

## О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА АЭРОЗОЛЯ ДВУПОЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ПРЕЦИПИТАТОРОМ

При измерении дисперсного состава с помощью двупольного электропреципитатора заряженные аэрозольные частицы входят в осадительную камеру, выполненную в виде конденсатора, и под действием электрической силы оседают на одной из его пластин. Зарядка частиц осуществляется в камере коронного разряда и так как одинаковые частицы приобретают равные заряды, то при постоянной координате входа координата осаждения является функцией размера частицы. В результате дисперсный состав может быть определен простым подсчетом числа частиц, осевших на подложках, установленных в конденсаторе вдоль линии движения аэрозоля [1, 2, 3]. Поскольку вход аэрозоля осуществляется через патрубок конечного поперечного сечения, то в реальных условиях неизбежен разброс координаты входа частиц, что влечет за собой разброс координаты осаждения и, следовательно, погрешность измерения дисперсного состава. Целью настоящей работы является исследование влияния геометрического фактора (формы осадительной камеры и различных размеров) на погрешность измерения дисперсного состава аэрозоля. Качественно это влияние наблюдалось [3], но аналитического определения оптимальных соотношений не проводилось.

Движение взвешенной сферической аэрозольной частицы в поле плоского конденсатора при наличии вертикального градиента скоростей потока (рис. 1) может быть записано [4] так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{\text{ч}} \frac{dV_x}{dt} &= 2\pi a^3 \rho V_y \frac{\partial U}{\partial y} + 6\pi \eta a (U - V_x) \\ \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{\text{ч}} \frac{dV_y}{dt} &= 2\pi a^3 \rho (U - V_x) \frac{\partial U}{\partial y} - 6\pi \eta a V_y + F_{\text{эл}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $a$  — радиус частицы плотностью  $\rho_{\text{ч}}$ ;  
 $V_x, V_y$  — компоненты скорости частицы;  
 $\rho, \eta$  — соответственно плотность и вязкость среды;  
 $U$  — скорость потока, направленного вдоль оси  $OX$ .

Для оценки нелинейных членов системы (1) составим отношения  $N_1$  и  $N_2$

$$N_1 = \frac{2\pi \rho a^3 V_y \frac{\partial U}{\partial y}}{6\pi \eta a (U - V_x)} = \frac{1}{3} \frac{a^2}{\nu} \frac{Re(y) \partial U}{Re(x) \partial y},$$

$$N_2 = \frac{2\pi r a^3 (U - V_x) \frac{\partial U}{\partial y}}{6\pi \eta a V_y} = \frac{1}{3} \frac{a^2}{\nu} \frac{Re(x) \partial U}{Re(y) \partial y},$$

где  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  — кинематическая вязкость среды;

$Re(y) = \frac{2a^p V_y}{\nu}$ ,  $Re(x) = \frac{2a(U - V_x)}{\nu}$  — числа Рейнольдса для движения частицы вдоль осей  $OY$  и  $OX$  соответственно.

В условиях измерительных преципитаторов соблюдаются соотношения

$$Re(y) \ll 1; Re(x) \ll 1; 0,1 \leq \frac{Re(x)}{Re(y)} \leq 10; \frac{\partial U}{\partial y} < \frac{1}{50} \text{ сек.}$$

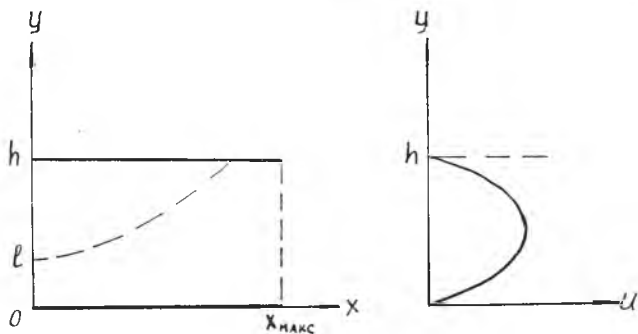


Рис. 1. Осаждение частиц в плоском конденсаторе. Профиль скоростей потока

Полагая  $a \leq 20$  мкм, получим,  $N_1 < 5 \cdot 10^{-3}$  и  $N_2 < 5 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом нелинейные члены в уравнении (1) могут быть при анализе отброшены без существенной ошибки. Для линеаризованной системы уравнений, как показал Н. А. Фукс [5], можно пренебречь также и инерциальными членами, поскольку время установления движения аэрозольных частиц в силовых полях очень мало (единицы — десятые доли миллисекунды). Обобщая полученные результаты на случай цилиндрического конденсатора, произведем расчет траекторий аэрозольных частиц в измерительных камерах преципитаторов, используя линеаризованную систему уравнений без инерциальных членов.

#### 1. Плоский конденсатор.

С учетом принятых допущений траектория частицы в поле плоского конденсатора определяется:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{6\pi \eta a}{qE} U(y), \quad (2)$$

где  $q$  — заряд частицы;  $E$  — напряженность электрического поля.

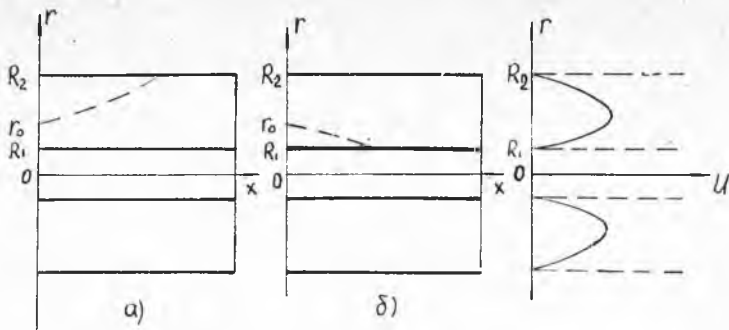


Рис. 2. Цилиндрический конденсатор: а — осаждение на внешний цилиндр; б — осаждение на внутренний цилиндр

Поле скоростей ламинарного потока между двумя параллельными плоскостями описывается параболическим законом [6]

$$U(y) = \frac{6M}{h^3} (yh - y^2), \quad (3)$$

где  $M$  — расход воздуха на единицу ширины конденсатора;  $h$  — расстояние между пластинами конденсатора.

Подставляя (3) в (2), найдем координату осаждения частицы

$$X_{oc} = \frac{12M\pi\eta a}{h^3 qE} (h - l) l^2 \left[ \frac{h}{2l} \left( \frac{h}{l} + 1 \right) - 1 \right], \quad (4)$$

где  $l$  — ордината входа частицы в плоский конденсатор.

Для нахождения абсолютной погрешности координаты осаждения, обусловленной разбросом координаты входа  $l$ , продифференцируем выражение (4) по  $l$

$$dX_{oc} = \frac{36M\pi\eta a}{h^3 qE} l(h - l) dl \quad (5)$$

Заменяя дифференциалы конечными разностями и деля (5) на (4), получим окончательное выражение для расчета относительной погрешности координаты осаждения:

$$\frac{\Delta X_{oc}}{X_{oc}} = \frac{\Delta l}{h} \cdot \frac{3}{2 \left( \frac{h}{l} + 1 \right) - \frac{l}{h}} \quad (6)$$

## 2. Цилиндрический конденсатор.

Траектория частицы в поле цилиндрического конденсатора (рис. 2) определяется уравнением

$$\frac{dx}{dr} = \frac{U(r)}{qE(r)} 6\pi\eta a, \quad (7)$$

где

$$E(r) = \frac{U_{\text{эл}}}{r \ln \frac{R_2}{R_1}};$$

$r$  — радиальная координата входа;

$R_1/R_2$  — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров соответственно;

$U_{\text{эл}}$  — разность потенциалов между цилиндрами.

Поле скоростей  $U(r)$  ламинарного течения в трубе с кольцевым сечением определяется [6, 7] так:

$$U(r) = \frac{M}{2\pi} \frac{\left\{ R_2^2 - r^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{r}{R_2} \right\}}{\frac{R_2^4}{4} - \frac{R_1^4}{4} - \frac{1}{4} \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}}} \quad (8)$$

Интегрируя (7) с учетом (8), после несложных преобразований получим окончательные формулы для расчета относительной погрешности координаты осаждения.

$$\frac{\Delta X_{\text{ос}}}{X_{\text{ос}}} = \begin{cases} \frac{\Delta r}{h} f_1, (R_1, R_2, r_0) - \text{осаждение на внутренний цилиндр,} \\ \frac{\Delta r}{h} f_2, (R_1, R_2, r_0) - \text{осаждение на внешний цилиндр,} \end{cases} \quad (9)$$

где  $h = R_2 - R_1$ ;

$$f_1 = \frac{\left\{ R_2^2 - r_0^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{r_0}{R_2} \right\} (R_2 - R_1) r_0}{\left\{ \frac{R_2^2}{2} (r_0 - R_1^2) - \frac{r_0^4 - R_1^4}{4} + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \left[ \frac{R_1^2}{2} \ln \frac{R_2}{R_1} - \frac{r_0^2}{2} \ln \frac{R_2}{r_0} + \frac{R_1^2 - r_0^2}{4} \right] \right\}};$$

$$f_2 = \frac{r_0 \left\{ R_2^2 - r_0^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{r_0}{R_2} \right\}}{\frac{1}{4} \frac{(R_2^2 - r_0^2)^2}{R_2 - R_1} + \frac{R_2 + R_1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \left[ \frac{r_0^2}{2} \ln \frac{R_2}{r_0} - \frac{1}{4} (R_2^2 - r_0^2) \right]}.$$

По формулам (6) и (9) были произведены расчеты на ЭВМ «Проминь». Результаты расчетов в виде графиков представлены на рис. 3. Здесь по оси ординат отложена величина  $S$  ( $S = \frac{\Delta X_{\text{ос}}}{X_{\text{ос}}} / \frac{\Delta l}{h}$  в случае плоского конденсатора и  $S = \frac{\Delta X_{\text{ос}}}{X_{\text{ос}}} / \frac{\Delta r}{h}$  в случае цилиндрического конденсатора). По оси абсцисс отложена величина  $\frac{h}{l}$ ,

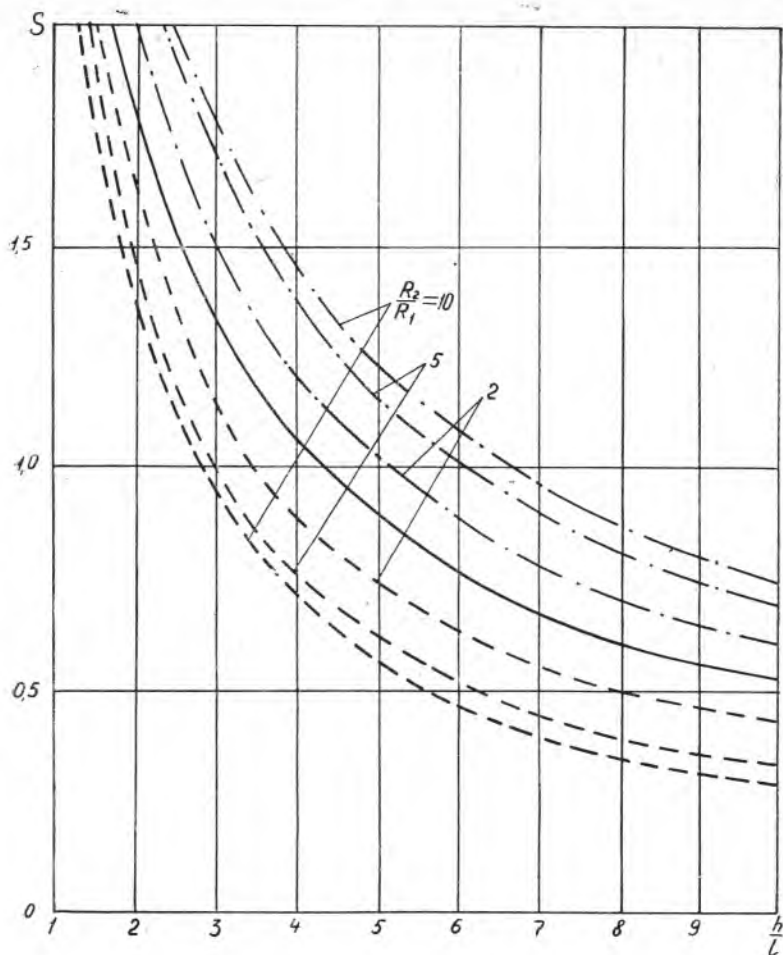


Рис. 3. Зависимость величины  $S$  от отношения  $\frac{h}{l}$  для случая плоского (сплошная кривая) и цилиндрического конденсатора (пунктирные кривые — при осаждении на внешний цилиндр, штрихпунктирные — при осаждении на внутренний цилиндр)

где  $l$  — расстояние по вертикали от точки входа до отталкивающей пластины ( $l=R_2-r_0$  при осаждении на внутренний цилиндр,  $l=r_0-R_1$  при осаждении на внешний цилиндр).

Результаты расчетов позволяют дать ряд полезных рекомендаций. Наименьшая погрешность при прочих равных условиях достигается при использовании в качестве осадительной камеры цилиндрического конденсатора и при осаждении

частиц на внешний цилиндр. Так, например, при  $R_2/R_1=5$  и  $h/l=8$  величина  $S$  составляет 0,44 при осаждении на внешний цилиндр и 0,90—при осаждении на внутренний цилиндр (для плоского конденсатора  $S=0,68$ ). Из графиков следует также, что погрешность координаты осаждения быстро снижается при увеличении отношений  $h/l$  и  $R_2/R_1$ . Для минимизации погрешности целесообразно выбирать  $h/l$  порядка  $8 \div 10$  и  $R_2/R_1$  порядка  $5 \div 10$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спурный К., Иех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. Атомиздат, М., 1964.
2. Lipscomb W. N., Rubin T. R., Strudivant I. H. An Investigation of a Method for the analysis of Smoker according to Particle size. I. of apple, Phys, v. 18, 1947, p. 72—79.
3. Yoshikawa H. H., Swartz G. A., MacWatere I. T., Fitter, W. L. Electrostatic Particle Size Analyzer, The Rev. of scien, Instr, 1956, 27, N 6, p. 359—362.
4. Верещагин И. П. Уравнение движения шарообразных частиц в потоке воздуха при малых числах Рейнольдса. «Сильные электрические поля в технологических процессах». «Энергия», М., 1969.
5. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. Изд. АН СССР, М., 1955.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, М., 1954.
7. Madelaine G., Roure L. Contribution à l'étude de la precipitation electrostatique des aérosols, Rapport CEA—380, 5, 1964.

Л. М. ЛОГВИНОВ, А. А. ПОДОЛЬСКИЙ

## О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДОВ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТИЦ

При исследовании параметров аэрозолей и, в частности, при определении размеров отдельных частиц возникает задача измерения зарядов малых движущихся частиц.

При  $E_0=150$  кв/м и  $\epsilon=4$  предельный заряд частицы радиусом 5 мкм в поле униполярной короны составляет  $8,5 \cdot 10^{-16}$  кул, а частицы радиусом 10 мкм —  $3,4 \cdot 10^{-15}$  кул. Как видно, предельные заряды аэрозольных частиц малы и для их измерения требуются устройства с высокой чувствительностью. Известно, что для поточного измерения зарядов частиц весьма удобным оказывается индукционный способ. Оценка чувствительности этого способа в реальных условиях и составляет содержание настоящей статьи.