

А.А.Подольский

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАРИДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

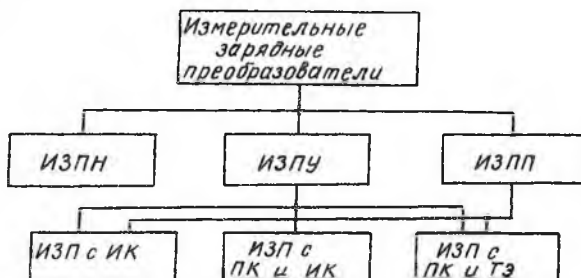
Измерение параметров дисперсной фазы (ИПДФ) представляет собой важный участок контроля загрязнения окружающей среды и физико-химического анализе порошкообразных материалов. Одно из главных направлений автоматизации ИПДФ базируется на электризации аэрозольных частиц в коронном разряде, отклонении заряженных частиц в электрическом поле и измерении токов или зарядов, переносимых частицами. Общим звеном всех измерительных устройств, в которых используются аспирационные методы с предварительной зарядкой частиц, является зарядная камера, в которой частицам сообщаются заряды, жестко связанные с их размерами. Это и служит основанием для объединения всех измерительных устройств такого рода под общим названием – измерительные зарядные преобразователи (ИЗП).

На рис. 1 представлена классификационная схема ИЗП, в соответствии с которой их можно разделить на три основных типа:

ИЗПН – преобразователи, в которых поток заряженных частиц не проходит через отклоняющее электрическое поле;

ИЗПУ – преобразователи с применением отклоняющего поля и измерением установившихся значений токов;

ИЗПП – преобразователи с применением импульсного отклоняющего поля и измерением токов в переходном режиме.



Р и с. 1. Классификационная схема измерительных зарядных преобразователей

В зависимости от состава ИЗПУ и ИЗПП делятся на преобразователи с измерительным конденсатором (ИК), с предварительным (ПК), измерительным (ИК) конденсаторами, с предварительным конденсатором (ПК) и токочувствительным элементом (ТЭ) на выходе.

На пластины конденсаторов в ИЗПУ подается постоянное или модулированное, а в ИЗПП - импульсное напряжения. Измерение токов или зарядов, переносимых частицами, осуществляется с помощью электрометрического усилителя, подключенного к одной из пластин ИК или к ТЭ.

Для выбора ИЗП с градуировочными характеристиками, обеспечивающими удобное измерение искоемых параметров дисперсной фазы, целесообразно при анализе их работы опустить второстепенные факторы и ограничиться учетом наиболее явно выраженных зависимостей между размером частицы, ее зарядом и скоростью движения в электрическом поле. Отвечающая такому подходу идеализированная теория ИЗП, излагаемая в данной работе, включает следующие основные допущения.

1. Частицы имеют шарообразную форму.

2. Влиянием силы тяжести на движение частиц и их инерционность можно пренебречь.

3. Заряд, приобретаемый частицей диаметра  $D$  в зарядном устройстве, определяется только ионной бомбардировкой и вычисляется по формуле Потенье [1]:  $Q = AD^2$ .

(Здесь  $A$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от диэлектрической проницаемости материала частицы, напряженности поля и концентрации ионов в зоне зарядки, времени прохождения частицы через зарядное устройство). Диффузионной составляющей заряда можно пренебречь.

4. На выходе из зарядного устройства (ЗУ) частицы всех размеров равномерно распределены по сечению газотока.

5. Сила сопротивления среды движению частицы определяется по формуле Стокса  $F = 3\pi\eta DW$ ,  
где

$W$  - скорость частицы относительно среды;

$\eta$  - динамическая вязкость среды.

6. Функция распределения частиц по размерам  $f_i(D)$  в измерительном устройстве не претерпевает изменения.

Общее выражение для измеряемого тока в ИЗП при соблюдении изложенных допущений записывается в виде

$$I(\psi) = AN \int_0^{\infty} D^2 G(\psi, D) f_i(D) dD, \quad (1)$$

где  $N$  - счетная концентрация частиц;

$G$  - функция, зависящая от варьируемого параметра  $\psi$  и диаметра  $D$  (аппаратная функция в спектрометрии аэроионов [2]).

В ИЗП первого типа  $\psi$  - постоянная величина, второго - напряжение между пластинами ПК или ИК или расход воздуха через конденсатор, третьего - время, отсчитываемое от момента установления поля в конденсаторе.

Воздействуя на ток  $I$  операторами  $1, \frac{\partial}{\partial \psi}, h_{\psi} = 1 - \psi \frac{\partial}{\partial \psi}$ , можно определить поверхностную и объемную концентрацию дисперсной фазы, интегральные функции распределения поверхности и объема частиц по размерам, гистограммы распределения по размерным группам. При этом дифференцирование может быть выполнено непосредственно в измерительной линии путем разделения потока воздуха, разделения измерительного конденсатора, а также модуляцией потока заряженных частиц в предварительном конденсаторе.

Анализ ИЗП конкретного вида основывается на предварительном определении аппаратной функции. Как показано в [3], применительно к спектрометрии аэроионов эта в общем случае сложная задача существенно упрощается при соблюдении некоторых требований в отношении устройства ИК. Учитывая, что эти условия, как правило, выполняются ИЗП, рассмотрим основные варианты построения преобразователей. Заметим, что большинство вариантов ИЗП в части устройства ИК и ИК аналогичны аспирационным счетчикам аэроионов, что позволяет для нахождения вида  $G$  воспользоваться методикой и результатами, полученными в [3].

### Интегральный ИЗПН

В качестве ТЭ могут быть использованы либо газопроницаемый токопроводящий фильтр, либо экранированное индукционное кольцо. В первом случае функция  $G$  равна расходу  $\phi$  воздуха через ИЗП. Во втором случае измерения могут быть выполнены лишь при условии модуляции короны в зарядном устройстве. Так, при униполярной импульсной короне амплитудное значение наведенного заряда

$$q = \frac{1}{2} V_{эф} AN \int_0^{\infty} D^2 f_1(D) dD, \quad (2)$$

где эффективный объем  $V_{эф}$  легко определяется для конкретного ИЗПН.

В обоих случаях измеряемый сигнал пропорционален полной поверхностной концентрации  $D\Phi$ .

Интегральные ИЗПН нашли применение в высокочувствительных приборах для непрерывного измерения загрязненности воздуха [4], [5]. Нижний предел измеряемых концентраций ( $\varphi$  мг/м<sup>3</sup>) для современных ИЗПН составляет  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ .

Использование миниатюрных индукционных колец (объемом порядка 1 мм<sup>3</sup>) позволяет перейти к регистрации сигналов от отдельных частиц. ИЗПН с постоянной короной и ТЭ, выполненным в виде миниатюрного экранированного индукционного кольца, применяются в приборах для измерения распределения счетной концентрации взвешенных частиц по размерным группам [6].

### Интегральный ИЗПУ с измерительным конденсатором

В интегральном ИЗПУ поток аэрозоля поступает в измерительный конденсатор через входное отверстие, равное поперечному сечению конденсатора. К пластинам конденсатора приложено постоянное напряжение  $U$ , обуславливающее смещение частиц к одной из пластин, называемой собирающей. Измеряется ток через собирающую пластину ИК.

Для определения вида функции  $G$  воспользуемся выражением для аппаратной функции интегрального аспирационного счетчика аэроионов [3]:

$$G = \begin{cases} 4\pi c u \kappa & \text{при } \kappa \leq \kappa_0; \\ \varphi & \text{при } \kappa \geq \kappa_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $c$  - емкость ИК;

$\kappa_0 = \varphi / 4\pi c u$  - подвижность аэроионов, которые, войдя в конденсатор у края отталкивающей обкладки, движутся к собирающей по предельной траектории I-I (рис. 2, а).

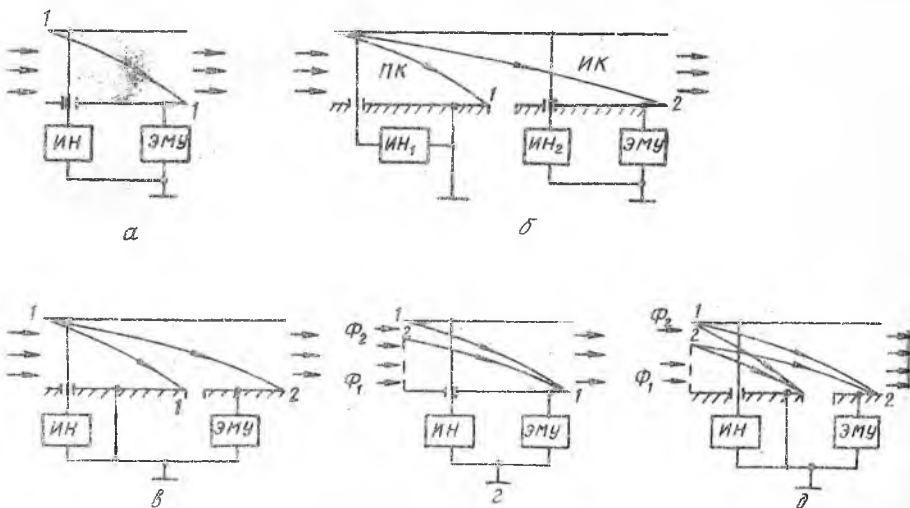
При выполнении изложенных допущений подвижность частицы прямо пропорциональна ее диаметру ( $\kappa = VD$ , где  $V = A/3\pi\eta$ ), и для функции  $G$  интегрального ИЗПУ получаем:

$$G = \begin{cases} 4\pi c u V D & \text{при } D \leq D_0; \\ \varphi & \text{при } D \geq D_0, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$D_0 = \frac{\varphi}{4\pi c u V} \quad (5)$$

Из выражения (1), с учетом (4), следует, что измеряемый ток состоит из двух компонентов, первый из которых пропорционален ограниченной объемной концентрации частиц  $V(0, D_0)$  в интервале размеров  $(0, D_0)$ , второй - ограниченной поверхностной концентрации  $S(D_0, \infty)$  в интервале размеров  $(D_0, \infty)$ . Изменением напряжения в ИК можно добиться ослабления нежелательного компонента.



Р и с. 2. Схемы измерительных зарядных преобразователей (без зарядных устройств):

ИН - источник напряжения; ЭМУ - электрометрический усилитель

Результат измерения можно отождествить с ограниченной или полной объемной или поверхностной концентрацией  $\Delta\Phi$ . При введении безразмерного диаметра  $\alpha = D/D_0$  погрешность измерения можно оценить по формулам:

для случая ограниченной объемной концентрации  $V(0, D_0)$

$$\Delta_{1V} = 100 \frac{J_2(1, \infty)}{J_3(0, 1)} ; \quad (6)$$

для случая полной объемной концентрации  $V(0, \infty)$

$$\Delta_{2V} = 100 \frac{J_3(1, \infty) - J_2(1, \infty)}{J_3(0, \infty)} ; \quad (7)$$

для случая ограниченной поверхностной концентрации  $S(D_0, \infty)$

$$\Delta_{1S} = 100 \frac{J_3(0,1)}{J_2(1, \infty)} ; \quad (8)$$

для случая полной поверхностной концентрации  $S(0, \infty)$

$$\Delta_{2S} = 100 \frac{J_2(0,1) - J_3(0,1)}{J_2(0, \infty)} . \quad (9)$$

Здесь и в дальнейшем используется обозначение

$$J_n(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \alpha^n f_n(\alpha) d\alpha .$$

Оценку погрешностей удобно производить в предположении о логарифмически-нормальном распределении частиц по размерам; при этом погрешности выражаются через табулированную функцию - интеграл вероятности. Запишем функцию логарифмически-нормального распределения числа по размерам в виде

$$f_1(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_0 \alpha \text{Ln} \sigma} \exp - \frac{(\text{Ln} \frac{\alpha}{\alpha_m} + 3 \text{Ln}^2 \sigma)^2}{2 \text{Ln}^2 \sigma} , \quad (10)$$

где  $\alpha_m = \frac{D_m}{D_0}$  ;

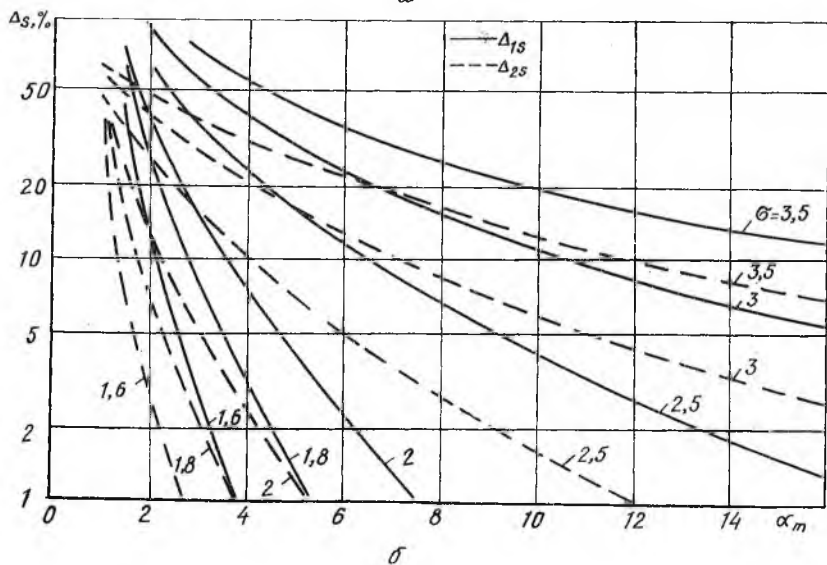
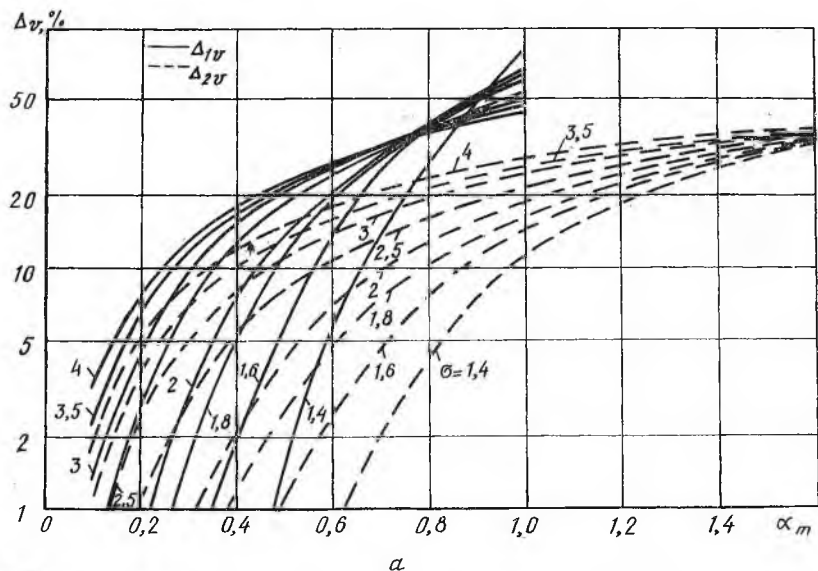
$D_m$  - медиана распределения, т.е. размер частиц, по которому масса материала делится на две равные доли;

$\text{Ln} \sigma$  - среднее квадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

По формулам (6) - (9) с учетом равенства (10) были произведены расчеты погрешности при изменении параметров распределения в следующих пределах:

$\sigma$  - в интервале 1,4 - 4,0;  $\alpha_m$  - в интервале 0,1 - 2,0 (для случая объемной концентрации) и в интервале 1 - 20 (для случая поверхностной концентрации).

Зависимости погрешностей  $\Delta_V$  и  $\Delta_S$  от параметра  $\alpha_m$  при различных значениях  $\sigma$  изображены на рис. 3,а и 3,б. Из расчетов, также как и непосредственно из формул (6) - (9), следует, что погрешность измерения ограниченных концентраций всегда превышает погрешность измерения полных. Умеренная погрешность - порядка 20% - достигается при измерении ограниченной объемной концентрации при  $\alpha_m \leq 0,4 \div 0,6$ ; полной объемной концентрации - при  $\alpha_m \leq 0,7 - 1,1$ ; ограниченной поверхностной концентрации - при  $\alpha_m \geq 3 - 10$ ; полной поверхностной концентрации - при  $\alpha_m \geq 2 - 6$ . Снимая зависимость  $I(U)$  и выполняя операции  $\frac{\partial I}{\partial U}$  и  $h_V I$  при последовательном ряде значений  $U$ , можно определить интегральные функции распределения объемной  $V(0, D)$



Р и с. 3. Графики зависимости погрешности интегрального ИВП от параметров дисперсной фазы

и поверхностной  $S(D, \infty)$  концентрации  $D\Phi$ . Для определения частных концентраций  $V(D_1, D_2)$  и  $S(D_1, D_2)$  выполняются операции:

$$\frac{\partial I}{\partial U} \Big|_{U=U_1} - \frac{\partial I}{\partial U} \Big|_{U=U_2} \quad \text{и} \quad h_{v_1} I(U_2) - h_{v_2} I(U_1).$$

Отметим, что для нахождения одного значения  $V(0, D)$  или  $S(D, \infty)$  необходимо измерять ток при двух значениях напряжения, для нахождения одного значения  $V(D_1, D_2)$  или  $S(D_1, D_2)$  — при четырех значениях напряжения.

В настоящее время интегральный ИЗПУ с измерительным конденсатором применяется в приборах для контроля загрязнения воздушной среды [7].

### Интегральный ИЗПУ с ПК и ИК

Вольтамперная характеристика преобразователя представляет собой зависимость тока протекающего через собирающую обкладку  $U_K$  от напряжения  $U$  между пластинами ПК. Аппаратная функция преобразователя имеет вид:

$$G = \begin{cases} 4\pi C_2 U_2 B D & \text{при } D \leq D_2; \\ \Phi - 4\pi C_1 U_1 B D & \text{при } D_2 \leq D \leq D_1; \\ 0 & \text{при } D > D_1, \end{cases} \quad (\text{II})$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — диаметры частиц, движущихся по предельным траекториям I-1 и I-2 (рис. 2, б).

Из выражения (II) следует, что преобразователь с предварительным конденсатором может быть использован для нахождения интегральной функции распределения объемной концентрации  $D\Phi$ . При выполнении условия  $C_2 U_2 \ll C_1 U_1$ , измеряемый ток приближенно пропорционален  $V(0, D_0)$ , где  $D_0$  выбирается в промежутке со средним значением:

$$D_{cp} = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{\Phi}{4\pi C_1 U_1} \frac{1 + 0,5 C_2 U_2 / C_1 U_1}{1 + C_2 U_2 / C_1 U_1} \quad (\text{I2})$$

и шириной

$$\Delta = D_1 - D_2 = \frac{\Phi}{4\pi C_1 U_1} \left(1 + \frac{C_1 U_1}{C_2 U_2}\right)^{-1}. \quad (\text{I3})$$

Погрешность приближенного измерения  $V(0, D_0)$  может быть оценена по формуле

$$\delta = \frac{100}{J_3(0,1)} \left[ (\gamma + 0,5) J_2\left(1 - \frac{0,5}{\gamma}, 1 + \frac{0,5}{\gamma}\right) - J_3\left(1 - \frac{0,5}{\gamma}, 1\right) - \gamma J_3\left(1 - \frac{0,5}{\gamma}, 1 + \frac{0,5}{\gamma}\right) \right], \quad (\text{I4})$$

где  $\gamma = C_1 U_1 / C_2 U_2$ .



Для нахождения частной объемной концентрации  $V(D_1, D_2)$  достаточно выполнить операцию  $\frac{\partial C}{\partial U_1}$ . Операция дифференцирования может быть заменена измерением переменной составляющей тока ИК при модуляции напряжения в ПК.

### Интегральный ИЗПУ с ПК и ТЭ

Подключенный к токочувствительному элементу электрометрический усилитель регистрирует ток, обусловленный заряженными частицами, пролетающими через предварительный конденсатор с отклоняющим полем без осаждения. Функция  $\mathcal{G}$  преобразователя находится путем вычитания из значения  $\Phi$  функции (4):

$$\mathcal{G} = \begin{cases} \Phi - 4\pi CUBD & \text{при } D \leq D_0; \\ 0 & \text{при } D \geq D_0. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь  $D_0$  определяется из выражения (5).

При постоянном напряжении в ПК данный преобразователь не имеет преимуществ перед ИЗПУ с ИК. Определение интегральной функции распределения объемной концентрации по размерам  $V(\theta, D)$  производится путем дифференцирования вольтамперной характеристики преобразователя; интегральная функция распределения поверхностной концентрации  $S(\theta, D)$  определяется путем воздействия на вольтамперную характеристику оператором  $h_u$ .

Составим разность  $\mathcal{G}_- = \mathcal{G}(0) - \mathcal{G}(U)$ . Функция  $\mathcal{G}_-$  совпадает с аппаратной функцией интегрального ИЗПУ с измерительным конденсатором. Ранее было показано, что преобразователь с такой аппаратной функцией может быть использован, в зависимости от значения напряжения  $U$ , для приближенного определения поверхностной или объемной концентрации. В преобразователе с ПК для получения аппаратной функции типа (3) можно применить в конденсаторе модулированное напряжение, например в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов со скважностью 2, и существенно снизить нижний предел измеряемой величины, перейдя к измерению переменной составляющей тока узкополосным усилителем. При использовании в качестве ТЭ газопроницаемого токопроводящего фильтра  $\mathcal{G} = 0,5 \mathcal{G}_-$  и применении экранированного индукционного кольца для амплитуды наведенного заряда имеем

$$\varphi = \frac{1}{2} V_{\text{эф}} AN \left\{ \frac{1}{D_0} \int_0^{D_0} D^3 f_1(D) dD + \int_{D_0}^{\infty} D^2 f_1(D) dD \right\}. \quad (16)$$

Отметим, что переход к измерению на переменном токе может быть выполнен и посредством модуляции напряжения короны в зарядном устройстве [8].

### Дифференциальный ИЗПУ с разделенным конденсатором

Дифференциальный преобразователь отличается от интегрального только конструкцией конденсатора. Одна обкладка конденсатора является общей, а вторая разделена на две изолированные части - предварительную и собирающую, поддерживаемые под одним потенциалом [3]. Аппаратная функция дифференциального преобразователя имеет вид:

$$G = \begin{cases} 4\pi C_2 UBD & \text{при } D \leq D_2; \\ \varphi - 4\pi C_1 UBD & \text{при } D_2 \leq D \leq D_1; \\ 0 & \text{при } D \geq D_1, \end{cases} \quad (17)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - диаметры частиц, движущихся по предельным траекториям I-I и I-2 (см. рис. 2, в),

$$D_1 = \frac{\varphi}{4\pi C_1 UB}; \quad D_2 = \frac{\varphi}{4\pi (C_1 + C_2) UB} \quad (18)$$

При  $C_2 \ll C_1$  дифференциальный преобразователь, аналогично интегральному ИЗПУ с предварительным конденсатором, может использоваться для измерения ограниченной объемной концентрации. Погрешность измерения определяется выражением (14), где  $\gamma = C_1 / C_2$ .

Воздействуя на вольтамперную характеристику преобразователя  $I(U)$  оператором  $h_u$ , можно найти частную поверхностную концентрацию  $S(D_1, D_2)$ . В отличие от интегрального ИЗПУ с измерительным конденсатором, здесь для нахождения совокупной поверхности частиц одной размерной группы ( $D_1, D_2$ ) достаточно измерить ток при двух, а не при четырех значениях напряжения.

### Дифференциальный ИЗПУ с разделенным потоком воздуха

Дифференциальный ИЗПУ отличается от интегрального тем, что входное отверстие конденсатора разделено на две части, через одну из которых вводится исследуемый аэрозоль, а через вторую - чистый деионизированный воздух. Впуск аэрозоля осуществляется через щель кольцево-

го или прямоугольного (в зависимости от конструкции конденсатора) сечения, примыкающую к отклоняющей обкладке.

Аппаратная функция для дифференциального ИЗПУ с измерительным конденсатором имеет вид

$$G = \begin{cases} 0 & \text{при } D \leq D_2; \\ 4\pi CUVB D - \Phi_1 & \text{при } D_2 \leq D \leq D_1; \\ \Phi_2 & \text{при } D \geq D_1, \end{cases} \quad (19)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  - расход соответственно чистого воздуха и исследуемого аэрозоля;

$D_1$  и  $D_2$  - диаметры частиц, движущихся по предельным траекториям I-I и 2-I (см. рис. 2, г),

$$D_1 = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{4\pi CUVB}; \quad D_2 = \frac{\Phi_1}{4\pi CUVB}. \quad (20)$$

Из выражения (19) следует, что при  $\Phi_2 \ll \Phi_1$  преобразователь может использоваться для приближенного определения ограниченной поверхностной концентрации  $S(D_0, \infty)$ , где  $D_0$  выбирается в промежутке со средним значением

$$D_{cp} = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{\Phi_1}{4\pi CUVB} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right) \quad (21)$$

и шириной

$$\Delta = D_1 - D_2 = \frac{\Phi_2}{4\pi CUVB}. \quad (22)$$

Погрешность приближенного измерения может быть оценена по формуле

$$\delta = \frac{100}{J_2(1, \infty)} \left[ (\gamma + 0.5) J_3\left(1 - \frac{0.5}{\gamma}, 1 + \frac{0.5}{\gamma}\right) - \gamma J_2\left(1 - \frac{0.5}{\gamma}, 1 + \frac{0.5}{\gamma}\right) + J_2\left(1 + \frac{0.5}{\gamma}, \infty\right) - J_2(1, \infty) \right], \quad (23)$$

где  $\gamma = \Phi_1 / \Phi_2$ .

Применение оператора  $h_{\mu}$  в преобразователе с разделенным потоком воздуха нецелесообразно, производная  $\frac{\partial I}{\partial V}$  определяет частную объемную концентрацию  $V(D_1, D_2)$ .

Преобразователь с разделенным потоком воздуха может использоваться с предварительным конденсатором и токочувствительным элементом на выходе. Функция  $G$  преобразователя при использовании в качестве ТЭ газопроницаемого токопроводящего фильтра получается путем вычитания  $G$  из  $\Phi_2$ :

$$G = \begin{cases} \Phi_2 & \text{при } D \leq D_2; \\ \Phi_2 + \Phi_1 - 4\pi CUVB D & \text{при } D_2 \leq D \leq D_1; \\ 0 & \text{при } D \geq D_1. \end{cases} \quad (24)$$

В отличие от преобразователя с ИК преобразователь с ТЭ удобен для приближенного определения  $S(D, D_0)$ . Погрешность измерения ограниченной поверхностной концентрации  $S(D, D_0)$ , возникающая из-за "краевого эффекта" функции  $G$ , определяется выражением

$$\sigma = \frac{100}{J_2(0,1)} \left[ J_2(0,1 - \frac{0,5}{\gamma}) + (1+\gamma) J_2(1 - \frac{0,5}{\gamma}, 1 + \frac{0,5}{\gamma}) - (\gamma + 0,5) J_3(1 - \frac{0,5}{\gamma}, 1 + \frac{0,5}{\gamma}) - J_2(0,1) \right]. \quad (25)$$

При модулировании напряжения в зарядном устройстве или предварительном конденсаторе в качестве ТЭ может быть применено экранированное индукционное кольцо.

Дифференциальный ИЗПУ с разделенным потоком воздуха применяется для измерения дисперсного состава субмикронных частиц [9]. Однако поскольку для субмикронных частиц изменяется связь между размером, зарядом и подвижностью, зависимость между параметрами  $D$  и измеряемым током не определяется приведенными выражениями.

### Дифференциальный ИЗПУ второго порядка

Дифференциальный преобразователь второго порядка - это преобразователь с разделенным конденсатором и разделенным потоком воздуха. Аппаратная функция преобразователя (по аналогии с аспирационными счетчиками второго порядка [3]) вычисляется как разность между функцией  $G$  ИЗПУ с разделенным конденсатором при расходе  $\Phi_1 + \Phi_2$  и функцией  $G$  этого же преобразователя при расходе  $\Phi_1$ , при  $\Phi_2 / \Phi_1 \leq C_2 / C_1$ ,

$$G = \begin{cases} 0 & \text{при } D \leq D_{22}; \\ 4\pi(C_1 + C_2)UBD & \text{при } D_{22} \leq D \leq D_{12}; \\ \Phi_2 & \text{при } D_{12} \leq D \leq D_{21}; \\ \Phi_1 + \Phi_2 - 4\pi C_1 UBD & \text{при } D_{21} \leq D \leq D_{11}; \\ 0 & \text{при } D \geq D_{11}, \end{cases} \quad (26)$$

при  $\Phi_2 / \Phi_1 \geq C_2 / C_1$ ,

$$G = \begin{cases} 0 & \text{при } D \leq D_{22}; \\ 4\pi(C_1 + C_2)UBD & \text{при } D_{22} \leq D \leq D_{21}; \\ 4\pi C_2 UBD & \text{при } D_{21} \leq D \leq D_{12}; \\ \Phi_1 + \Phi_2 - 4\pi C_1 UBD & \text{при } D_{12} \leq D \leq D_{11}; \\ 0 & \text{при } D \geq D_{11}. \end{cases} \quad (27)$$

Здесь  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{21}$ ,  $D_{22}$  - диаметры частиц, движущихся по предельным траекториям I-I, I-2, 2-I, 2-2 (см. рис. 2, д),

$$D_{11} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{4\pi C_1 UV}; \quad D_{12} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{4\pi (C_1 + C_2) UV};$$

$$D_{21} = \frac{\Phi_1}{4\pi C_1 UV}; \quad D_{22} = \frac{\Phi_1}{4\pi (C_1 + C_2) UV} \quad (28)$$

Из выражений (26) - (28) следует, что при соблюдении условий  $\Phi_2/\Phi_1 < C_2/C_1$  и  $\Phi_2/\Phi_1 \ll 1$  преобразователь обеспечивает измерение частной поверхностной концентрации, а при  $C_2/C_1 < \Phi_2/\Phi_1$  и  $C_2/C_1 \ll 1$  - частной объемной концентрации. Для определения совокупной поверхности или совокупного объема частиц одной размерной группой достаточно измерить ток при одном значении напряжения.

### Дифференциальный ИЗПУ второго порядка с несколькими измерительными электродами

Описанные ИЗПУ обеспечивают измерения функции распределения интересующего параметра  $D\Phi$  лишь при плавном или ступенчатом изменении режимного параметра, например, напряжения между обкладками ИК или ПК. Однако последовательный во времени процесс снятия вольтамперной характеристики преобразователя может быть использован лишь при стабильных (на временном интервале измерения) параметрах дисперсной фазы. Если требуемая стабильность не выдерживается, нахождение функции распределения по вольтамперной характеристике преобразователя сопряжено с большими погрешностями.

Между тем преобразователь с разделенным потоком воздуха при  $\Phi_2/\Phi_1 \ll 1$  обеспечивает классификацию частиц по размерным группам на собирающей обкладке измерительного конденсатора. Следовательно, разделение собирающей обкладки ИК на ряд изолированных электродов с независимым измерением тока каждого электрода позволяет снять гистограмму распределения интересующего параметра  $D\Phi$  при одном значении режимного параметра. Аппаратная функция для тока, протекающего через каждый электрод, определяется выражением, аналогичным (26) или (27).

Отметим, что принцип разделения собирающей обкладки на несколько отдельных частей уже давно используется в спектрометрии аэроионов [3], [10] и в аэрозольной технике [11], [12], [13]. В работе [14] описывается применение дифференциального ИЗПУ второго порядка с 7 измерительными электродами в приборе для измерения дисперсного состава порошков.

Метод, основанный на измерении тока конденсатора в переходном режиме, был первоначально предложен академиком Е.К.Федоровым для исследования ионного спектра [15] и позднее лег в основу прибора для измерения спектра легких атмосферных ионов [16], [17]. Попытка применить импульсный метод для дисперсионного анализа аэрозолей была предпринята Дрозиним и Ла Мером [18], однако, разработанная ими процедура измерений требовала сравнительно большой затраты времени и не обеспечивала высокой разрешающей способности. В работе [19] описан прибор для контроля объемной концентрации  $D\Phi$ , основанный на применении импульсного метода.

Преобразователи с измерением токов в переходном режиме могут иметь различные конструкции и строиться по различным блок-схемам. Ограничимся рассмотрением одного варианта, наиболее удобного в реализации.

При подаче на пластины конденсатора, заполненного заряженным аэрозолем, скачка напряжения через пластину начинает течь ток, обусловленный направленным движением заряженных частиц в электрическом поле конденсатора. В первоначальный момент значение тока определяется движением всех частиц; с течением времени возрастающая доля частиц оседает на пластине и ток убывает. Выседание частиц носит селективный характер: сначала выседают частицы наиболее подвижные, затем — менее подвижные и т.д. Это позволяет воспользоваться временной зависимостью измеряемого тока для определения параметров  $D\Phi$ .

Положим для простоты, что измерительный конденсатор имеет плоскую конструкцию, расстояние между пластинами  $h$ , площадь пластины  $S$ , амплитуда скачка напряжения  $U$ . Положим также, что в первоначальный момент (при  $t=0$ ) частицы всех размеров находятся в покое и равномерно заполняют пространство между пластинами. Обозначим время, в течение которого частицы диаметра  $D$  проходят расстояние  $h$ , символом  $t_D$ ; при соблюдении приведенных ранее допущений  $t_D = h^2 / BUD$ . При подаче скачка напряжения частицы диаметра  $D$  начинают с постоянной скоростью двигаться к собирающей обкладке; к произвольному моменту времени  $t < t_D$  на обкладке оседает доля частиц, составляющая  $(t/t_D)$  от исходного количества. Следовательно, функция  $G(t, D)$  может быть записана в виде

$$G = \begin{cases} (1 - \frac{BUt}{h^2} D) \frac{S}{h} BUD & \text{при } D \leq D_0; \\ 0 & \text{при } D > D_0, \end{cases} \quad (29)$$

где

$$D_0 = \frac{h^2}{BUt}. \quad (30)$$

Из (29) следует, что ток, проходящий через пластины, при  $t=0$  пропорционален объемной концентрации  $D\varphi$ . Воздействуя на измеряемый ток оператором  $h_t = 1 - t \frac{\partial}{\partial t}$ , можно получить интегральную функцию распределения объемной концентрации по размерам.

### З а к л ю ч е н и е

1. На основе метода аппаратной функции развита теория измерительных зарядных преобразователей параметров дисперсной фазы.

2. Показано, что каждый параметр  $D\varphi$  может быть определен с помощью ИЭП различного вида.

3. При выборе оптимального варианта ИЭП необходимо учитывать особенности объекта измерения, методические погрешности, быстродействие, простоту и надежность схемного и конструктивного построения преобразователей.

### Л и т е р а т у р а

1. Pauthenier M.M., Moreau-Hanot M. La charge des particules spheriques dans un champ ionise, *Journ. de Phys. et le Radium*, 3, №7, 1932, 590-613.

2. Г а м м е т Х.Ф. К общим проблемам спектрометрии аэроионов. Ученые записки Тартуского государственного университета, вып. 320, 1973, с. 5-12.

3. Г а м м е т Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Ученые записки Тартуского государственного университета, вып. 195, 1967.

4. И з м а й л о в Г.А. Устройство для непрерывного измерения запыленности газов. Авт. свид. № II3558, бюлл. изобр. № 6, 1958.

5. П о д о л ь с к и й А.А., П у с т о ш к и н Б.Н., Р у -

Мянцева В.В., Турбаров В.И. Способ измерения концентрации дисперсной фазы аэрозоля. Авт.свид. № 340942, бюл.изобр. № 18, 1972.

6. Подольский А.А., Логвинов Л.М., Воронов А.Ф., Фадеев В.В. Счетчик аэрозольных частиц ЭИП-9 "Приборы и техника эксперимента", № 5, 1975, с. 259.

7. Couzidine Meredith C., Law S. Edward. *Electrostatic mass per unit volume* (Электростатический прибор для весового определения концентраций пылей, РЖ32, "Метрология и измерительная техника", 1974, № 1.

8. Попов Б.И., Румянцев В.В., Турбаров В.И. Измерение объемной концентрации пыли. "Методы, приборы и системы контроля производственной среды". Межвузовский сборник, ЛЭТИ, вып. 103, 1976, с. 50-54.

9. Whitby K.T., Clazk W.E. *Electric aerosol particle counting and size distribution measuring system for the 0,015 to 1 $\mu$  size range*, *Tellus*, 18, N2, 1966, 573-586.

10. Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф., Сальм Я.И. Многоканальный автоматический спектрометр аэроионов. Ученые записки Тартуского государственного университета, вып. 320, 1973, с. 48-75.

11. Yoshikawa H.H., Swartz G.A., Mac Waters J.T., Fite W.L. *Electrostatic particle size analyzer*. *The Rev. of Sci. Instr.*, 27, N6, 1956, 359-362.

12. Подольский А.А., Калакутский Л.И. Прибор для измерения дисперсного состава порошкообразных материалов. "Коллоидный журнал", т. 37, 1975, № 6, с. 1198-1202.

13. Федоров Е.К. Новый метод исследования ионного спектра в атмосфере. ДАН СССР. 82, 1952, № 5, с. 717-718.

14. Цванг Л.Р. Импульсный метод измерения спектра легких ионов в атмосфере. Известия АН СССР. Серия "Геофизика", 1956, № 2, с. 202-209.

15. Цванг Л.Р., Гутман Л.Н. Изменение спектра легких атмосферных ионов. Известия АН СССР. Серия "Геофизика", 1958, № 7, с. 891-902.

16. Drozin V.G., La Mer V.K. *The determination of the particle size distribution of aerosols by precipitation of charged particles*. *Journ. of Coll. Sci.*, 14, N1, 1959, 74-90.



17. Подольский А.А., Малыгин Н.А. Прибор для измерения объемной концентрации взвешенных частиц. - В брошюре: "Методы и средства контроля за загрязняющими атмосферу промышленными выбросами". Киев, "Знание", 1976, с. 35-36.

УДК

А.А.Чудинов

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН  
В МОНОКРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА

Германат висмута - это новый материал акустоэлектроники, который в последнее время привлекает внимание специалистов. Из всех монокристаллических материалов, употребляемых в качестве акустических сред, он обладает самым низким значением скорости акустических поверхностных волн и малым рассеянием энергии при их распространении, что делает его перспективным в таких устройствах акустоэлектроники как линии задержки, фильтры сжатия радиоимпульсов, анализаторы спектра. Получение монокристаллических пластин германата висмута достаточных размеров позволяет ставить вопрос о практической разработке перечисленных устройств.

Анализ условий возбуждения и распространения ультразвуковых поверхностных волн обычно проводится на базе линейной теории упругости с учетом пьезоэлектрических свойств акустической среды. Дифференциальные уравнения движения частиц произвольной анизотропной акустической среды записываются в виде

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{1}{2} C_{ijkl} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_k}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right) - e_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j} \quad ( I )$$

где  $U_i$  и  $E_k$  - проекции векторов смещения и напряженности электрического поля на оси декартовой системы координат;

$\rho$  - плотность акустической среды;

$C_{ijkl}, e_{ijk}$  - упругие и пьезоэлектрические константы кристалла;

$i, j, k = 1, 2, 3$  Знак суммирования по повторяющимся в сомножителях индексам опущен.