

Л. И. КАЛАКУТСКИЙ, А. А. ПОДОЛЬСКИЙ

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОПРЕЦИПИТАЦИОННОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА АЭРОЗОЛЯ

Электропреципитационный метод (ЭПМ) основан на предварительной зарядке частиц в поле коронного разряда и последующем осаждении заряженных частиц в электрическом поле. Поскольку эти операции приводят к пространственному разделению аэрозольных частиц по фракциям, то измерение дисперсного состава сводится к простому подсчету под микроскопом числа частиц, осевших на подложках, установленных вдоль линии движения аэрозоля в осадительном конденсаторе. Хотя ЭПМ и получил довольно широкое распространение в технике физического эксперимента [1], дальнейшее его внедрение в практику исследовательских и заводских лабораторий задерживается неполным совпадением результатов теоретического исследования и экспериментальной проверки и их полной повторяемостью для различных материалов. До сих пор получение высококачественных результатов при использовании ЭПМ зависит в большей степени от искусства экспериментатора, нежели от точности инженерного расчета. В значительной степени это объясняется неполнотой учета факторов, влияющих на процессы зарядки и осаждения частиц в электрическом поле. Целью настоящей статьи и является исследование некоторых факторов, обуславливающих погрешность ЭПМ при измерении дисперсного состава грубодисперсных аэрозолей.

1. Влияние разброса зарядов частиц

Из выражения для координаты осаждения заряженной частицы в электрическом поле конденсатора [2] нетрудно получить следующую зависимость между величиной Δq , определяющей разброс зарядов одинаковых частиц, и относительной погрешностью координаты осаждения:

$$\frac{\Delta X_{\text{ос}}}{X_{\text{ос}}} = \frac{\Delta q}{q} \quad (1)$$

Разброс зарядов частиц на входе в осадительный конденсатор обусловлен, во-первых, условиями в зарядной камере и, во-вторых, наличием собственных зарядов на частицах до входа в зарядную камеру. Благодаря успехам в конструировании зарядных устройств [3] влиянием первого фактора можно пренебречь.

Рассмотрим влияние второго фактора. При наличии начального заряда $\pm q_0$ величина заряда, приобретаемого частицей в течение времени t пребывания в зарядной камере, может быть подсчитана по формуле, представляющей видоизменение известной формулы Потенье:

$$q = q_{\text{пр}} \frac{\frac{t}{\tau} \left(1 \pm \frac{q_0}{q_{\text{пр}}}\right) \pm \frac{q_0}{q_{\text{пр}}}}{\frac{t}{\tau} \left(1 \pm \frac{q_0}{q_{\text{пр}}}\right) + 1}, \quad (2)$$

где τ — постоянная времени зарядки камеры,

$q_{\text{пр}}$ — предельный заряд частицы.

Из формулы (2) следует, что чем меньше время пребывания частиц в зарядной камере, тем жестче требования к разбросу начальных зарядов. Так, например, если принять $\frac{\Delta q}{q} = 0,1$, то при

$\frac{t}{\tau} = 3$ допустимое изменение $\frac{q_0}{q_{\text{пр}}}$ лежит в пределах $(-0,5; +0,4)$,

а при $\frac{t}{\tau} = 1$ — в пределах $\pm 0,2$. Таким образом, при конструировании

зарядного устройства необходимо учитывать возможный разброс начальных зарядов. Трудность заключается в том, что распределение зарядов на частицах зависит от многочисленных факторов [4]: способа получения аэрозоля, концентрации и дисперсного состава частиц, климатических условий, конструкции заборного устройства и т. п. Авторами был исследован разброс зарядов монодисперсных спор ликоподия, вытягиваемых в измерительный преципитатор [5] из кипящего слоя через медную трубочку длиной 110 мм и внутренним диаметром 0,8 мм. Величины зарядов частиц оценивались по координате осаждения в поле плоского конденсатора, распределение количества частиц по подложке определялось фотометрированием. Исследование показало, что распределение собственных зарядов частиц близко к симметричному, а наиболее вероятное значение заряда каждого знака ($\sim 1,2 \cdot 10^{-15}$ К) — составляет 20% от предельного заряда при напряженности поля $E_0 = 1,5 \cdot 10^5$ в/м. Отсюда следует, что для устранения разброса координаты осаждения одинаковых частиц, обусловленного распределением начальных зарядов, желательно создавать в зарядном устройстве поле напряженностью $(3 \div 5) \cdot 10^5$ в/м и по возможности увеличивать время пребывания частиц в зарядной камере.

2. Влияние геометрии системы

Нестабильность координаты входа частиц в осадительный конденсатор, обусловленная конечным диаметром впускного патрубка, а также конечная ширина подложки приводят к уширению дисперсного состава частиц, осевших на каждой подложке. Оценим роль этих факторов. При произвольной геометрической конфигурации осадительного конденсатора координата осаждения заряженной частицы радиуса a определяется следующим выражением [2]:

$$X_{oc} = \frac{A}{a} F_1(l, r_1, r_2, \dots), \quad (3)$$

где A — постоянная, зависящая от напряженности поля в зарядной и осадительной камерах, времени зарядки, материала частицы и скорости прокачки воздуха через прибор;
 $F_1(l, r_1, r_2, \dots)$ — функция параметров r_1, r_2, \dots , определяемых геометрией конденсатора, и расстояния l между впускным патрубком и осадительной пластиной.

Полагая, что дисперсный состав частиц на подложке, установленной при $x = x_{oc}$, зависит только от ширины b подложки и диаметра d_0 впускного патрубка, из (3) получим:

$$\frac{da}{a} = \frac{dX_{oc}}{X_{oc}} + \frac{1}{F_1} \frac{\partial F}{\partial l} dl. \quad (4)$$

С другой стороны, из (3) можно получить выражение для относительной погрешности координаты осаждения монодисперсных частиц, обусловленной конечным диаметром впускного патрубка:

$$\frac{dX'_{oc}}{X'_{oc}} = \frac{1}{F_1} \frac{\partial F_1}{\partial l} dl. \quad (5)$$

Из сопоставления (4) и (5) следует:

$$\frac{da}{a} = \frac{dX_{oc}}{X_{oc}} + \frac{dX'_{oc}}{X'_{oc}}. \quad (6)$$

Переходя от дифференциалов к конечным приращениям и полагая $X_{oc} = X'_{oc}$ и $b = \Delta X'_{oc}$, из (6) находим:

$$\frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{\Delta X'_{oc}}{X'_{oc}}. \quad (7)$$

Таким образом, для определения относительной ширины дисперсного состава $\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$ на каждой подложке, обусловленной шириной подложки и диаметром впускного патрубка, достаточно оценить относительную погрешность координаты осаждения монодисперсных частиц вследствие одной, последней, причины. Оценка этой величины выполняется по формулам, приведенным ниже [2].

Геометрия осадительной системы	$\frac{\Delta X'_{oc}}{X'_{oc}}$
Плоский конденсатор	$\frac{d_0}{h} \frac{3}{\frac{1}{2} \left(\frac{h}{l} + 1 \right) - \frac{l}{h}}$
Цилиндрический конденсатор с осаджением на внешнюю обкладку	$\frac{d_0}{h} \frac{H_1}{\frac{1}{4} (K^2 - 1)^2 + H_2}$
Цилиндрический конденсатор с осаджением на внутреннюю обкладку	$\frac{d_0}{h} \frac{H_1}{\frac{1}{2} K^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{K^4}{m^4} + 1 \right) + H_3}$

Примечание. Здесь h — расстояние между пластинами конденсатора; R_1, R_2 — радиусы внутренней и внешней обкладок цилиндрического конденсатора; r_0 — радиальная координата входа частиц в цилиндрический конденсатор; $m = \frac{R_2}{R_1}$; $K = \frac{R_2}{r_0}$;

$$H_1 = K \left(1 - \frac{1}{m} \right) \left[K^2 - 1 - \frac{K^2 (1 - m^2)}{\ln m} \ln K \right];$$

$$H_2 = \frac{K^2 (1 - m^{-2})}{\ln m} \left[\frac{1}{2} \ln K - \frac{1}{4} (K^2 - 1) \right];$$

$$H_3 = \frac{K^2 (1 - m^{-2})}{\ln m} \left[-\frac{1}{2} \ln K + \frac{1}{4} \left(\frac{K^2}{m^2} - 1 \right) \right].$$

Расчеты показали, что наименьшая относительная погрешность, которую для сравнения систем с различной геометрией удобно определять величиной $S = \left(\frac{\Delta X'_{oc}}{X'_{oc}} / \frac{d_0}{h} \right)$, достигается при использовании в качестве осадительной камеры цилиндрического конденсатора и при осаджении частиц на внешний цилиндр. Так, например, при $\frac{R_2}{R_1} = 5$ и $\frac{h}{l} = 8$ величина S составляет 0,44 при осаджении на внешний цилиндр и 0,90 при осаджении на внутренний цилиндр (для плоского конденсатора $S = 0,18$). Для минимизации погрешности целесообразно выбирать $\frac{h}{l}$ порядка $8 \div 10$ и $\frac{R_2}{R_1}$ порядка $5 \div 10$.

3. Влияние формы частиц

В аэрозолях промышленного происхождения частицы, как правило, имеют несферическую форму, поэтому представляет

интерес оценить влияние формы на погрешность электропреципитационного способа. Этот вопрос достаточно просто решается в случае замены реальных частиц «вытянутыми и сплюснутыми эллипсоидами вращения. Полагая, что при зарядке и осаждении частица ориентируется большой осью по полю [6], и ограничиваясь исследованием движения частиц в поле плоского конденсатора, получим:

$$X_{oc} = X_{oc}^{(0)} \varphi(\beta),$$

где X_{oc} — координата осаждения несферической частицы с соотношением большой и малой полуосей β ;

$X_{oc}^{(0)}$ — координата осаждения эквивалентного по площади поверхности ($S = \text{const}$) или по объему ($V = \text{const}$) шара;

$\varphi(\beta)$ — коэффициент, значение которого для различных случаев приведено в таблице 1.

Таблица 1

S=const	Вытянутый эллипсоид вращения	$2^{3/2} \frac{[\beta \ln(\beta + \gamma) - \gamma]}{[(2\beta^2 - 1) \ln(\beta + \gamma) - \beta\gamma]} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{\gamma} \arcsin \frac{\gamma}{\beta}}$
	Сплюснутый эллипсоид вращения	$2^{3/2} \frac{\beta \left[\gamma^2 - \beta \left(1 - \frac{1}{\gamma} \arcsin \frac{\gamma}{\beta} \right) \right]}{\left[\frac{\beta(3\beta^2 - 2)}{\gamma} \arcsin \frac{\gamma}{\beta} - \beta \right]} \sqrt{1 + \frac{\ln(\beta + \gamma)}{\beta\gamma}}$
V=const	Вытянутый эллипсоид вращения	$4 \frac{[\beta \ln(\beta + \gamma) - \gamma]}{[(2\beta^2 - 1) \ln(\beta + \gamma) - \beta\gamma]} \beta^{1/3}$
	Сплюснутый эллипсоид вращения	$4 \frac{\left[\gamma^2 - \beta^2 \left(1 - \frac{1}{\gamma} \arcsin \frac{\gamma}{\beta} \right) \right]^{4/3}}{\left[\frac{\beta(3\beta^2 - 2)}{\gamma} \arcsin \frac{\gamma}{\beta} - \beta \right]^{4/3}}$

Примечание: В табл. 1 $\gamma = \sqrt{\beta^2 - 1}$

Результаты расчетов безразмерной координаты осаждения $\varphi(\beta)$ представлены в виде графиков на рис. 1. Из графиков следует, что для сплюснутых эллипсоидов вращения с равновеликой поверхностью относительный разброс координаты осаждения, обусловленный изменением β , не превышает 10%. Для вытянутых эллипсоидов погрешность может превышать 50%. Однако если форма частиц (соотношение полуосей) меняется в ограниченных пределах, то погрешность может быть значительно снижена предварительной калибровкой.

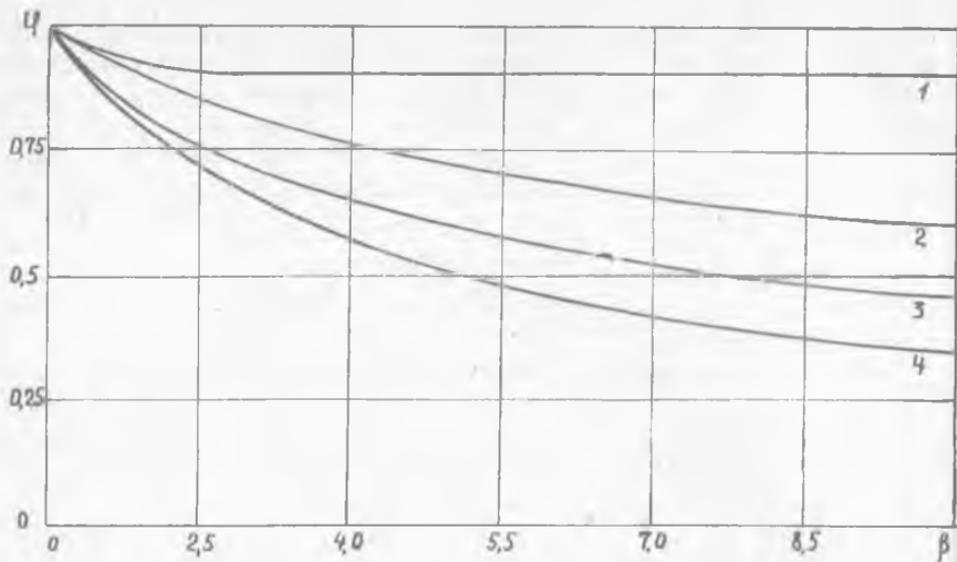


Рис. 1. Зависимость безразмерной координаты осаждения от соотношения полуосей:

1, 2—для сплюснутых эллипсоидов с равновеликой поверхностью и объемом соответственно; 3, 4—для вытянутых эллипсоидов с равновеликой поверхностью и объемом.

Кроме того, графики показывают, что ЭПМ наиболее удобен, если при измерении фракционного состава реальные частицы заменяются эквивалентными по площади поверхности сферическими; при таком варианте обработки относительная погрешность минимальна.

4. Исследование осаждения частиц в вертикальном стенде

Экспериментальные исследования производились на вертикальном стенде, конструкция которого схематически представлена на рис. 2. Стенд выполнен в виде трубы прямоугольного сечения (70×25) мм и включает в себя зарядное устройство, осадительную камеру, ламинаризирующие решетки и фильтр. Ламинаризирующие решетки 1, 9 представляют собой набор медных трубок длиной 50 мм и диаметром 4 мм. Впуск аэрозоля осуществляется через удлиненную трубочку 2, подключенную непосредственно к генератору аэрозоля. Зарядное устройство состоит из секции коронного разряда 3 и зарядной камеры 4, разделенных сетчатой перегородкой. При подаче постоянного напряжения (3—5) кВ на электроды камеры 3 в ней возникает отрицательный коронный разряд. На электроды камеры 4 подается синусоидальное напряжение амплитудой (3—5) кВ; самостоятельный разряд в ней не возникает; ток обусловлен ионами, поступающими через общий электрод из камеры 3 в нечетные полупериоды. Такая конструкция обеспечивает постоянство напряженности электрического поля и концентрации ионов в се-

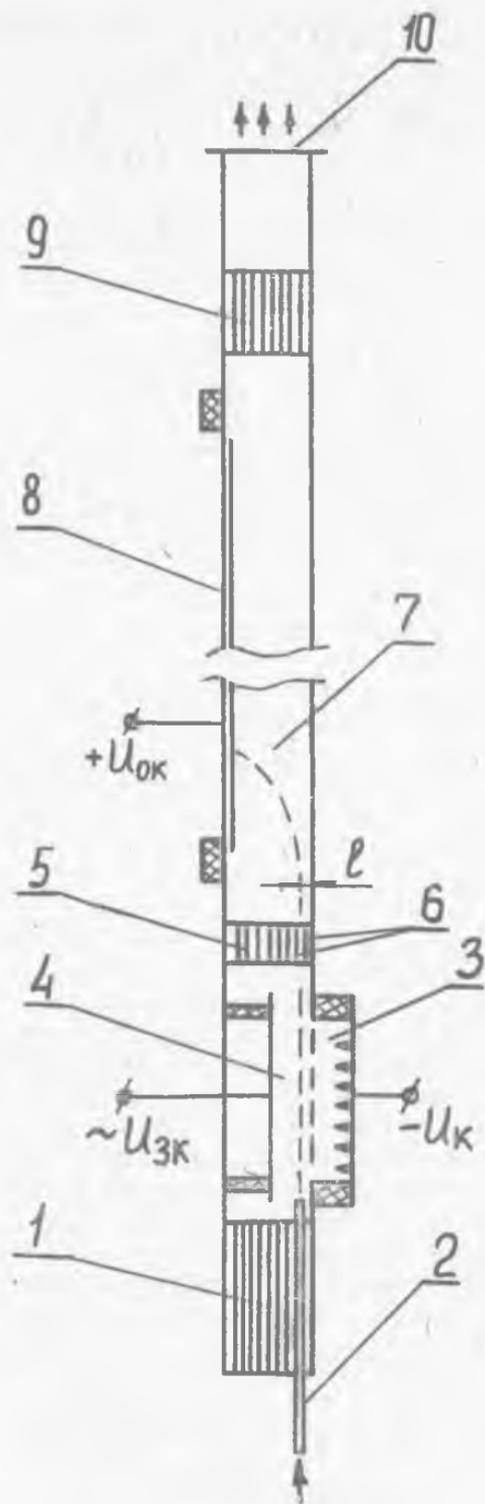


Рис. 2. Схема стенда

чении зарядной камеры и устраняет осаждение частиц в процессе зарядки [3]. Фильтр 5 состоит из набора металлических пластин, между которыми поддерживается постоянное напряжение. Между двумя соседними пластинами 6 напряжение отсутствует, тем самым фиксируется координата l входа заряженных частиц в осадительную систему [7]. Осадительная система 7 представляет собой плоский конденсатор, между пластинами которого поддерживается постоянное напряжение (в большинстве опытов 4 кВ). На съемной левой обкладке установлена подложка (из триацетатной пленки), на которую выседают частицы. Прокачивание воздуха и аэрозоля через устройство производится с помощью пылесоса, подключенного к патрубку 10.

Методика проведения опытов заключалась в следующем. Первоначально, при отключенных источниках питания через трубочку 2 пропускали табачный дым и, увеличивая расход воздуха через преципитатор, визуально определяли максимальную скорость потока, при которой еще сохраняется ламинарный характер течения. Выяснилось, что в данной конструкции турбулентность возникает при $U_{max} 0,8 \div 0,9$ м/сек. Затем подавалось напряжение на электроды зарядного устройства и по характеру течения дыма через зарядную секцию определялось допустимое значение постоянной составляющей тока I_3 в зарядной секции, при котором можно было пренебречь влиянием ионного ветра; оно оказалось равным 1,5 мкА. После определения параметров стенда были проведены 2 серии опытов с грубодисперсными аэрозолями (в первой серии распыляли споры ликоподия, во второй — порошок электрокорунда). Для распыления частиц применялся генератор аэрозоля с кипящим слоем.

Во время каждого опыта фиксировались напряжения на всех электродах, ток в зарядной секции, скорость воздуха и продолжительность пробоотбора. По окончании опыта осадительная подложка извлекалась и производилось фотографирование отдельных участков под микроскопом. Затем изображение с негатива проектировалось на экран проекционной установки 5ПО-1 и, в соответствии с рекомендациями [8], находилась гистограмма дисперсного состава частиц, осевших на каждом участке подложки. При этом размер частицы определялся как среднее арифметическое значение ее минимального и максимального размеров.

Опыты со спорами ликоподия, проводившиеся при различных скоростях и напряжениях в осадительной камере, показали очень хорошее согласие между экспериментальным и расчетным значением средней координаты осаждения. Однако величина разброса значительно превышала расчетную ($\frac{\Delta X_{ос}}{X_{ос}}$ составляло от 20% до 50%). Относительно хорошие результаты наблюдались только при очень низкой концентрации частиц и малом времени экспозиции. Попытки уменьшить относительный разброс существенного успеха не имели.

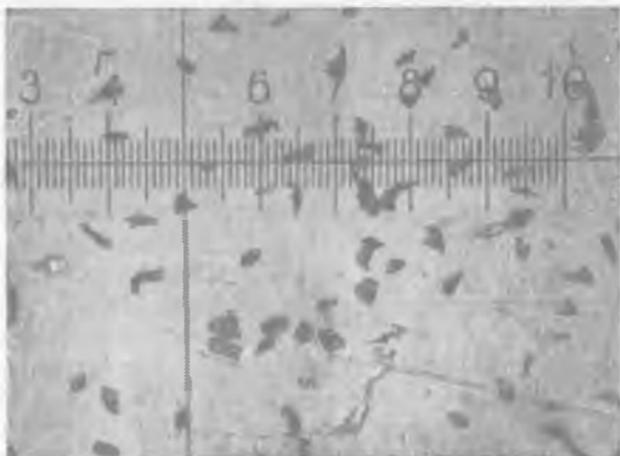


Рис. 3. Образец микрофотографии осадительной подложки

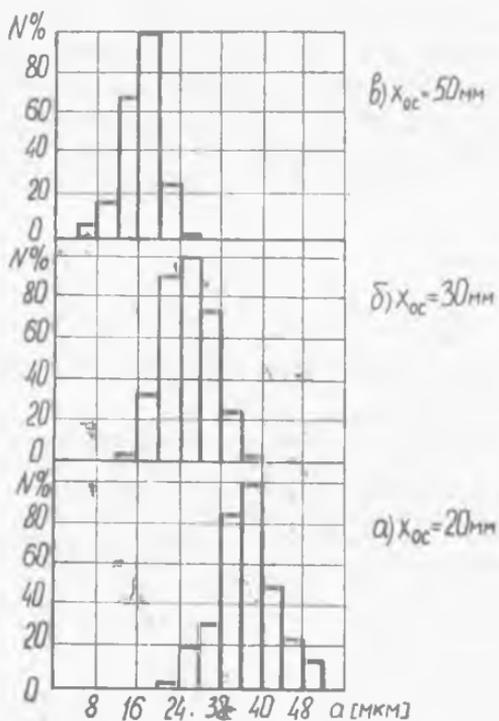


Рис. 4. Гистограммы различных точек осадительной подложки

Во второй серии опытов — с порошком электрокорунда — проверялась возможность электрического разделения промышленных аэрозолей по дисперсному составу. Опыты в основном дали положительный ответ на поставленный вопрос. Это подтверждается образцами микрофотографий и гистограмм для различных участков осадительной подложки, приведенных на рис. 3 и 4 соответственно. Здесь также было проведено сопоставление вычисленных и экспериментальных значений координаты осаждения. При расчетах учитывалось влияние силы тяжести на траекторию движения частицы, а также замедление скорости зарядки частиц в переменном электрическом поле. Во всех опытах наблюдалось удовлетворительное согласие теории и эксперимента. Так для участка 1 (рис. 4а $X_{oc}=20$ мм) теоретическое значение координаты осаждения для частиц с наиболее вероятным размером $a_1=39$ мкм составило $X_1=17$ мм; для участка 2 (рис. 4б $X_{oc}=30$ мм) для $a_2=25$ мкм, $X_2=36$ мм; для участка 3 (рис. 4в $X_{oc}=50$ мм) для $a_3=16$ мкм, $X_3=63$ мм. Следует заметить, что относительно большой удельный вес «боковых лепестков» на гистограммах обусловлен наличием вытянутых частиц, координата осаждения которых (см. рис. 1) меньше координаты осаждения равновеликих сфер. При другом методе обработки осадка, например, при классификации частиц по максимальному размеру уровень «боковых лепестков» уменьшается.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшей работы по усовершенствованию ЭПМ с целью дисперсионного анализа промышленных аэрозолей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грин Х., Лейн В., Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Изд-во «Химия», Л., 1969.
2. Калакутский Л. И., Подольский А. А. Труды вузов Поволжья, вып. 7, 1972.
3. Hewitt G. W. AIEETrans., vol. 76, 1957.
4. Леб Л. Статическая электризация. Госэнергоиздат, 1963.
5. Gillespie T., Langstroth G., Canad. J. Chem. 30, 1056, 1952.
6. Smith P., Penney G. AIEETrans., 55, 340, 1961.
7. Сергиева А. П. Изв. АН СССР, Сер. геофиз., 1958.
8. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов, Изд-во Химия, Л., 1971.