

В.А. Яшин, Ю.Д. Макашев, В.С. Топорков

ИЗУЧЕНИЕ ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА И КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ АНАЛИЗАТОРАМИ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ТИПА

Исследована проблема совпадения частиц в счетном объеме лазерного времяпролетного анализатора. На примере модельных распределений показано, что совпадение частиц приводит к ошибкам в определении дисперсного состава и концентрации аэрозолей. Показана неоднозначность восстановления параметров исходного аэрозоля при решении обратной задачи. Обсуждены возможности повышения корректности и стабильности измерений.

В практике изучения аэрозолей широкое распространение получили фотоэлектрические счетчики частиц (ФЭСЧ) [1] и лазерные времяпролетные анализаторы (ЛВПА) [2], обладающие рядом достоинств (высокая разрешающая работоспособность, большой диапазон, автоматизация процесса измерения, возможность проводить исследования в реальном масштабе времени). Однако необходимо отметить, что наряду с явными достоинствами существуют и недостатки, один из которых – совпадение частиц в счетном объеме. Проблема совпадения заключается в том, что существует отличная от нуля вероятность попадания в счетный объем двух и более частиц одновременно. В зависимости от конструкции прибора эти частицы могут регистрироваться как одна или не регистрироваться вообще, что в обоих случаях приводит к искажениям дисперсного состава и концентрации измеряемых аэрозолей.

В настоящее время достаточно полно исследована проблема совпадения частиц в счетном объеме ФЭСЧ [1, 3], однако эти результаты невозможно использовать для ЛВПА. Ограничения возникают из-за различия принципов измерения ФЭСЧ и ЛВПА. ФЭСЧ измеряет интенсивность света, рассеянного частицами в счетном объеме, при этом частицы движутся с одинаковой скоростью и вероятность совпадения определяется только общей концентрацией. ЛВПА измеряют скорость движения частиц через счетный объем, которые предварительно разгоняются в ускоряющем сопле. После ускорения частицы приобретают различные скорости, зависящие от их аэродинамического диаметра. Таким образом, вероятность совпадения двух и более частиц в счетном объеме ЛВПА зависит не только от концентрации, но и от размеров, что не учитывается в теории для ФЭСЧ.

Целью настоящей работы является исследование ошибок в определении дисперсного состава и концентрации аэрозолей в результате совпадения частиц в счетном объеме ЛВПА. Счетный объем

имеет вид цилиндра диаметром 0,7 и высотой 0,25 мм. Электронная схема разработана таким образом, что регистрируются только те частицы, которые влетают в пустой счетный объем при условии, что за время пролета в него не влетит больше частиц. Если исходный поток содержит $n_0(x_i)\Delta x$ частиц в диапазоне размеров от x_i до $x_i + \Delta x$, то прибором зарегистрируется $n(x)\Delta x$ частиц в этом диапазоне:

$$n(x_i)\Delta x = n_0(x_i)\Delta x P_0 P_1, \quad (1)$$

где P_0 – вероятность попадания частицы в пустой счетный объем; P_1 – вероятность того, что после попадания частицы в пустой счетный объем в него не влетит больше частиц.

Вероятность попадания частицы в пустой счетный объем зависит только от общей концентрации [3]:

$$P_0 = \exp(-N_0 V), \quad (2)$$

где N_0 – полная концентрация частиц в исходном аэрозоле; V – величина счетного объема.

Для вывода вида P_1 используются результаты [4], где для ФЭСЧ получено

$$P(m, \tau) = \exp[-(N_0 V + m)\tau]; \quad (3)$$

$$\tau = u t/h, \quad (4)$$

где $P(m, \tau)$ – вероятность обнаружения в счетном объеме m частиц по истечении времени t , если в начальный момент там находилось m частиц; u – скорость частиц; h – линейный размер счетного объема в направлении движения частиц; t – время.

Если разбить весь диапазон размеров на равномерные интервалы Δx и допустить, что в пределах одного интервала все частицы на выходе из сопла имеют одинаковую скорость $u(x_i)$, то можно вычислить вероятность p_{ij} того, что если в начальный момент в счетном объеме находилась частица x_i , то в него не влетит частица x_j за время $t(x_i)$ пролета частицы x_i через счетный объем:

$$p_{ij} = \exp \left[-\frac{n_0(x_j) \Delta x V u(x_j) t(x_i)}{h} \right] \quad (5)$$

для $i \neq j$;

$$p_{ii} = \exp \left\{ -\frac{[n_0(x_i) \Delta x V + 1] u(x_i) t(x_i)}{h} \right\} \quad (6)$$

для $i = j$.

Учитывая, что

$$u(x_i) = h/t(x_i), \quad (7)$$

формулы (5), (6) преобразуются к виду

$$p_{ij} = \exp \left[-\frac{n_0(x_j) \Delta x V u(x_j)}{u(x_i)} \right] \quad (8)$$

для $i \neq j$;

$$p_{ii} = \exp \left\{ -\frac{[n_0(x_i) \Delta x V + 1] u(x_i)}{u(x_i)} \right\} \quad (9)$$

для $i = j$.

Рассматривая систему невзаимодействующих частиц, расположенных в пространстве случайным образом, можно записать

$$P_i = \prod_{j=1}^{\infty} p_{ij}, \quad (10)$$

где P_i – вероятность обнаружения в счетном объеме частицы x_i через время $t(x_i)$, если в начальный момент там находилась частица x_i .

Переход к пределу $\Delta x \rightarrow 0$ дает окончательное выражение для P_1 :

$$P_1 = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} p_i, \quad (11)$$

$$P_1 = \exp \left[-\frac{V}{u(x_i)} \int_0^{\infty} u(x_j) n_0(x_j) dx_j - 1 \right]. \quad (12)$$

Используя формулы (1), (2), (12) и опуская индексы i, j , получаем зависимость измеренного дисперсного состава и концентрации от исходных параметров аэрозоля:

$$n(x) = n_0(x) \exp[-(N_0 V + 1)] \exp \left[-\frac{V}{u(x)} \int_0^{\infty} u(x_j) n_0(x_j) dx \right]; \quad (13)$$

$$N = \int_0^{\infty} n_0(x) \exp[-(N_0 V + 1)] \exp \left[-\frac{V}{u(x)} \int_0^{\infty} u(x_j) n_0(x_j) dx \right] dx. \quad (14)$$

Выражения (13), (14) позволяют прогнозировать ошибки в определении дисперсного состава и концентрации аэрозолей при условии выполнения опи-

санного выше алгоритма работы электронной схемы. Расчеты показали, что существует неоднозначность в определении концентрации, связанная с видом начального распределения. Конкретный вид кривой зависимости измеренной концентрации от исходной зависит от типа и параметров начального распределения (рис. 1). Следует отметить, что эта зависимость в достаточной мере слабая. При изменении начального распределения от монодисперсного к полидисперсному (равномерному) положение максимума и его амплитуда изменяются на 10–15%.

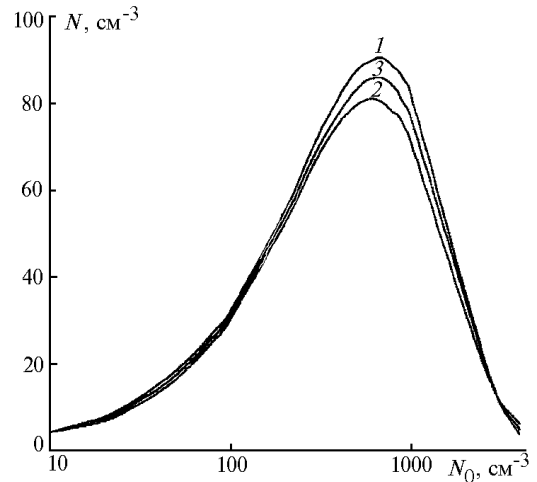


Рис. 1. Зависимость измеренной концентрации от исходной для различных типов распределений. Кривая 1 – монодисперсное $n_0(x) = 1$ для $x = 10$ мкм, $n_0(x) = 0$ для $x \neq 10$ мкм; 2 – прямоугольное $n_0(x) = 0,1$ для $1 \text{ мкм} \leq x \leq 10 \text{ мкм}$, $n_0(x) = 0$ для $x < 1 \text{ мкм}$, $x > 10 \text{ мкм}$; 3 – логарифмически нормальное $D_{50} = 10$ мкм, $\sigma_g = 2,25$

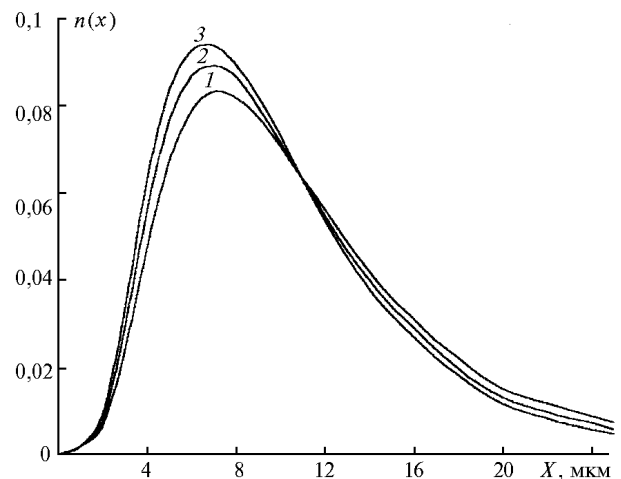


Рис. 2. Искажения дисперсного состава для логарифмически нормального начального распределения $D = 10$ мкм, $\sigma = 1,75$ при различных концентрациях. Кривая 1 – исходное распределение; 2 – вычисленное распределение для начальной концентрации $N_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$; 3 – вычисленное распределение для начальной концентрации $N_0 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$

Расчеты для дисперсного состава (рис. 2) показывают, что ошибки зависят как от начальной концентрации, так и от параметров распределения.

Большой интерес представляет решение обратной задачи, т.е. восстановление исходного дисперсного состава и концентрации по измеренным. Преобразуем выражение (13) к следующему виду:

$$n_0(x) = n(x) \exp(N_0 V + 1) \exp\left[\frac{V}{u(x)} \int_0^\infty u(x) n_0(x) dx\right]. \quad (15)$$

Умножим обе части на $u(x)$ и проинтегрируем по размерам, в результате получим

$$z = \int_0^\infty u(x) n(x) \exp(N_0 V + 1) \exp\left[\frac{V}{u(x)} z\right] dx, \quad (16)$$

$$z = \int_0^\infty u(x) n_0(x) dx. \quad (17)$$

Если проинтегрировать обе части формулы (15) по размерам, то с учетом формул (16), (17) получится система из двух уравнений для определения двух неизвестных z , N_0 :

$$z = \exp(N_0 V + 1) \int_0^\infty u(x) n(x) \exp\left[\frac{V}{u(x)} z\right] dx; \quad (18)$$

$$N_0 = \exp(N_0 V + 1) \int_0^\infty n(x) \exp\left[\frac{V}{u(x)} z\right] dx. \quad (19)$$

Данная система решалась численно на ЭВМ. Первоначально программой «Прогноз» из заданного исходного распределения получалось распределение, которое и использовалось для решения обратной задачи. Получены два решения системы уравнений (18), (19) z_1 , N_{01} и z_2 , N_{02} , которым соответствуют два различных распределения.

Одно решение восстанавливает исходное распределение, что и ожидалось, другое решение соответствует новому распределению, не совпадающему с исходным (рис. 3). Полученный результат интересен тем, что существуют два распределения, отличающиеся не только концентрацией, как это имеет место для ФЭСЧ, но и дисперсным составом, которые при измерении на ЛВПА дают одинаковый результат. Для каждого типа начального распределения существует концентрация, при которой неоднозначность исчезает. Эта точка максимума на кривой зависимости измеренной концентрации от исходной (см. рис. 1).

ГНЦ ВБ «Вектор»,
НИИ аэробиологии, Новосибирская область

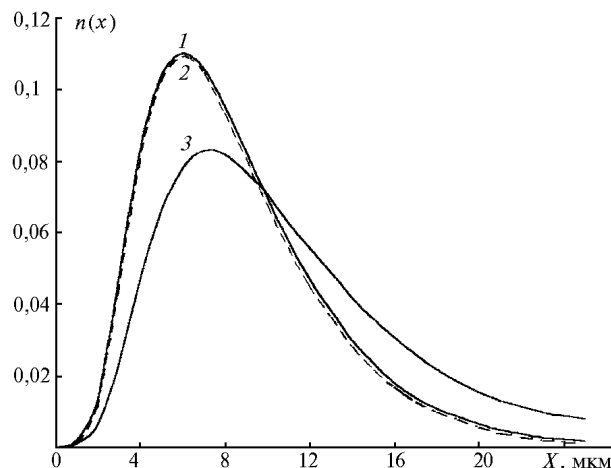


Рис. 3. Решения обратной задачи: 1 – исходное распределение; 2 – решение 1; 3 – решение 2

Теоретические исследования показывают, что совпадение частиц в счетном объеме ЛВПА приводит к искажениям дисперсного состава и концентрации измеряемого аэрозоля. Ошибки могут достигать значительных величин, особенно при высокой концентрации исходного аэрозоля. Решение обратной задачи приводит к неоднозначности восстановления не только концентрации, но и дисперсного состава, что вносит дополнительные трудности в практические исследования. Один из возможных путей повышения корректности измерений – ограничение концентрации исследуемого аэрозоля на уровне, при котором ошибки в определении дисперсного состава незначительны.

В НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор» разработан комплекс аппаратуры, состоящий из ЛВПА и диспергирующего устройства с ограничением концентрации для исследования сухих порошкообразных материалов. Концентрация ограничивается сигналом от ЛВПА по принципу отрицательной обратной связи на уровне порядка $5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$.

Проведенные эксперименты показали, что разработанная система позволила повысить корректность результатов при измерениях.

1. Беляев С.П., Никифоров Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. Wilson T.C., Liu B.Y.H. // J. Aerosol Sci. 1980. V. 11. N 2. P. 139–150.
3. Willeke K., Liu B.Y.H. // Fine particles / Ed. Liu B.H. N.Y.: Academic Press, 1976. P. 697–729.
4. Julianov J.V., Lushnikov A.A. // J. Aerosol Sci. 1984. V. 15. N 1. P. 69–81.

Поступила в редакцию
4 февраля 1998 г.

V.A. Yashin, U.D. Makashev, V.S. Toporkov. Investigation of Particles Composition and Aerosol Concentration Errors Arised from Measurement by Light-of-Time Analyzers.

The problem of coincidence of aerosol particles in a counting volume of laser time-of-flight analyzer has been studied. It was shown on the example of model size distribution that a coincidence of particles leads to errors in determination of size distribution and concentration of aerosol particles. It was shown also that an ambiguity of initial parameters for aerosol particles exists after solution of inverse problem. The problems of increasing of correctness and stability of measurements are discussed.