

Ю.Е. Польский, Н.В. Филиппова

### ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ (СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ)

Проведен сопоставительный анализ точностных характеристик различных типов фотоэлектрических счетчиков (ФЭС). Проанализированы основные ограничения области их применения, при этом главное внимание сосредоточено на устранении ошибок, обусловленных физической природой частиц. Показано, что влияние этого фактора можно устранить при помощи интерферометрических счетчиков аэрозольных частиц, в частности, использующих излучение на различных длинах волн. Даны основные соотношения, определяющие метрологические характеристики таких счетчиков.

В связи с расширением области применения фотоэлектрических приборов для измерения характеристик аэрозольных сред, ростом количества аэрозольных примесей и расширением спектра их физических свойств возрастает необходимость в создании более информативных приборов с жесткими требованиями к метрологическим характеристикам. Однако в литературе, особенно отечественной, почти отсутствуют публикации, содержащие обобщенный анализ возможностей и ограничений наиболее перспективных фотоэлектрических методов и их точностных характеристик.

Основными параметрами, характеризующими ФЭС любого типа, являются: диапазон измеряемых частиц, их минимально измеряемый диаметр и предельно измеряемая счетная концентрация, а также точностные характеристики измерения всех этих величин. В статье проводится анализ существующих методов построения ФЭС с учетом этих параметров.

Наибольшее количество различных модификаций имеют спектрометры, в которых размер частицы определяется по амплитуде импульса, полученного на выходе фотоприемника при пролете частицы через счетный объем (СО) прибора. Ввиду простоты конструкции такие ФЭС достаточно хорошо изучены [1–6]. Фундаментальные недостатки этого типа приборов, такие как зависимость результатов измерений от состава вещества частицы, неоднозначность рабочих характеристик приборов и жесткие требования к амплитудным характеристикам электронного приемно-измерительного тракта, существенно ограничивают область их применения. Предельные характеристики данного метода построения ФЭС и средняя суммарная ошибка  $\delta_{\Sigma}$  определения размеров частиц, вызванная такими факторами, как конечные размеры входной и выходной апертур, неравномерность освещенности СО и молекулярное рассеяние в СО, приведены в таблице.

Предельные характеристики и суммарная ошибка различных модификаций ФЭС

Характеристики	Методы				
	Амплитудные	Теневые	Интерферометрические		
			Доплеровские анемометры	Моноцветные и полицветные различной ширины	Полицветные эквидистантные полосы
Размеры $d$ частиц, мкм	0,3 – 60	5 – 300	0,3 – $L$	5 – 120	0,3 – 0,7 $L_{\max}$
$N_{\max}$	$10^4$	$10^3$	до $10^6$	$10^5$	$5 \cdot 10^5$
$\delta_{\Sigma}$	> 0,5	> 0,5	–	–	< 0,2

В настоящее время развитие ФЭС идет по пути создания приборов, свободных от этих недостатков. Намечились два направления разработок: теневые и телевизионные спектрометры (например, [7–9, 10, 11]) и интерферометрические (например, [12, 13]). В качестве последних наиболее часто используются лазерные доплеровские анемометры [14–17].

Большой класс ФЭС представляют так называемые теневые спектрометры. Они состоят из устройства, формирующего коллимированный пучок света, который через изображающую оптику направляется на линейку фотоэлементов или линейку световых волокон диаметром 30–250 мкм. При пролете частицы через коллимированный пучок света образуется тень частицы, которая попадает на линейку фотоэлементов. Вычислительное устройство объединяет сигналы с фотоэлементов, селекционирует сигналы по амплитуде, формирует признак размера частиц и выдает информацию о размере пролетевшей через СО частицы. Диапазон размеров частиц, измеряемых такими спектрометрами, – от 10 до 300 мкм (в приборе [9]  $r_{\min} \sim 5$  мкм). Недостатком таких приборов является наличие большого количества фотоэлементов (32 и более, например, 256 в [9]). Кроме того, погрешность измерений размера частиц на нижнем пределе диапазона размеров составляет не менее 50%.

В телевизионных спектрометрах число фотоэлементов значительно уменьшено за счет применения телевизионной трубки, на чувствительной площадке которой формируется изображение пучка света и пролетающих через пучок света частиц. Последующая развертка изображения и анализ полученного видеосигнала позволяют производить измерения размеров частиц. Однако существующие телевизионные спектрометры имеют высокую стоимость, значительные габариты и массу, а потому не пригодны для работы в полевых условиях.

В интерферометрических счетчиках аэрозолей используются интерферометрические методы выделения СО. Сигнал от частицы, пролетевшей такой СО, оказывается промодулированным по амплитуде (функция размера) и частоте (функция скорости частицы). Глубина модуляции фототока  $M$  зависит от размера частицы довольно сложным образом:  $M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = 2 J_1(\rho) / \rho$ , где  $J_1(\rho)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;  $\rho = 2\pi r / L$ ;  $r$  – радиус частицы;  $L$  – период интерференционной картины [1].

Поскольку ширина интерференционной полосы не превышает  $\lambda / 2$ , то нижним пределом измеряемых размеров можно считать  $r = \lambda / 4$ . С другой стороны, чувствительность стандартных фотоприемников с учетом эффективности светорассеяния ограничивает диаметр частиц  $d_{\min}$  величиной порядка 0,3 мкм [5, 6, 18, 19]. В соответствии с теорией, развитой в [20], чтобы минимизировать ошибки, вызванные амплитудными характеристиками электронного приемного тракта,  $M_{\max}$  не должна превышать 0,9, следовательно,  $r_{\min} \geq 0,1 L$ . Поскольку глубина модуляции  $M$  имеет неоднозначности для частиц с  $r > 0,55 L$ , верхним пределом интерферометрических методов следует считать  $r$  порядка  $L / 2$ .

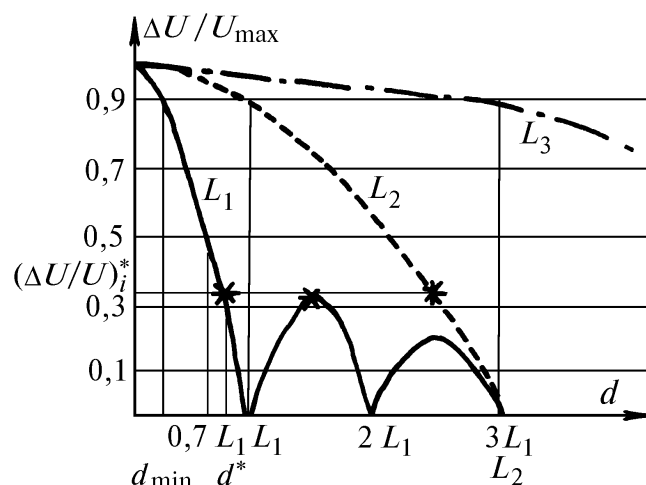
Другим ограничением интерферометрического метода является сравнительно узкий интервал измеряемых размеров частиц. Однако надо отметить, что этот метод позволяет измерять счетные концентрации (для минимального периода  $L = 1,5$  мкм) до  $10^6 \text{ см}^{-3}$ .

Для расширения возможностей интерферометрических методов было предложено формировать в СО моноцветные полосы света-тени [21] или цветные полосы [22] различной ширины. Существенным преимуществом этих методов является счет сигналов рассеяния, что позволяет обрабатывать электрические сигналы, изменяющиеся в большом динамическом диапазоне размеров. Однако эти методы отличают сложность формирования СО, малое число поддиапазонов измерений и большие размеры измеряемых частиц (не менее 5 мкм), что позволяет использовать методы моно- и полицветных полос различной ширины лишь для ограниченного круга задач исследования.

Для уменьшения влияния неоднозначностей в определении размера частиц, для повышения точности и диапазона размеров, а также увеличения допустимо возможных измеряемых концентраций авторами предложен новый способ формирования полосатой структуры СО [5, 23]. Сущность предложенного метода заключается в следующем. С помощью цветоразделительной и собирающей оптических систем в СО формируются эквидистантно расположенные полосы интерференции с различными периодами  $L_i$  для различных длин волн  $\lambda_i$ . Свет, рассеянный каждой частицей, пролетевшей такой СО перпендикулярно системе полос, направляется на фотоприемники, каждый из которых принимает излучение только одной из длин волн. Глубина модуляции  $(\Delta U / U_{\max})_i = (U_{\max} - U_{\min}) / U_{\max}$  сигнала на выходе каждого ФП зависит от соотношения между диаметром частиц  $d$  и шагом интерференционной картины  $L_i$  каждого цвета.

Принципиальным достоинством метода является то, что формирование эквидистантно расположенных полос с требуемым периодом не вызывает технических трудностей при реализации любым стандартным методом.

Наименьший диаметр частицы ( $d_{\min}$ )<sub>min</sub>, который можно зафиксировать данным методом, определяется пороговой чувствительностью приемников рассеянного излучения и минимальным сформированным периодом. Зависимость величины ( $\Delta U / U_{\max}$ ) от диаметра частицы  $d$  показана на рисунке. Для всех частиц с размерами  $d$  больше, чем  $0,7 L_i$ , функция ( $\Delta U / U_{\max}$ ) имеет неоднозначности, в результате чего область измеряемых размеров частиц на периодической структуре одного цвета составит интервал  $[(d_{\min})_i; 0,7L_i]$ . Используя интерференционные картины нескольких цветов с различными периодами (например,  $L_2$  и  $L_3$ ), получаем для частицы с диаметром  $d^* > 0,7L_1$  разные значения ( $\Delta U / U_{\max}$ )<sub>i</sub> на каждой длине волны, что позволяет устранить неоднозначность отсчетов и одновременно повысить точность измерения за счет снижения требований к электронному тракту.



Зависимость функции ( $\Delta U / U_{\max}$ ) от диаметра частицы для различных периодов интерференции (метод полицветных эквидистантных полос)

В соответствии с теорией, развитой в [20], полностью избежать неоднозначности, сохранив требуемую точность, число градаций и диапазонов измерений при минимальном количестве источников света, можно, построив СО по принципу, проиллюстрированному на рисунке. Для того чтобы отношение ( $\Delta U / U_{\max}$ ) в точке  $d_{\min}$  равнялось 0,9,  $L_{\min}$  выбирается приблизительно равным  $3 d_{\min}$ . Значение  $d_{\min}$  может соответствовать минимальному диаметру частиц, который нужно зафиксировать. Тогда каждый последующий период должен быть приблизительно в 3 раза больше предыдущего. Максимальный размер частицы, которую можно зарегистрировать без значительных ошибок,  $d_{\max} = 0,7L_{\max}$ . Определение размеров частиц по измеренной совокупности отношений глубины модуляции во всем интервале измерений позволяет существенно снизить требования к линейности амплитудных характеристик и точности пороговых характеристик компараторов электронной части измерительного тракта.

Таким образом, представляется целесообразным дальнейшее совершенствование аппаратуры для исследования дисперсного состава аэрозоля вести по пути совершенствования интерферометрических методов в силу независимости результатов их измерений от природы частиц. Основные недостатки интерферометрических методов, такие как небольшой интервал измеряемых размеров, неоднозначность рабочих характеристик и жесткие требования к электронно-измерительному тракту, несвойственны новому методу полицветных эквидистантных полос. Современный уровень техники позволяет регистрировать описанным методом такие же минимальные размеры частиц, как и другими ФЭС. Принцип построения СО позволяет снизить его размеры до  $5 d_{\max}$  вдоль каждой оси и измерять концентрации до  $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

Проведенный анализ источников ошибок, существующих в предложенном типе счетчиков частиц, показал, что требования к характеристикам прибора для сведения ошибок к значениям менее 10% технически выполнимы.

1. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. Pui David Y. H., Liu Benjamin Y. H. // Phys. scr. 1988. V. 37. N 2. P. 252–269.
3. Howard G. Barth, Shao-Tang Sun, Robyn M. Nicol // Anal. Chem. 1987. V. 59. 142 R–162 R.
4. Фотоэлектрические счетчики частиц в жидких и газообразных технологических средах / Ефремов Е.А., Кулаков Б.П., Огарев Л.А. и др. (Обзор информ. / ЦНИИ информации, N 3770) М., 1985. 76 с.
5. Польский Ю.Е., Филиппова Н.В. // XII Межресп. симп. по распротр. лазерного излучения (Тезисы докл.). Томск, 1993. С. 206.
6. Польский Ю.Е., Филиппова Н.В. // II Всесоюзн. конф. <Оптические методы исследования потоков> (Тезисы докл.). Новосибирск, 1993. С. 31.
7. Knollenberg R. G. // Three new instruments for cloud physics measurements. In. Proceed. Conf. on Cloud Physics. Boulder. USA. 1976. P. 554–561.
8. Wang I. O. F., Fichenor D. A. // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 8. P. 1367–1373.
9. Francini F., Longobardi G. // Opt. Commun. V. 33. N 1. P. 1–3.
10. Панов В.Н., Яскевич Г.Ф. // Труды ИЭМ. Вып.7(112). 1984. С. 36–48.
11. Малахов В.А., Смирнов В.В. // Труды ИЭМ. 1973. Вып.4(38). С. 70–93.
12. А.С. 1679284 (СССР). Устройство для определения размеров частиц в проточных средах. / Е.К. Чехович, И.М. Лакоза. 26.09.88.
13. А.С. 554466 (СССР). Устройство для измерения размера частиц аэрозоля в потоке / Н.В. Гончаров. Оpubл. в БИ. 1977. N 14.
14. А.С. 2642839 (FR). Способ и устройство для измерения скоростей и / или размеров частиц дисперсии / 09.02.89.
15. Ринкевичус Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 288 с.
16. Пинчук С.Д., Скрипкин А.М., Суплаков А.А. // Труды ИЭМ. 1976. Вып. 13(58). С. 162–170.
17. Farmer W. M. // Appl. Opt. 1972. V. 11. N 11. P. 2603–2612.
18. Шейко В.В., Александров В.Ю., Аксенов А.А. // Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. 1987. N 13. С. 60–66.
19. Морита Я., Такаги М. Шарзондовые измерения стратосферных аэрозолей при помощи счетчиков аэрозольных частиц, использующих рассеяние света // Утэо кагаку кэнкюсе хококу (JP). 1983. N 8. С. 87–99.
20. Ильин Г.И., Польский Ю.Е. // Итоги науки и техники (радиотехники). 1989. Т. 39. С. 67.
21. А.С. 1032370 (СССР). Способ измерения размеров микрочастиц / И.И. Васильев, Г.И. Ильин, Ю.Е. Польский. Оpubл. в БИ. N 28. 1983.
22. А.С. 1434333 (СССР). Способ измерения размеров микрочастиц / И.И. Васильев, Д.Б. Горбачев, Г.И. Ильин, Ю.Е. Польский. Оpubл. в БИ. N 40. 1988.
23. Заявка N 93028121 / 02. Способ измерения размеров микрочастиц / Ю.Е. Польский, Н.В. Филиппова. 04.06.93.

Казанский государственный технический  
университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию  
15 июля 1994 г.

Yu. E. Polsky, N. V. Filippova. **Interferometric Counters of Aerosol Particles (Current State and Ways of Development).**

In the present work there was performed a comparative analysis of the precision characteristics of various kinds of photoelectric counters. The limits of their applicability have been discussed, much attention being concentrated on the elimination of errors resulting from a physical nature of the particles. It is shown, that the influence of this factor can be eliminated with the help of interferometric counters of aerosol particles, particularly those using radiation at various wavelengths. Basic relations have been given, which determine the characteristics of such counters.