

УДК 535.36:551.508.91

## Учет зависимости границ диапазонов размеров частиц от комплексного показателя преломления материала частиц в фотоэлектрических счетчиках

В.В. Полькин\*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 25.01.2017 г.

На основании общего выражения для расчета отклика  $R$  фотоэлектрических счетчиков на аэрозольные частицы приводится формула для серийно выпускаемых счетчиков, с конкретной геометрией и спектральными характеристиками источника и приемника излучения. Для корректировки границ диапазонов размеров частиц у счетчиков получены таблицы с использованием теории Ми. Обращается внимание на разницу между комплексным показателем преломления калибровочных и исследуемых частиц, игнорирование которой может приводить к значительным ошибкам в определении размеров частиц. Акцентируется необходимость учета зависимости комплексного показателя преломления частиц от относительной влажности воздуха для разных диапазонов размеров частиц.

*Ключевые слова:* аэрозоль, фотоэлектрические счетчики, комплексный показатель преломления; aerosol, photoelectric counters, complex refractive index.

### Введение

Для исследования дисперсного состава и концентрации атмосферного аэрозоля используются серийно выпускаемые фотоэлектрические счетчики аэрозольных частиц (ФСЧ) типа АЗ и ПК.ГТА, действие которых основано на регистрации света, рассеянного отдельными аэрозольными частицами под углом  $90^\circ$ . Методические вопросы и конструктивные особенности счетчиков описаны в [1–4].

Ошибки ФСЧ подробно анализируются в работах [3, 5]. К ним относятся: независимые относительные погрешности, вызванные нестабильностью пороговых и других преобразующих устройств, изменением комплексного показателя преломления  $m$  материала исследуемых аэрозольных частиц и размеров счетного объема, флуктуациями длины волны излучения  $\lambda$  источника и концентрации молекул газа и более мелких частиц в счетном объеме; ошибки в анализе и при регистрации сигналов; фотометрические ошибки.

Особо значимым источником погрешности изменения размера аэрозольных частиц является зависимость показаний ФСЧ от комплексного показателя преломления частиц  $m = n - i \cdot k$  [3], где  $n$  – действительная, а  $k$  – мнимая часть комплексного показателя преломления. Промышленно выпускаемые ФСЧ создавались главным образом для контроля загрязненности помещений, поэтому их ка-

либровали частицами латекса (поливинилтолуол, полистерол,  $m = 1,6 - i \cdot 0$ ), редко частицами спор растений, грибов ( $m = 1,5 - i \cdot 0$ ). Если так откалиброванные ФСЧ использовать в помещениях при анализе распределений по размерам частиц с  $m = 1,5 - i \cdot 0$  (трансформаторное масло, диоктилфталат, корунд и др.), то ошибки будут крайне малы. Однако если ФСЧ прокалиброван по частицам с  $m = 1,5 - i \cdot 0$ , а измеряются частицы с  $m = 1,33 - i \cdot 0$  (вода), то сигнал от частицы уменьшается примерно в 2 раза. При этом относительная погрешность определения размеров частиц для отдельных диапазонов счетчика может варьировать от десятков до сотен процентов [3, 6].

### Зависимость сигналов ФСЧ от комплексного показателя преломления частиц

Рассмотрим влияние неопределенности комплексного показателя преломления частиц  $m = n - i \cdot k$  на точность определения границ диапазонов размеров частиц в ФСЧ. В общем случае реакцию (отклик) ФСЧ на частицу, рассеивающую свет в рабочем объеме, можно представить как функцию [3, 7]:

$$R = R[\lambda, i_1, i_2, E(\lambda), F(\theta, \varphi)],$$

где  $i_1, i_2$  – функции, пропорциональные компонентам электрического поля электромагнитной волны,

\* Виктор Викторович Полькин (victor@iao.ru).

параллельным и нормальным к плоскости рассеяния;  $\theta$  – угол рассеяния излучения, измеренный относительно направления падения пучка;  $\varphi$  – угол, образованный падающим лучом и осью приемника;  $F(\theta, \varphi)$  – геометрический фактор, зависящий от угла между осями приемника и источника  $\alpha$ , угловых апертур приемника  $\beta$  и источника  $\gamma$ ;  $E(\lambda)$  определяет совместную спектральную характеристику приемника и источника излучения. Конкретные формулы для  $R$ ,  $F(\theta, \varphi)$ ,  $E(\lambda)$  приводятся в [3, 6–8] и имеют довольно сложный вид. В общем виде формула для сигнала  $R$  от сферической рассеивающей частицы при освещении ее пучком излучения имеет вид

$$R = \frac{1}{8\pi^2} \int_{\alpha-\gamma}^{\alpha+\gamma} \int_{\alpha-\beta}^{\alpha+\beta} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda^2 (i_1 + i_2) E(\lambda) F(\theta, \varphi) d\lambda d\theta d\varphi. \quad (1)$$

Расчеты  $R$  для различных геометрий ФСЧ приводились в [7–13].

Для счетчиков с 90°-й геометрией, каковыми являются АЗ и ПК.ГТА,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\beta = 22^\circ$  (рис. 1) и  $R$  определяется выражением

$$R = \frac{1}{8\pi^2} \int_{70^\circ}^{110^\circ} \int_{48^\circ}^{132^\circ} \int_{0,1 \text{ мкм}}^{0,9 \text{ мкм}} \lambda^2 (i_1 + i_2) \arccos\left(\frac{\cos 22^\circ - \cos \theta \cos \varphi}{\sin \theta \sin \varphi}\right) \times \sin \theta E(\lambda) \arccos\left(\frac{\cos 20^\circ}{\sin \varphi}\right) \sin \varphi d\lambda d\theta d\varphi. \quad (2)$$

Здесь совмещенная спектральная характеристика  $E(\lambda)$  определяется спектральной характеристикой приемника  $S(\lambda)$  (ФЭУ-68 – многощелочной полупрозрачный фотокатод типа С-11 по Российской классификации и S-20 и S-25 по Международной классификации) и спектральной характеристикой источника  $T(\lambda)$  (вольфрамовая лампа накаливания). Эти спектральные характеристики приводятся на рис. 2.

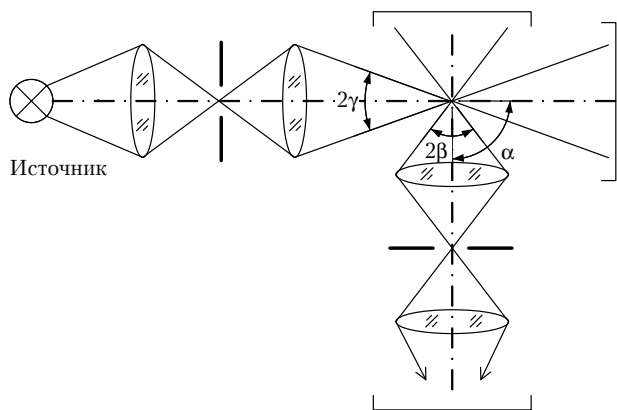


Рис. 1. Оптическая схема ФСЧ типа АЗ и ПК.ГТА

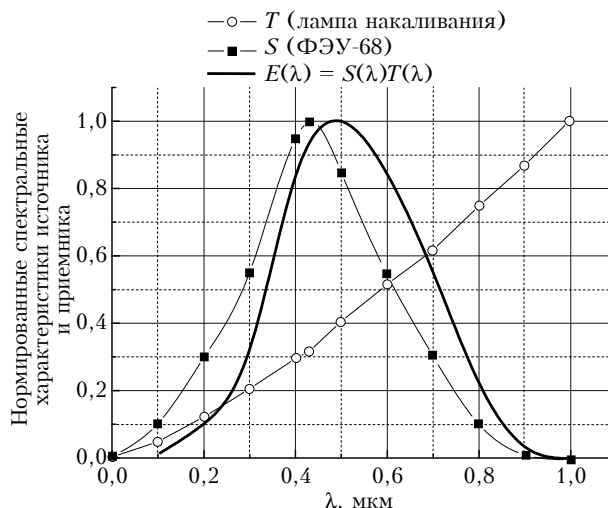


Рис. 2. Спектральные характеристики приемника  $S(\lambda)$ , источника  $T(\lambda)$  и совмещенная спектральная характеристика  $E(\lambda) = S(\lambda)T(\lambda)$

### Учет влияния комплексного показателя преломления частиц на границы диапазонов ФСЧ

Чтобы учитывать вариации показаний ФСЧ для частиц с различными  $m$ , необходимо для конкретной геометрии ФСЧ знать зависимость  $R(m)$ . Для набора значений  $n$  (1,6; 1,5; 1,45; 1,33) с диапазоном, перекрывающим существующие значения  $m$  для атмосферного аэрозоля, по формуле (2) были рассчитаны  $R(m)$  для радиуса частиц  $r$  в диапазоне 0,1–10 мкм с шагом  $\Delta r = 0,01$  мкм до  $r = 1$  мкм и  $\Delta r = 0,1$  мкм после 1 мкм. При этом функции  $i_1$ ,  $i_2$  рассчитывались по теории Ми с использованием алгоритма, предложенного в [14]. На рис. 3 показаны зависимости  $R(r, m)$  для указанного диапазона радиусов частиц и множества  $m$ .

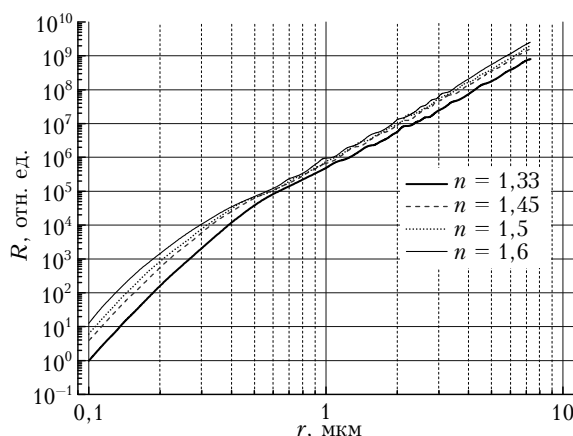


Рис. 3. Зависимость  $R$  от  $r$  для различных  $m$

Не углубляясь в качественный анализ зависимости  $R(r, m)$ , приведем результаты расчетов, которые могут быть использованы на практике.

Обычно калибровочные частицы имеют комплексные показатели преломления  $m = 1,5 - i \cdot 0$  и  $m = 1,6 - i \cdot 0$ . Для начальных (заводских) значений нижних границ диапазонов ФСЧ типа АЗ ( $r = 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,75; 1,0; 2,0; 3,5; 5,0$  мкм) были рассчитаны измененные значения нижних границ радиусов  $r_n$  и ширины диапазонов  $\Delta r_n$  при измерениях частиц с другими значениями  $m$  (1,50; 1,45; 1,33). Результаты приводятся в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Измененные значения нижних границ диапазонов  $r_n$  и ширины диапазонов  $\Delta r_n$  при измерениях частиц с  $n$  (1,50; 1,45; 1,33). Счетчик прокалиброван по частицам с  $n = 1,60$**

$r_{1,6}$ , мкм	$r_n$			$\Delta r_n$		
	$n$					
	1,50	1,45	1,33	1,50	1,45	1,33
0,20	0,2221	0,2360	0,2882	0,0496	0,0510	0,0585
0,25	0,2717	0,2870	0,3467	0,0506	0,0512	0,0515
0,30	0,3223	0,3382	0,3982	0,0474	0,0475	0,0507
0,35	0,3697	0,3857	0,4489	0,0463	0,0459	0,0511
0,40	0,4160	0,4316	0,5000	0,0464	0,0459	0,0410
0,45	0,4624	0,4775	0,5410	0,0386	0,0285	0,0265
0,50	0,5010	0,5060	0,5675	0,2890	0,3040	0,2682
0,75	0,7900	0,8100	0,8357	0,2558	0,2510	0,2783
1,00	1,0458	1,0610	1,1140	1,0772	1,1230	1,4321
2,00	2,1230	2,1840	2,5461	1,6107	1,5883	1,8319
3,50	3,7337	3,7723	4,3780	1,6069	1,7948	2,2274
5,00	5,3406	5,5671	6,6054	1,5794	1,6922	2,0446
6,50	6,9200	7,2593	8,6500			

Таблица 2

**Измененные значения нижних границ диапазонов  $r_n$  и ширины диапазонов  $\Delta r_n$  при измерениях частиц с  $n$  (1,50; 1,45; 1,33). Счетчик прокалиброван по частицам с  $n = 1,50$**

$r_{1,5}$ , мкм	$r_n$			$\Delta r_n$		
	$n$					
	1,45	1,33	1,50	1,45	1,33	
0,20	0,2126	0,2573	0,05	0,0537	0,0585	
0,25	0,2663	0,3158	0,05	0,0483	0,0584	
0,30	0,3146	0,3742	0,05	0,0537	0,0587	
0,35	0,3683	0,4329	0,05	0,0470	0,0465	
0,40	0,4153	0,4794	0,05	0,0462	0,0458	
0,45	0,4615	0,5252	0,05	0,0466	0,0428	
0,50	0,5081	0,5680	0,25	0,2520	0,2479	
0,75	0,7601	0,8159	0,25	0,2590	0,2649	
1,00	1,0190	1,0808	1,00	0,9810	1,0528	
2,00	2,0000	2,1336	1,50	1,5800	2,0283	
3,50	3,5800	4,1619	1,50	1,6458	1,7457	
5,00	5,2258	5,9076	1,50	1,4940	2,0779	
6,50	6,7198	7,9855				

В табл. 3 даны коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $t$  для аппроксимационной формулы

$$r_n = Br_{1,6} + A \exp(-[n - 1,33]/t),$$

где  $r_n$  — нижняя граница интервала радиусов для частиц аэрозоля с коэффициентом преломления  $n$ ;  $r_{1,6}$  — нижняя граница интервала для частиц с  $n = 1,6$ , т.е. для границ, отображаемых на шкале АЗ при условии, что счетчик калибровался частицами с  $n = 1,6$ .

Таблица 3

**Коэффициенты аппроксимационной формулы  $r_n = Br_{1,6} + A \exp(-[n - 1,33]/t)$  и средние ошибки аппроксимации**

$r_{1,6}$ , мкм	$B$	$A$	$t$	Средняя ошибка аппроксимации, %
0,20	0,815	0,124	0,223	0,15
0,25	0,877	0,127	0,189	0,17
0,30	0,895	0,129	0,192	0,13
0,35	0,922	0,126	0,173	0,11
0,40	0,957	0,117	0,136	0,12
0,45	0,964	0,108	0,134	0,25
0,50	0,993	0,071	0,066	0,26
0,75	0,990	0,093	0,202	1,29
1,00	0,950	0,180	0,254	0,77
2,00	0,935	0,676	0,164	0,28
3,50	0,926	1,149	0,182	0,75
5,00	0,948	1,830	0,143	0,59
6,50	0,941	2,510	0,146	0,32

## Обсуждение результатов

Представленный анализ и корректировка границ диапазонов фотоэлектрических счетчиков выполнены в предположении сферичности для всего исследуемого диапазона размеров аэрозольных частиц и однородности их химического состава, который определяет комплексный показатель преломления  $m$ . В большинстве практических случаев применение такой корректировки оправданно. В качестве наиболее яркого примера можно показать корректировку значений функции распределения объемов частиц по размерам  $dV/dr$ , приведенной на рис. 4.

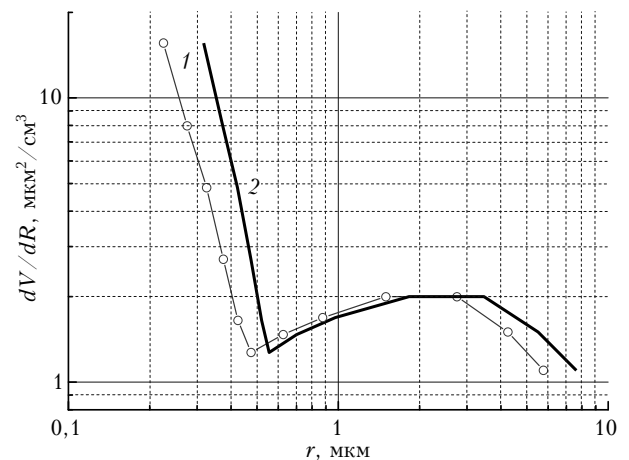


Рис. 4. Функция распределения объемов частиц по размерам  $dV/dr$ , построенная по некорректированным (1) и откорректированным (2) на  $n = 1,33$  данным ФСЧ

В этом случае ФСЧ, прокалиброванный по частицам с  $n = 1,6$ , измеряет частицы воды ( $n = 1,33$ ). Наблюдается занижение границ размеров ФСЧ, если не учитывать показатель преломления частиц воды.

Однако в отдельных случаях необходимо точное знание формы частиц и комплексного показателя преломления их материала. К таким редким случаям можно отнести измерения с помощью ФСЧ кристалликов солей, минералов и металлов, форма частиц которых и  $m$  материала сильно отличаются от калибровочных.

При исследовании атмосферного аэрозоля предложенная коррекция границ диапазонов ФСЧ может быть использована для большинства ситуаций, так как комплексный показатель преломления материала частиц аэрозоля  $m$  изучен достаточно хорошо [15–17]. Необходимо только учитывать то обстоятельство, что разные фракции частиц могут иметь разные значения и зависимости  $m$  от относительной влажности воздуха  $RH$ . К примеру, химический состав частиц субмикронного аэрозоля может сильно отличаться от грубодисперсного вследствие различия природы происхождения и источника поступления в атмосферу. Это обуславливает различный характер взаимодействия этих фракций частиц с  $RH$  (разная степень конденсационной активности) и, как следствие, разный комплексный показатель преломления. Зависимости  $m$  от  $RH$  тоже достаточно хорошо изучены для большинства атмосферных аэрозольных ситуаций [15–17].

Нужно также учитывать и разный характер искажения границ диапазонов размеров частиц в ФСЧ при изменении действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления. Так, если исследуемые частицы одной природы (одного химического состава) являются непоглощающими или слабо поглощающими ( $x \sim 0,01$ ), а счетчик прокалиброван по непоглощающим частицам с  $n \sim 1,5 \div 1,6$ , то занижение границ диапазонов размеров происходит сравнительно равномерно по всему измерительному диапазону. При этом если  $x \sim 0,01 \div 0,1$ , то границы размеров занижаются на 10–20% для частиц размерами более 1 мкм. Если же поглощающие частицы одной природы, с  $x > 0,1$ , то занижение границ для частиц больше 1 мкм может доходить до 2–3 раз [6]. Однако в атмосферном аэрозоле поглощающие частицы сосредоточены главным образом в субмикронной области [18, 19] и эффект занижения границ для поглощающих частиц больше 1 мкм в этом случае нивелируется.

Более упрощенная схема расчетов  $R$  с использованием интегральных индикатрис рассеяния в случае коллимированного освещающего пучка (такие расчеты могут быть использованы для ФСЧ с лазерными источниками излучения) применена в [6].

### Заключение

Анализ вариации показаний ФСЧ для частиц с различными значениями комплексного показателя их материала  $m$  показал, что для серийно выпускаемых счетчиков, прокалиброванных по частицам

с  $m \sim 1,5 \div 1,6$ , ошибка определения размеров частиц в реальных атмосферных условиях при игнорировании  $m$  может достигать значительных величин. Учитывая комплексный показатель преломления материала исследуемых частиц, можно восстановить их действительный размер (например, по табл. 1–3). Ошибки ФСЧ, связанные с изменением показателя преломления  $\delta m$ , в этом случае будут зависеть только от точности определения  $m$  в реальных условиях эксперимента.

Работа выполнена при поддержке ПФИ Президиума РАН 4.5 «Исследование долговременных изменений компонент воздуха, определяющих изменение радиационных характеристик атмосферы».

1. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М.: Химия, 1978. 208 с.
2. Соколов В.С., Сергеев В.И. Фотоэлектрический счетчик аэрозольных частиц АЗ-5 // Электрон. техн. Электроника СВЧ. 1970. № 10. С. 92–100.
3. Беляев С.П., Никифорова Н.К., Смирнов В.В., Щелчков Г.И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 230 с.
4. Беляев С.П., Гончаров Н.В., Дубровин М.А. Исследование характеристик и модернизация счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 // Тр. ИЭМ. 1980. Вып. 25 (93). С. 31–37.
5. Смирнов В.В. Основные характеристики спектрометров аэрозолей // Тр. ИЭМ. 1984. Вып. 7 (112). С. 3–17.
6. Козлов В.С., Польшкин В.В., Фадеев В.Я. Влияние неопределенности оптических постоянных на точность фотоэлектрических счетчиков аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18, № 4. С. 428–431.
7. Cooke D., Kerker M. Response calculations for light scattering aerosol particle counters // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 3. P. 734–739.
8. Heyder J., Gebhart J. Optimization of response functions of light scattering instruments for size evaluation of aerosol particles // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 5. P. 705–711.
9. Hodkinson J.R., Grenfield J.R. Response calculations for light scattering aerosol counters and photometers // Appl. Opt. 1965. V. 4, N 11. P. 1463–1474.
10. Quenzel H. Influence of refractive index on the accuracy of size determination of aerosol particles with light scattering aerosol counters // Appl. Opt. 1969. V. 8, N 1. P. 165–169.
11. Bakhanova R., Ivanchenko L. The calibration curve of photoelectric counters and computation of particle size distribution when the relationship between particle size and electrical pulse amplitude is ambiguous // J. Aerosol. Sci. 1973. V. 4. P. 485–490.
12. Gucker F., Tuma J. Influence of collecting lens aperture on light-scattering diagrams from single aerosol particles. // J. Colloid. Interface. Sci. 1968. V. 27. P. 402–411.
13. Oeseborg F. The influence aperture of the optical aerosol particles counters on the response curve // J. Aerosol. Sci. 1972. V. 3. P. 307–311.
14. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
15. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1986. 358 с.

16. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 198 с.
17. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
18. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P., Shmargunov V.P., Chernov D.G. Results of long-term measurements of the Black Carbon concentration in the troposphere in Siberia // Abstr. 10th conf. carbonaceous particles in the atmosphere. Vienna, June 26–29, 2011. P. 76. <http://www.iccpa.net>
19. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.

**V.V. Pol'kin. Accounting for the dependence of the size boundaries of photoelectric counters on the complex refractive index of the material of aerosol particles.**

On the basis of a common understanding of the calculation of the response  $R$  of photoelectric counters to aerosol particles, a formula for  $R$  is derived for commercially available counters with a specific geometry and the spectral characteristics of the source and the radiation detector. To correct size ranges of the counters tables are obtained using the Mie theory. The tables call attention to the difference between the complex refractive index of calibration and test particles. Ignorance of the difference can lead to large errors in the determination of particle size. The attention is drawn to the need to consider the dependence of the complex refractive index of particles in different size ranges on the relative air humidity.