Л и т е р а т у р а

I. К о у з о в П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. " Химия", Ленинградское отделение, 1971.
2. К и р ш А.А., Д в у х и м е н н ы й В.А. Градуировка струйного фотоэлектрического счетчика аэрозолей типа АЗ. " Измерительная техника", 1975, № 3.
3. К и р ш А.А., Д в у х и м е н н ы й В.А. Усовершенствование и градуировка струйного фотоэлектрического счетчика аэрозолей типа АЗ."Коллоидный журнал", т. XXXVII, вып.4, 1975.
4. П о д о л ь с к и й А.А., Л о г в и н о в Л.М., К а л а к у т с к и й Л.И., Т у р у б а р о в В.И., П о п о в Б.И. Устройство для определения концентрации и дисперсного состава аэрозоля. Авторское свидетельство № 372483. Бюл. изобр. № 13, 1973.
5. Л о г в и н о в Л.М., П о д о л ь с к и й А.А., Ф а д е е в В.В. Прибор ЭИП-5 для фракционного анализа грубодисперсных аэрозолей. " Заводская лаборатория". т.40, № 2, 1974.
6. П о д о л ь с к и й А.А., Л о г в и н о в Л.М., В о р о н о в А.Ф., Ф а д е е в В.В. Счетчик аэрозольных частиц ЭИП-9. "Приборы и техника эксперимента", 1975, № 5.
7. Разработка опытного образца прибора для измерения загрязненности воздуха и других газов твердыми частицами (отчет). Тема № 29Р, № Гос.регистрации 71059128, У07831. Руководитель темы П о д о л ь с к и й А.А., КуАИ, 1974.

А.А. Подольский

ЗАРЯДНЫЙ И ЗАРЯДНО-СЕДИМЕНТАЦИОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОРМЫ ЧАСТИЦ. ТАБЛИЦЫ ЗНАЧЕНИЙ.

Характеристика дисперсности аэрозолей с нешарообразной формой частиц представляет трудную задачу, которая осложнена еще и тем, что форма частиц оказывает неадекватное влияние на их поведение в различных процессах.

Чтобы определить размеры нешарообразных частиц одним числом, вводятся некоторые усредненные величины, например, седиментационный радиус a_c [1] . Поскольку скорость седиментации при прочих равных условиях зависит от размеров и формы пылинок, использование понятия седиментационного радиуса вполне уместно, когда измеряется, например, распределение пыли по размерным группам. В случае же порошков, в зависимости от их конкретного применения, более целесообразно производить измерение распределения частиц по размерным группам, границы которых определяются не по седиментационным, а по эквивалентным радиусам a_s или a_v (a_s и a_v - радиусы шарообразных частиц, равновеликих данной по поверхности или объему).

Так, если свойством порошка, определяющим его технологическое применение, является распределение поверхности по размерам, то в качестве этого размера надо принимать a_s , а не a_c . Использование же a_c и в этих случаях обусловлено не практической целесообразностью, а возможностями измерительной аппаратуры.

Следует заметить, что даже при одинаковой форме частиц связь между a_c и a_s (или a_v) не является однозначной вследствие произвольной ориентации частиц при осаждении.

Развитие электронно-ионной технологии и электрофизических методов измерения дисперсного состава диктует необходимость введения новых характеристик, учитывающих особенности зарядки и движения нешарообразных частиц в электрическом поле. Реализуемая в устройствах коронного разряда возможность сообщения частицам зарядов, определяемых их размерами, позволяет создать приборы для измерения различных параметров аэрозолей [2]÷[6] . Однако отличие формы частиц от шарообразной приводит к погрешности, которая проявляется при определении размера частицы по величине приобретенного ею заряда или по величине подвижности заряженной частицы в электрическом поле, при измерении поверхностной или объемной концентрации, делении аэрозольных частиц по фракциям, при нахождении распределения какого-либо интегрального параметра (поверхности, объема) по фракциям.

Полагая, что заряд или координата осаждения заряженной частицы в электрическом поле однозначно определяют некоторые характеристические размеры, получим, что погрешность измерения размеров (или границ фракций) при изменении формы частиц обусловлена изменением соотношения между искомым a_s (или a_v), с одной стороны, и определяемым характеристическим размером, с другой. В то же время погрешность при определении интегрального параметра обусловлена изменением соотношения между этим параметром (поверхностью, объемом частиц) и измеряемой величиной (зарядом или током). Нетрудно показать, что соотношение между $a_s (a_v)$ и характеристическим размером однозначно определяет связь между интегральным параметром и зарядом (током)частиц.

Учитывая различные варианты построения измерительной аппаратуры, целесообразно ввести в качестве характеристических понятия зарядного и зарядно-седиментационного радиусов. Под зарядным радиусом $a_з$ будем понимать радиус шара, изготовленного из того же материала,заряжавшегося в тех же условиях и получившего тот же заряд, что и нешарообразная частица.

В общем случае величина зарядного радиуса будет зависеть от условий зарядки, ориентации частицы относительно вектора напряженности внешнего электрического поля, от формы и материала частицы. Расчет $a_з$ наиболее прост в случае проводящих (или покрытых проводящим слоем) частиц эллипсоидальной формы, получивших заряды в результате ударной зарядки. Используя выражения для ударных зарядов шара и эллипсоида [7, 8], найдем

$$a_з = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{a_{II} a_{III}}{d_I} \cos\alpha_I\right)^2 + \left(\frac{a_I a_{III}}{d_{II}} \cos\alpha_{II}\right)^2 + \left(\frac{a_I a_{II}}{d_{III}} \cos\alpha_{III}\right)^2}, \tag{I}$$

где $\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ - углы, образуемые вектором напряженности внешнего поля с главными полуосями эллипсоида a_I, a_{II}, a_{III}; d_I, d_{II}; d_{III} - коэффициенты деполяризации эллипсоида.
Назовем зарядным коэффициентом формы отношение $a_з$ к радиусу шара, равновеликого данной нешарообразной частице по поверхности ($K_{зs} = \frac{a_з}{a_s}$) или объёму ($K_{зv} = \frac{a_з}{a_v}$). Используя (I), нетрудно получить формулы для зарядных коэффициентов формы проводящих эллипсоидов вращения. Целесообразность аппроксимации нешарообразных частиц эллипсоидами вращения обусловлена тем, что произвольное отклонение формы от эллипсоидальной при сохранении соотношения полуосей мало влияет на величину заряда [9] .

Приведем выражения зарядных коэффициентов. Для вытянутого эллипсоида вращения:
большая ось параллельна вектору напряженности поля

$$K_{зs_1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\gamma x}{\sqrt{\left(\frac{1}{2x} \ln\frac{1+x}{1-x} - 1\right)\left(1 + \frac{\gamma \arcsin x}{x}\right)}} ; \tag{2}$$

$$K_{зv_1} = \frac{\gamma^{2/3} x}{\sqrt{3\left(\frac{1}{2x} \ln\frac{1+x}{1-x} - 1\right)}} . \tag{3}$$

большая ось перпендикулярна вектору напряженности поля

$$K_{зs_2}=\frac{2x\sqrt{\gamma}}{\sqrt{3\left(1-\frac{1}{2\gamma^2 x}\ln\frac{1+x}{1-x}\right)\left(1+\frac{\gamma\arcsin x}{x}\right)}}\ ; \tag{4}$$

$$K_{зv_2}=\sqrt{\frac{2}{3}}\ \frac{x\gamma^{1/6}}{\sqrt{1-\frac{1}{2\gamma^2 x}\ln\frac{1+x}{1-x}}}\ . \tag{5}$$

Для сплюснутого эллипсоида вращения :

большая ось параллельна вектору напряженности поля

$$K_{зs_3}=\frac{2x\sqrt{\gamma}}{\sqrt{3\left(\frac{\gamma}{x}\arcsin x-1\right)\left(1+\frac{\ln\gamma(1+x)}{\gamma^2 x}\right)}}\ ; \tag{6}$$

$$K_{зv_3}=\sqrt{\frac{2}{3}}\ \frac{\gamma^{5/6}x}{\sqrt{\frac{\gamma}{x}\arcsin x-1}}\ . \tag{7}$$

большая ось перпендикулярна вектору напряженности поля

$$K_{зs_4}=\sqrt{\frac{2}{3}}\ \frac{x}{\sqrt{\left(1-\frac{\arcsin x}{\gamma x}\right)\left(1+\frac{\ln\gamma(1+x)}{\gamma^2 x}\right)}}\ ; \tag{8}$$

$$K_{зv_4}=\frac{x\gamma^{1/3}}{\sqrt{3\left(1-\frac{\arcsin x}{\gamma x}\right)}} \tag{9}$$

Здесь γ - отношение большей полуоси к меньшей; $x=\sqrt{1-1/\gamma^2}$ эксцентриситет эллипсоида.

Значения зарядных коэффициентов формы, вычисленные по приведенным формулам, даны в табл.I.

Из расчетов следует, что при ориентации малой оси по полю (неустойчивое состояние равновесия) коэффициенты $K_{зs_2}$ и $K_{зs_4}$ отличаются от единицы не более, чем на 10 - 20% во всем интервале значений γ, тогда как $K_{зv_2}$ и $K_{зv_4}$ близки к единице лишь в ограниченной области ($\gamma \leqslant$ 5 - 7). При ориентации большой оси по полю (устойчивое состояние равновесия) лишь коэффициент $K_{зs_3}$ незначительно (менее, чем на 10%) отличается от единицы, $K_{зs_1}$, $K_{зv_1}$ и $K_{зv_3}$ близки к единице лишь в ограниченной области ($\gamma <$ 2,5 ÷ 3). При любых значениях γ коэффициенты $K_{зs_1}$ и $K_{зs_3}$ меньше отклоняются от единицы, чем соответственно $K_{зv_1}$ и $K_{зv_3}$.

Под зарядно-седиментационным радиусом $a_{зс}$ будем понимать радиус шара, изготовленного из того же материала, заряжавшегося в тех же условиях и движущегося в электрическом поле с той же скоростью, что и нешарообразная частица.

Таблица 1

γ \ K_3	K_{3s_1}	K_{3v_1}	K_{3s_2}	K_{3v_2}	K_{3s_3}	K_{3v_3}	K_{3s_4}	K_{3v_4}
I,I	I,0065	I,0073	0,9967	0,9974	I,0030	I,0038	0,9938	0,9946
I,2	I,0I28	I,0I57	0,9933	0,9962	I,0054	I,0084	0,9883	0,99I3
I,4	I,0249	I,0347	0,9870	0,9964	I,0086	I,0I92	0,9788	0,9892
I,6	I,0368	I,0555	0,98I3	0,9990	I,0I03	I,03I4	0,9707	0,99II
I,8	I,0484	I,0774	0,976I	I,003I	I,0I09	I,0445	0,9636	0,9956
2,0	I,0600	I,0999	0,97I6	I,008I	I,0I08	I,0579	0,9572	I,00I8
2,5	I,0887	I,I572	0,9623	I,0228	I,0084	I,092I	0,9434	I,02I7
3,0	I,II68	I,2I4I	0,9554	I,0386	I,0046	I,I259	0,932I	I,0446
5,0	I,2227	I,429I	0,9402	I,0988	0,9886	I,2500	0,90I3	I,I396
7,0	I,3I76	I,6224	0,9334	I,I493	0,9764	I,356I	0,8833	I,2268
I0	I,443I	I,88I5	0,9287	I,2I08	0,9643	I,49I0	0,867I	I,3407
I5	I,6208	2,258I	0,9253	I,2892	0,9527	I,6739	0,8526	I,4980
20	I,772I	2,589I	0,9238	I,3498	0,9460	I,8240	0,8445	I,6284
30	2,0262	3,I66I	0,9227	I,44I8	0,9386	2,0670	0,8359	I,8408
50	2,425I	4,I256	0,92I9	I,5683	0,932I	2,4305	0,8285	2,I603
70	2,7448	4,9385	0,92I6	I,6582	0,9292	2,7092	0,8252	2,406I
I00	3,I420	5,999I	0,92I5	I,7595	0,9269	3,043I	0,8227	2,7008
$\gamma \to \infty$	$\sqrt{\frac{4\gamma}{3\pi \ln 2\gamma}}$	$\frac{\gamma^{2/3}}{\sqrt{3\ln 2\gamma}}$	$\sqrt{\frac{8}{3\pi}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}\gamma^{1/6}$	$\sqrt{\frac{8}{3\pi}}$	$\frac{2\gamma^{1/3}}{\sqrt{3\pi}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}$	$\frac{\gamma^{1/3}}{\sqrt{3}}$

Приравнивая скорости заряжённых шарообразной и нешарообразной частиц в электрическом поле, получим

$$a_{зс} = \frac{1}{12\pi\varepsilon_0 E_0} \frac{Q_{нш}}{a_{нш}} . \qquad (10)$$

Здесь ε_0 - электрическая постоянная; E_0 - напряженность электрического поля; $Q_{нш}$ - заряд нешарообразной частицы; $a_{нш}$ - некоторый размер.

Так, для эллипсоидов вращения $a_{нш} = a\kappa$, где a - экваториальная полуось; κ - коэффициент формы [I].

Назовем зарядно-седиментационным коэффициентом формы отношение $a_{зс}$ к радиусу шара, равновеликого данной нешарообразной частице по поверхности $\left(a_{зсs} = \frac{a_{зс}}{a_s}\right)$ или объему $\left(a_{зсv} = \frac{a_{зс}}{a_v}\right)$. Полагая, что при движении в электрическом поле частица ориентируется большой осью по полю и используя известные выражения для заряда [8] и коэффициентов формы [I] эллипсоидов вращения, можно получить расчетные формулы для зарядно-седиментационных коэффициентов формы вытянутых и сплюснутых проводящих эллипсоидов вращения, ориентированных при зарядке различным образом.

Для вытянутого эллипсоида вращения:

большая ось (при зарядке) параллельна вектору напряженности поля

$$K_{зсs_1} = \frac{\gamma}{2^{3/2}} \frac{(x + 1/x)\ln\gamma(1+x) - 1}{\left(\frac{1}{2x}\ln\frac{1+x}{1-x} - 1\right)\sqrt{1 + \frac{\gamma \arcsin x}{x}}} ; \qquad (11)$$

$$K_{зсv_1} = \frac{\gamma^{2/3}}{4} \frac{\left(x + \frac{1}{x}\right)\ln\gamma(1+x) - 1}{\frac{1}{2x}\ln\frac{1+x}{1-x} - 1} \qquad (12)$$

большая ось перпендикулярна вектору напряженности поля

$$K_{зсs_2} = \frac{\left(x + \frac{1}{x}\right)\ln\gamma(1+x) - 1}{\left(1 - \frac{1}{2\gamma^2 x}\ln\frac{1+x}{1-x}\right)\sqrt{2\left(1 + \frac{\gamma \arcsin x}{x}\right)}} ; \qquad (13)$$

$$K_{зсv_2} = \frac{\left(x + \frac{1}{x}\right)\ln\gamma(1+x) - 1}{2\gamma^{1/3}\left(1 - \frac{1}{2\gamma^2 x}\ln\frac{1+x}{1-x}\right)} . \qquad (14)$$

Для сплюснутого эллипсоида вращения:

большая ось параллельна вектору напряженности поля

$$K_{3cs_3} = \frac{1}{2^{3/2}} \frac{\gamma\left(\frac{1}{x}+2x\right) arctg\sqrt{\gamma^2-1}-1}{\left(-1+\frac{\gamma}{x} arcsin x\right)\sqrt{1+\frac{\ln\gamma(1+x)}{\gamma^2 x}}}; \tag{I5}$$

$$K_{3cv_3} = \frac{\gamma^{1/3}}{4} \frac{\gamma\left(\frac{1}{x}+2x\right) arctg\sqrt{\gamma^2-1}-1}{-1+\frac{\gamma}{x} arcsin x}. \tag{I6}$$

Большая ось перпендикулярна вектору напряженности поля

$$K_{3cs_4} = \frac{\gamma\left(\frac{1}{x}+2x\right) arctg\sqrt{\gamma^2-1}-1}{2^{5/2}\gamma\left(1-\frac{arcsin x}{\gamma x}\right)\sqrt{1+\frac{\ln\gamma(1+x)}{\gamma^2 x}}}; \tag{I7}$$

$$K_{3cv_4} = \frac{1}{8\gamma^{2/3}} \frac{\gamma\left(\frac{1}{x}+2x\right) arctg\sqrt{\gamma^2-1}-1}{1-\frac{arcsin x}{\gamma x}}. \tag{I8}$$

Значения зарядно-седиментационных коэффициентов формы приведены в табл.2. Из расчетов следует, что,если частица при зарядке ориентируется малой осью по полю (неустойчивое состояние равновесия), то в широком интервале значений γ коэффициенты K_{3cv_2} и K_{3cs_4} сравнительно мало (не более, чем на I0 - 20%) отличаются от единицы. Если частица при зарядке ориентируется большой осью по полю (устойчивое состояние равновесия), то во всем интервале значений γ выполняется неравенство $K_{3cv_i} > K_{3cs_i}$, где i =I; 3. Коэффициент K_{3cs_3} отличается от единицы менее, чем на I0% во всем интервале значений γ ;коэффициенты K_{3cs_1}, K_{3cv_1}, K_{3cs_3} близки к единице лишь при $\gamma < 2$.

Если принять, что частицы при зарядке ориентируются большой осью по полю, что соответствует устойчивому состоянию равновесия, то на основании данных,приведенных в табл. I и 2,можно сделать следующие выводы.

Применение электрофизических методов измерения параметров аэрозолей, основанных на зарядке частиц в поле коронного разряда, наиболее целесообразно в случае изометрических частиц и частиц пластинчатой формы (сплюснутых эллипсоидов). Измерение зарядов отдельных частиц или всей совокупности позволяет (см. столбец значений K_{3c_3} в табл. I) с незначительной погрешностью определять размер a_s или суммарную поверхность взвешенных частиц.

Таблица 2

γ \ $K_{зc}$	$K_{зcs_1}$	$K_{зcv_1}$	$K_{зcs_2}$	$K_{зcv_2}$	$K_{зcs_3}$	$K_{зcv_3}$	$K_{зcs_4}$	$K_{зcv_4}$
I,I	I,0260	I,0268	I,0060	I,0068	I,0I24	I,0I32	0,9939	0,9947
I,2	I,0507	I,0538	I,0I08	I,0I37	I,0230	I,026I	0,9886	0,99I6
I,4	I,0973	I,I077	I,0I76	I,0272	I,040I	I,05II	0,9797	0,9900
I,6	I,I406	I,I6I2	I,02I7	I,0402	I,053I	I,075I	0,9723	0,9926
I,8	I,I8I4	I,2I4I	I,0240	I,0523	I,0630	I,0983	0,9659	0,9979
2,0	I,2202	I,266I	I,0250	I,0636	I,0706	I,I206	0,960I	I,0049
2,5	I,3I0I	I,3925	I,0236	I,0880	I,083I	I,I730	0,9480	I,0267
3,0	I,3924	I,5I38	I,0I90	I,I078	I,0897	I,22I3	0,9380	I,05I3
5,0	I,674I	I,9566	0,9897	I,I568	I,0956	I,3853	0,9I07	I,I5I5
7,0	I,9089	2,3504	0,958I	I,I797	I,093I	I,5I82	0,8945	I,2423
I0	2,2099	2,88I2	0,9I5I	I,I932	I,088I	I,6824	0,8798	I,3603
I5	2,6292	3,663I	0,8570	I,I940	I,08I9	I,90I0	0,8665	I,5224
20	2,9855	4,36I8	0,8II4	I,I855	I,0779	2,0784	0,859I	I,6565
30	3,5860	5,6034	0,7436	I,I620	I,073I	2,363I	0,85II	I,8743
50	4,54II	7,7253	0,6562	I,II63	I,0686	2,7863	0,8443	2,20I4
70	5,3I82	9,5686	0,5996	I,0788	I.0665	3,I096	0,84I2	2,4527
I00	6,2976	I2,0245	0,54I7	I,0343	I,0649	3,4959	0,8388	2,7539
$\gamma \to \infty$	$\sqrt{\frac{\gamma}{\pi}}$	$\frac{\gamma^{2/3}}{2}$	$\frac{2\ln 2\gamma}{\sqrt{\pi\gamma}}$	$\frac{\ln 2\gamma}{\gamma^{1/3}}$	$\frac{3}{2^{3/2}}$	$\frac{3}{4}\gamma^{1/3}$	$\frac{3\pi}{8\sqrt{2}}$	$\frac{3\pi}{16}\gamma^{1/3}$

При седиментации заряженных частиц в электростатическом поле происходит их классификация (во времени или в пространстве – в зависимости от способа седиментации) по группам частиц равной поверхности. Границы фракций с погрешностью менее 10% (см. столбец значений $K_{зcs_з}$ в табл.2) определяются значениями a_s, а измерение зарядов фракций позволяет определить распределение поверхности по размерным группам.

Определение размера a_v, нахождение распределения объема (массы) частиц по размерным группам, а также измерение любых параметров частиц игольчатой формы (вытянутых эллипсоидов) сопряжены со значительно более высокой погрешностью и требуют знания априорных статистических данных о значении коэффициента γ для введения поправочных коэффициентов.

Литература

1. Ф у к с Н.А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
2. И з м а й л о в Г.А. Устройство для непрерывного измерения запыленности газов. Авт. свидетельство № 113558. Бюлл. изобр. № 6, 1958.
3. *Whitby K.T., Clark W.E., Electric aerosol particle counting and size distribution measuring system for the 0.015 to 1μ size range, Tellus, 18, 573, 1966.*
4. Т у р у б а р о в В.И., П о д о л ь с к и й А.А., К а л а к у т с к и й Л.И., Л о г в и н о в Л.М. и др. Высокочувствительный прибор для непрерывного измерения запыленности биосферы.–В сб.: Физические методы и вопросы метрологии биомедицинских измерений. II Всесоюзный семинар. М., 1972, с. 288.
5. Л о г в и н о в Л.М., П о д о л ь с к и й А.А., Ф а д е е в В.В. Прибор ЭИП–5 для фракционного анализа грубодисперсных аэрозолей. Заводская лаборатория, т.40, 1974, №2, с.202.
6. К а л а к у т с к и й Л.И., М а л ы г и н Н.А., П о д о л ь с к и й А.А., С о р о к и н В.В. Полуавтоматическая установка для анализа дисперсионного состава порошков. Труды ВНИИнеруд, Тольятти. Вып. 39, с.75, 1974.
7. *Pauthenier M.M, Moreau-Hanot M., La charge des particules spheriques dans un champ ionise, Phys et le Radium, 3, N 7, 590, 1932.*
8. М и р з а б е к я н Г.З., П а ш и н М.М. Зарядка несферических частиц аэрозолей в поле коронного разряда.–В сб.: Сильные электрические поля в технологических процессах. М., "Энергия". Вып. 2, с. 48, 1971.
9. *Smith P.L., Penney G.W., The charging of nonspherical particles in a corona discharge, AIEE Trans, 55, 340, 1961.*