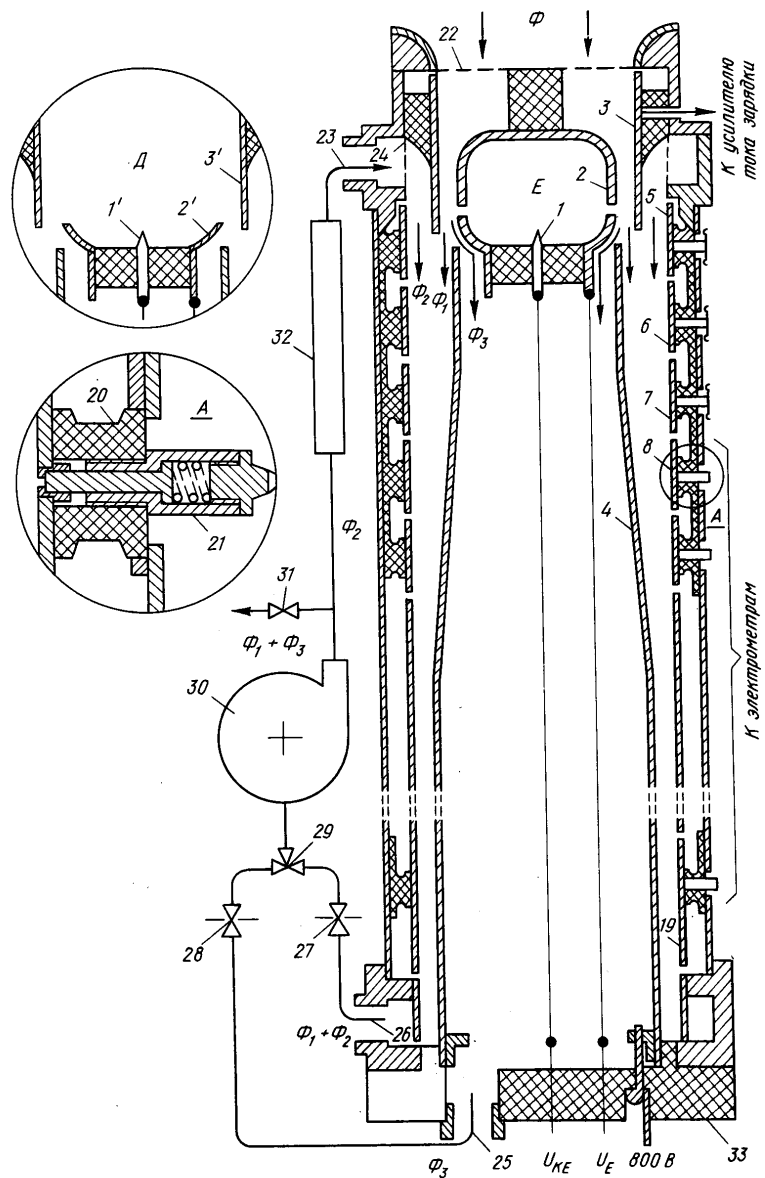


Рис. 4. Анализатор подвижностей с зарядником и системой аспирации воздуха

Для согласования границ каналов с границами фракций необходимо сделать каждую секцию собирающей обкладки индивидуальной длины. По техническим причинам секции выполнены только двух различных длин (30 и 50 мм), а внутренний электрод сделан переменного диаметра; таким образом достигнута приближенная согласованность упомянутых границ.

Оба измерительных конденсатора одинаковы, содержат внутреннюю отталкивающую обкладку 4 и внешнюю собирающую обкладку из 15 секций 5—19 (рис. 4). Изолятор 20 секций собирающей обкладки (рис. 4, вставка А) отлиты из полипропилена. Токоснимающие устройства 21 служат и пробоотборниками частиц для электронной микроскопии.

Соосным расположением зарядников и анализаторов и выбором внешней обкладки в роли собирающей достигнут фокусирующий эффект [7].

4.5. Система аспирации воздуха

Аэрозоль (расход $\Phi = 400 \text{ см}^3/\text{с}$) входит через защитную экранную сетку 22 в зону зарядки. Половина всего расхода Φ_1 идет в анализатор, вторую половину Φ_2 отсасывают через внутреннюю обкладку 4 и штуцер 25. Неактивный воздух (расход $\Phi_2 = 600 \text{ см}^3/\text{с}$) поступает через кольцеобразный канал 23 и сетку 24 для подавления турбулентности. Воздух из измерительного конденсатора отсасывается через узкую кольцеобразную щель на дне камеры отсоса 26. Все потоки создаются вентилятором 30; расходы устанавливаются выбором отверстий дросселей 27 и 28, распределителем 29 и задвижкой 31. Для фильтрации частиц, попавших в вентилятор из потока Φ_3 , установлен электрофильтр 32.

4.6. Электрическая блок-схема

В состав схемы входят блок управления, измерительный блок, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), электронные часы, перфоратор и может входить аналоговый дисплей. Из них АЦП, перфоратор и часы промышленные. К часам добавлен цифровой выход.

Взаимодействие основных элементов показано на рис. 5.

Схема управления осуществляет общую синхронизацию. По сигналам часов она определяет длительность периода модуляции, вырабатывает сигналы полярности зарядки, включает электрометры, запускает схему записи на перфоленку и управляет дисплеем. Схема записи по сигналу схемы управления сначала выводит на перфорацию признак начала массива, признак полярности зарядки (режима) и текущее время. Одновременно включает через коммутатор каналов выход первого электрометра к АЦП. Процесс записи жестко синхронизирован с работой перфоратора. По окончании записи времени запускается АЦП, его выходной код передается на перфорацию, и через коммутатор включается

второй канал и т. д. К коду сигнала каждого канала добавляется признак состояния схемы защиты соответствующего канала.

После перфорирования сигналов последнего канала схема формирует протяжку перфоленки на 4—6 см и переходит в ожидание следующего запуска от схемы управления.

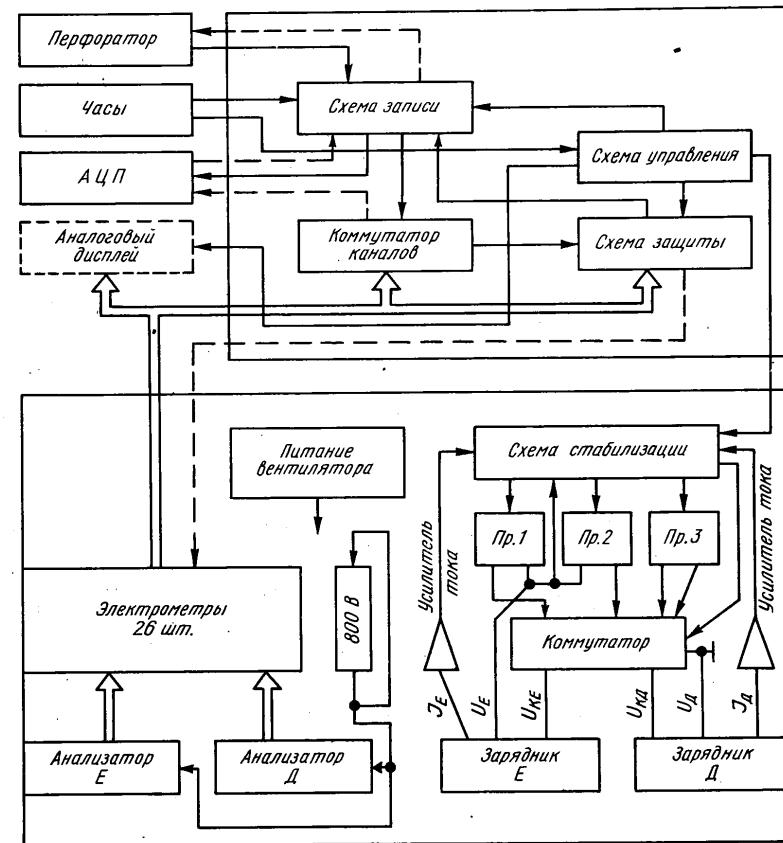


Рис. 5. Электрическая блок-схема спектрометра аэрозолей

Схема защиты служит для сигнализации и аварийного выключения любого из электрометров, если его выходное напряжение превысит заданный уровень (примерно 11 В).

Восстановление нормальной работы производится в моменты переключения полярности зарядки по команде схемы управления.

Зарядники E и D питаются от управляемых преобразователей Пр. 1, 2, 3 через электромеханический коммутатор.

В случае отсутствия сигналов полярности зарядки преобразователи закрыты. При наличии какого-нибудь сигнала полярности соответственно замыкаются цепи обратной связи, коммутатор включается на нужную полярность, и схема стабилизации устанавливает заданный режим зарядки, контролируя в *E*-заряднике напряженность поля и ток зарядки, а в *D*-заряднике — ток зарядки. Источник на 800 В для питания отталкивающих обкладок измерительных конденсаторов должен иметь особую стабильность. Он выполнен также на основе управляемого преобразователя со схемой обратной связи.

Процедуры градуировки и обработки данных, а также результаты исследования надежности, разрешающей способности и т. п. спектрометра будут опубликованы позже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирш А. А., Загнитько А. В. О диффузионной зарядке субмикронных аэрозолей униполярными ионами. — Колл. журнал, 1980, т. 42, вып. 1, с. 131—135.
2. Мирзабекян Г. З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. — В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах. М., Энергия, 1969, с. 20—39.
3. Мирме А. А., Тамм Э. И., Таммет Х. Ф. Гранулометр субмикронного аэрозоля. — В кн.: Методы и приборы контроля параметров окружающей среды. Л., ЛПИ, 1979, с. 64—67.
4. Таммет Х. Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1967, вып. 195, — 234 с.
5. Таммет Х. Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. — Таллин: «Валгус», 1975. — 100 с.
6. Таммет Х. Ф. К теории аспирационного метода спектрометрии подвижностей аэроионов. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1977, вып. 409, с. 89—96.
7. Таммет Х. Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1980, вып. 534, с. 55—79.
8. Таммет Х. Ф. Кусочно-линейная модель спектра в аэроионных и аэрозольных измерениях. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1980, вып. 534, с. 45—54.
9. Таммет Х. Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1975, вып. 348, с. 30—34.
10. Тамм Э. И. О функциональной зарядке аэрозольных частиц. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1975, вып. 348, с. 35—55.
11. Таммет Х. Ф., Якобсон А. Ф., Сальм Я. И. Многоканальный автоматический спектрометр аэроионов. — Учен. зап. Тартуского ун-та, 1973, вып. 320, с. 48—75.
12. Liu B. Y. H., Pui D. Y. H., Karadia A. Electrical aerosol analyser: history, principle, and data reduction. — In: Aerosol Measurement, Gainesville, 1979, p. 341—383.
13. Pui D. Y. H., Liu B. Y. H. Electrical aerosol analyser: Calibration and performance. — In: Aerosol Measurement. Gainesville, 1979, p. 384—399.
14. Sem G. J. Electrical aerosol analyser: operation, maintenance and application. — In: Aerosol Measurement. Gainesville, 1979, p. 400—432.
15. Whitby K. T. Electrical measurements of aerosols. — In: Fine Particles. Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis. New York — San Francisco — London, 1976, p. 581—624.

О ВОССТАНОВЛЕНИИ СПЕКТРА ПОДВИЖНОСТЕЙ АЭРОИОНОВ

П. Н. СВИРКУНОВ, А. В. САВЧЕНКО

В работе рассматривается вопрос восстановления спектров подвижностей аэроионов по результатам измерений с помощью аспирационного электростатического спектрометра, описанного в [3, 4], где приведены данные измерений спектров подвижностей биполярных аэроионов указанным спектрометром.

Усовершенствованный спектрометр [1—3] позволяет производить измерения спектров как биполярно, так и униполярно заряженных частиц по подвижностям в диапазоне $10^{-4} — 4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ и изучить процессы ионной зарядки аэрозольных частиц в униполярно или биполярно ионизированной атмосфере при концентрациях аэроионов $n_{\pm} \leq 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Спектрометр включает в себя воздушный фильтр, ионизатор, селектор ионов по знаку заряда, селектор аэроионов по подвижностям, адсорбционный фильтр ионов, электрометрический усилитель и воздухоподушку.

Воздушный фильтр предназначен для очистки воздуха от аэрозолей при калибровке спектрометра с помощью ионизатора.

Исследуемая облачная среда, минуя фильтр, аспирируется через ионизатор. В ионизаторе смонтированы подложки с источниками альфа-излучения. При измерении спектров в условиях естественной ионизации воздушный фильтр и ионизатор снимаются.

Селектор ионов по знаку заряда представляет собой одиночный сферический электрод, расположенный в диэлектрическом канале на достаточном удалении от стенок и входных отверстий канала [1]. Подавая на сферу потенциал того или иного знака, можно производить селекцию обтекающих сферу биполярных ионов по знаку заряда, формируя тем самым униполярные спектры ионов.

Селекция аэроионов по подвижностям осуществляется с помощью пластинчатого электростатического фильтра Ганна.

Ток прошедших через электрофильтр аэроионов измеряется адсорбционным фильтром Оболенского. Ранее при обработке экспериментальных результатов использовалось выражение, связы-