

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI
TOIMETISED

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS

755

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СЛОЖНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Ионизация, аэрозоли, электрометрия

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS
ALUSTATUD 1893.a. VIINIK 755 ВЫПУСК ОСНОВАНЫ В 1893.g.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЛОЖНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Ионизация, аэрозоли, электрометрия

ТАРТУ 1987

Редколлегия: О. Авасте, К. Куду, Х. Таммет.

Ответственный редактор Ю. Кикас.

OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE PROPAGATING
HF DISCHARGE IN NITROGEN

M. Laan and J. Susi

It is known that the propagating high frequency (HF) discharge from a point electrode at atmospheric pressure is an object which is difficult to investigate because of its complicated geometry. Under certain conditions the HF discharge channel propagates straight along the gap axis. According to [1] the conditions for straight propagation are HF pulses of special shape and an additional DC potential to the point electrode. The shape of an HF pulse can be chosen so that the propagating velocity is nearly constant.

In the paper the 84 MHz pulse-excited discharge was investigated in nitrogen. The discharge was produced in a vacuum chamber with quartz windows, which was evacuated to a pressure below 10^{-4} Torr and was then filled with pure nitrogen up to a pressure of 755 Torr. To guarantee greater purity of the gas, evacuation and filling were repeated several times. The gap point electrode was 2 mm conically tipped tungsten wire which was fed 84 MHz radiopulses and an additional DC potential of about + 18 kV. The repetition rate of radiopulses was about 5 Hz. In Fig. 1 two

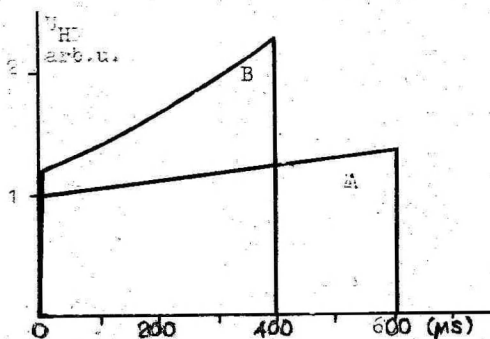


Fig.1. Envelopes of radiopulses for $V_p \approx 50$ m/s (A) and $V_p \approx 120$ m/s (B)

envelopes of radiopulses are presented. These radiopulses assure the discharge channel propagation at nearly constant velocities V_p of about 50 m/s and 120 m/s. Optical measurements, were mostly carried out in the case of radiopulse A in Fig.1.

Radiation of the discharge in our case consists mainly of the second positive system, the first negative system and the first positive system radiations. The second positive (2^+)

system and the first negative (1^-) system radiate in the ultra-violet and the blue part of the discharge spectrum and the first positive (1^+) system radiate in the orange-red-infrared. The discharge photos in Fig. 2 were obtained through the blue filter (1) and through the red filter (2). One can see that in the case of the red filter (OC-14, $\lambda > 590$ nm) the intensity mostly comes from the central part of the discharge channel. The electrode layer is quite weak.

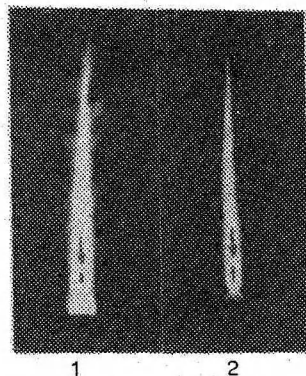


Fig. 2. The discharge photos taken through the blue filter (1) and through the red filter (2). Arrows point to the area observed.

In the case of the blue filter (OC - 8, $350 \text{ nm} \leq \lambda \leq 500 \text{ nm}$), very intense radiation is noticed from the electrode layer. Intense radiation comes also from the channel and several weaker branches can be seen.

For plasma diagnostics a small part of the discharge channel about 0.3 mm on the point tip was taken under observation. A monochromator $M\Delta P - 23$ and PM tubes $\Phi 3Y - 62$ and $\Phi 3Y - 140$ were used in the detecting system. The relative calibration for spectral sensitivity of the system was carried out with a "Hitachi" photometer, using the reflection of a halogen lamp radiation from the MgO surface.

To determine the gas temperature, the vibrational temperature or any other spectral parameter, one must know the total intensity of a spectral band. In the present study there was a need to compare the intensities of several 2^+ system bands, such as $0 \rightarrow 0$, $0 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 0$, $2 \rightarrow 0$, $3 \rightarrow 1$ and $4 \rightarrow 2$. The 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band ($\lambda = 1042 \text{ nm}$) radiation was only used for qualitative comparison with the 2^+ system $0 \rightarrow 0$ band absorption.

The total intensity I_{\pm} of a molecular band can be expressed as

$$I_t^{vv''}(t) = \text{const} \cdot [I_m^{vv''}(t) - I_m^b(t)] \cdot Z(\Delta\lambda, T_r) \cdot F(\lambda) \cdot R(\lambda, t).$$

Here $I_m^{vv''}(t)$ is the measured intensity of a spectral band, $I_m^b(t)$ is the measured intensity of the background, $Z(\Delta\lambda, T_r)$ is the correction factor taking into account the distribution of rotational lines in the bandhead ($\Delta\lambda$ - spectral width of the monochromator slit, T_r - rotational temperature), $F(\lambda)$ is the correction factor for the spectral sensitivity of the detecting system and $R(\lambda, t)$ is the correction factor for absorption.

The correction factors $Z(\Delta\lambda, T_r)$ for the N_2^+ system were taken from [4]. The absorption factor $R(\lambda, t)$ was obtained from direct measurements. The absorption was measured by means of a spherical mirror placed at a distance of its curvature radius from the object. This system enables one to measure the relative absorption $A(t)$. The latter is expressed as

$$A(t) = \frac{1 + r - I'(t)/I(t)}{r}$$

Here $I'(t)$ is the intensity in the case of an uncovered mirror, $I(t)$ is the intensity in the case of a covered mirror and r is the effective reflectivity of the mirror taking into account the radiation loss in the system. In Fig. 3 the relative absorption A for N_2^+ system $0 \rightarrow 0$ band is presented compared with the 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band radiation intensity I . As a second positive system transition is $C_3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_g$ and the first po-

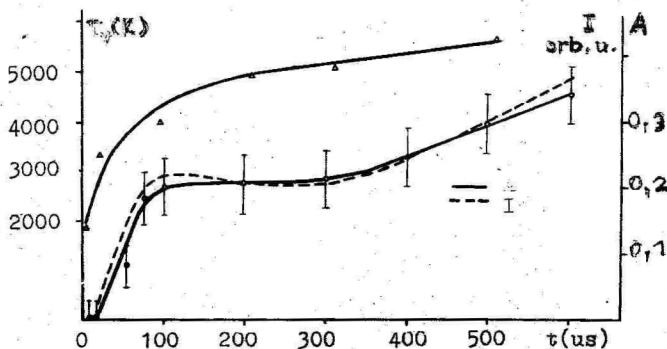


Fig. 3. Time dependence of the vibrational temperature T_v in the $C_3 \Pi_u$ state (Δ). Relative absorption A for 2^+ system $0 \rightarrow 0$ band and intensity I of the 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band. Error estimates for A have been obtained from standard deviations.

sitive system transition is $B^3 \Pi_g \rightarrow A^3 \Sigma_u^+$, the 2^+ system $0 \rightarrow 0$ band absorption A must be proportional to the 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band radiation intensity I . They both are proportional to the population of the 0 -th vibrational level of the $B^3 \Pi_g$ state and the optical length (the discharge channel diameter in our case) does not play a role here. We supposed, of-course, that the absorption of the 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band is too small to produce any effect. The difference between I and A in Fig. 3 may be explained by the lacking correction $Z(\Delta\lambda, T_r)$ for the 1^+ system $0 \rightarrow 0$ band.

For the determination of the neutral gas temperature the intensities of the two 2^+ system bands - $0 \rightarrow 0$ and $0 \rightarrow 2$ were compared. The intensity of the background (mainly due to the rotational structure of 2^+ and 1^- system bands) was measured as close as possible to the observed bandhead and was considered to be quasi-continuous. When taking into account all the necessary correction factors, the ratio of intensities $I_{0 \rightarrow 0} / I_{0 \rightarrow 2}$ must be equal to the ratio of the absolute transition probabilities $A_{0 \rightarrow 0} / A_{0 \rightarrow 2}$. If all the other correction factors are known, one can find the ratio $Z(\Delta\lambda, T_r)_{0 \rightarrow 0} / Z(\Delta\lambda, T_r)_{0 \rightarrow 2}$ from an experiment. If T_r is the only unknown parameter, then, using the factors $Z(\Delta\lambda, T_r)$, one can derive the rotational temperature T_r . It is known that in the case of discharges at atmospheric pressure the rotational temperature is equal to the neutral gas temperature T_g . In Fig. 4 the time dependence of the gas temperature is presented in the case of two shapes

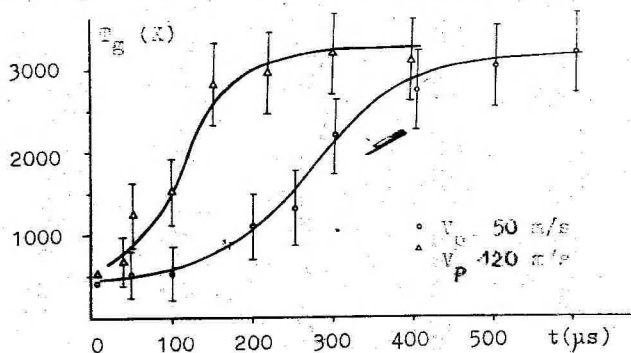


Fig. 4. Gas temperature in the discharge channel for two propagating velocities. Rings- $V_p \approx 50$ m/s, triangles- $V_p \approx 120$ m/s. Error estimates obtained from standard deviations.

of radiopulses (see Fig. 1). One can point out that the greater is the propagating velocity, the faster is the rise in the temperature. This means that the plasma parameters versus the channel length do not depend much on the propagating velocity. A similar conclusion was drawn [2] for electrical parameters of a 20 MHz discharge in the ambient air.

Having measured the absorption and the gas temperature, one can investigate the relative population of the vibrational levels in the $C^3\Pi_u$ state. It is probable that during the first 100 μs the $C^3\Pi_u$ state is mainly excited by an electron impact. So the vibrational distribution in the $C^3\Pi_u$ state must depend on the distribution in the ground state. The vibrational distribution in $C^3\Pi_u$ can then give information about the total energy balance of the discharge plasma. Later, for $t > 100 \mu s$, the electric field strength decreases in the discharge channel and other $C^3\Pi_u$ excitation mechanisms such as collisions between the neutral particles begin to play an important role. Therefore the vibrational distribution in the $C^3\Pi_u$ state must have a correlation to that of the ground state because of the $V - V$ transfer.

In our experiment the vibrational distribution was determined by comparing the total intensities of the 2^+ system bands $0 \rightarrow 0$, $1 \rightarrow 0$, $2 \rightarrow 0$, $3 \rightarrow 1$ and $4 \rightarrow 2$. The vibrational temperature was obtained by using the Boltzmann distribution approximation.

In Fig. 3 the time dependence of the vibrational temperature T_v is presented in the case of a propagating velocity V_p 50 m/s. One can see that the most effective $B^3\Pi_g$ state excitation takes place when the vibrational temperature has reached the value of about 4000 K.

In our previous papers [3,5] the 20 MHz pulse excited discharge in the ambient air was investigated. There we gave a model for $B^3\Pi_g$ state excitation and deexcitation in the HF discharge channel. The main idea is that the $B^3\Pi_g$ state is excited mainly not by an electron impact, but by the so-called step excitation proceeding from the vibrationally excited molecules in the ground state. The results obtained from optical measurements need a more detailed analysis.

R e f e r e n c e s

1. Айнтс М.Х., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Определение макропараметров высокочастотных разрядных вспышек. - Учен. зап. Тарт. ун-та, вып. 631, Тарту, 1982, с. 3-12.
2. Айнтс М.Х., Куду К.Ф., Роос Х.П., Тенсинг А.Р. Характеристики одноэлектродного импульсного ВЧ разряда в воздухе на частоте 20 МГц. - Учен. зап. Тарт. ун-та, вып. 669, Тарту, 1984, с. 3-12.
3. Лаан М.Р., Сузи Я.А. Измерение поглощения перехода $0 \rightarrow 0$ $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ азота в развивающемся ВЧ разряде. - Учен. зап. Тарт. ун-та, вып. 707, Тарту, 1985, с. II-17.
4. Hartmann G. Spectroscopie de la décharge couronne: études des mécanismes de collisions dans le dard (streamer). - Thèse doct. sci. Orsay, 1977.
5. Laan M., Susi J. Determination of N_2 $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ $0 \rightarrow 0$ band absorption in the propagating HF discharge channel. - ICPiG XVII, contrib. papers, vol. 2, Budapest, 1985, p. 1014-1016.

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ
ВЧ РАЗРЯДА В АЗОТЕ

М. Лаан, Я. Сузи

Резюме

В работе исследован импульсный разряд в азоте на частоте 84 МГц. Для облегчения изучения оптических параметров разряда была применена описанная в /1/ методика, обеспечивающая прямолинейное развитие канала. Указаны необходимые поправки на интенсивность для получения полной интенсивности исследуемой полосы спектра. При определении температуры газа применены методика сравнения интенсивностей полос $0 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 2$ 2^+ системы азота и сравнение соответственных поправок, учитывающих распределение вращательных линий в полосе. Последние поправки взяты из работы /4/. Поглощение излучения 2^+ системы измерено методом одного зеркала. Для качественного контроля временного хода поглощения исследовалось излучение полосы $0 \rightarrow 0$ 1^+ системы азота ($\lambda = 1042$ нм).

СОЕДИНЕНИЕ АЭРОИОНОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

Я. И. Сальм

Исследование процессов соединения аэроионов разных групп и аэроионного равновесия начинается с работ Мак-Клеанда и Кеннеди /1/, Дж. Нолана и др. /2, 3/. Как правило, рассматривались аэроионы четырех групп (отрицательные и положительные, легкие и тяжелые) и к тому же нейтральные ядра конденсации. Тяжелые аэроионы и нейтральные ядра случайно соединяются с легкими аэроионами и при этом переходят из одной группы в другую. В стационарных условиях устанавливаются определенные стационарные (равновесные) значения концентраций этих групп аэроионов. В симметричном случае концентрации соответствующих групп противоположных полярностей будут между собой равными, и можно ограничиться всего тремя группами частиц (легкие и тяжелые аэроионы плюс нейтральные ядра). По такой же схеме указанные явления описываются и в известных монографиях по атмосферному электричеству /4, 5, 6, 7/.

Вышеописанная схема рассмотрения имеет два недостатка: не учтены тяжелые аэроионы с кратными зарядами и не учтено соединение легких аэроионов с одноименными тяжелыми аэроионами. Более подробное изучение таких процессов началось исследователями аэрозоля /8, 9, 10, 11, 12/. Современное состояние этой проблемы подробно описано Хоппелем /13/, внесшим существенный вклад в ее развитие. В дальнейшем во многом будем исходить из этой работы.

В симметричном и стационарном случае (когда все величины с противоположными полярностями заряда соответственно между собой равны и все производные концентрации по времени равны нулю) в конечном счете получено уравнение

$$\alpha n^2 + \beta \bar{z} n - q = 0, \quad (1)$$

где n — полярная концентрация легких аэроионов,
 α — коэффициент рекомбинации легких аэроионов,

\bar{Z} - суммарная концентрация нейтральных ядер и тяжелых аэроионов,

q - интенсивность ионообразования.

Эффективный коэффициент прилипания легких аэроионов к тяжелым частицам

$$\beta = \int \beta_{\delta}(r) z(r) dr / \bar{Z}, \quad (2)$$

где $z(r)$ - распределение концентрации ядер \bar{Z} по радиусу r .
Эквивалентный коэффициент прилипания

$$\beta_{\delta}(r) = \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i^+(r) p_i(r) + \sum_{i=1}^n \beta_i^-(r) p_i(r), \quad (3)$$

где $\beta_i^+(r)$ и $\beta_i^-(r)$ - коэффициенты прилипания легкого аэроиона соответственно с одноименной и разноименной частицей радиуса r с i элементарными зарядами,
 $p_i(r) = N_i(r) / \bar{Z}(r)$ - относительная концентрация частиц радиуса r с i элементарными зарядами, $N_i(r)$ - концентрация частиц радиуса r с i элементарными зарядами, $\bar{Z}(r)$ - концентрация частиц радиуса r . Число n слагаемых должно быть достаточно большим.

Эквивалентный коэффициент прилипания вычислен Хоппелем при температуре 293 К, и результаты представлены в виде графика и аппроксимирующей формулы

$$\beta_{\delta}(r) = 4,36 \cdot 10^{-14} r - 9,2 \cdot 10^{-14} / \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} / \quad (4)$$

где r - в нанометрах.

Такая же величина под названием весовой функции ранее вычислена Тамметом при температуре 290 К /14/. Результаты приведены в виде графика и аппроксимирующей формулы

$$\beta_{\delta}(r) = 3,7 \cdot 10^{-14} r. \quad (5)$$

В этой же работе Тамметом показано, что коэффициенты прилипания Хоппеля можно достаточно точно выразить через формулы Фукса /10/, если добавить поправочные множители.

Формулу (3) можно упростить, имея в виду симметрию зарядки. На основе рекуррентных формул стационарного состояния /10/

$$\beta_{i-1}^+(r) p_{i-1}(r) = \beta_i^-(r) p_i(r) \quad (6)$$

можно выразить

$$\beta_0(r) = 2 \sum_{i=0}^{\infty} \beta_i^+(r) p_i(r). \quad (7)$$

По теории Фукса /10/

$$\left. \begin{aligned} \beta_i^+(r) &= \beta_0(r) \frac{i\alpha e/r}{\exp(i\alpha e/r) - 1} \\ \beta_i^-(r) &= \beta_{-i}^+(r) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$p_i(r) = p_0(r) \exp\left(-\frac{i^2 \alpha e}{2r}\right) \frac{\exp\left(\frac{i\alpha e}{2r}\right) - \exp\left(-\frac{i\alpha e}{2r}\right)}{i\alpha e/r}, \quad (9)$$

$$p_0(r) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} p_i(r) = 1, \quad (10)$$

где

$$\beta_0(r) = 4\pi D r, \quad (11)$$

$$\alpha e = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 k T} \quad (12)$$

$D = kT k/e$ - коэффициент диффузии легких аэроионов,

e - элементарный заряд,

ϵ_0 - электрическая постоянная,

k - коэффициент Больцмана,

T - абсолютная температура,

k - электрическая подвижность легких аэроионов.

Поправочные множители Таммета /14/ имеют самые существенные значения для $\beta_0(r)$ и $\beta_1^-(r)$ при малых радиусах. Поэтому будем их учитывать только для тех двух коэффициентов прилипания, соответственно

$$B_0(r) = 1 - 7/(r+7), \quad (13)$$

$$B_1(r) = 1 - 7/(r + 17), \quad (14)$$

где r - в нанометрах.

В таком случае, следуя теории Фукса /10/, в правой половине формулы (9) появится множитель $B(r) = B_0(r)/B_1(r)$.

Формулу (7) можно теперь переписать с учетом поправочных множителей и формул (8) и (9)

$$\begin{aligned} \beta_S(r) &= 2 B_0(r) \beta_0(r) \rho_0(r) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} B(r) \beta_i^+(r) \rho_i(r) = \\ &= 2 \beta_0(r) \rho_0(r) \left(B_0(r) + B(r) \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{i(i+1)\alpha e}{2r}\right) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

При самых малых радиусах члены с $i \gg I$ в формулах (10) и (15) несущественны, а следовательно

$$\beta_S(r)_{\text{мм}} \approx 2 B_0(r) \beta_0(r). \quad (16)$$

Численные расчеты показывают, что с погрешностью до 10% формула (15) аппроксимируется формулой (16) до радиуса 5 нм. Следующее приближение - с учетом зарядных чисел $i = 0$ и $i = I$ в формулах (10) и (15)

$$\beta_S(r)_{\text{м}} = 2 \beta_0(r) \frac{B_0(r) + B(r) \exp(-\alpha e/r)}{1 + 2B(r) \cdot r (1 - \exp(-\alpha e/r)) / \alpha e}. \quad (17)$$

Теперь с погрешностью до 10% формула (15) аппроксимируется формулой (17) до радиуса 50 нм.

При больших радиусах в суммах формул (10) и (15) нужно вычислить и большое число слагаемых. С помощью формулы суммирования Пуассона, однако, можно вывести такие эквивалентные формулы, которые быстро сходятся именно при больших радиусах. Для больших радиусов предлагаем формулу

$$\beta_S(r)_{\text{Б}} = 2 \beta_0(r) \frac{B_0(r) + B(r) (\sqrt{2\pi r/\alpha e} (8 + \alpha e/r) / 16 - 1)}{1 + 2B(r) (\sqrt{2\pi r/\alpha e} (24 + \alpha e/r) / 48 - \frac{1}{2})}, \quad (18)$$

которая с погрешностью до 10% действительна начиная с 10 нм.

С увеличением радиуса формула (18) переходит в известную асимптотическую формулу

$$\beta_{\delta}(r)_{\text{ББ}} = 4\pi D r, \quad (19)$$

которая с погрешностью до 10% аппроксимирует формулу (15) начиная с 9 нм.

Для полного диапазона радиуса частиц хорошую точность обеспечивает формула

$$\beta_{\delta}(r) = \left(\beta_{\delta}(r)_{\text{М}} + (2r/\alpha)^4 \beta_{\delta}(r)_{\text{Б}} \right) / \left(1 + (2r/\alpha)^4 \right). \quad (20)$$

Если известно распределение радиуса аэрозольных частиц, то далее возможно вычисление эффективного коэффициента прилипания по формуле (2). Хоппелем это сделано для восьми конкретных распределений /13/. Эффективный коэффициент получился в диапазоне от $0,89 \cdot 10^{-12}$ до $5,84 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$.

Исходя из статистически обоснованного среднего распределения радиуса тропосферных аэрозольных частиц Смеркалова /15/ и формул (2) и (15), эффективный коэффициент прилипания при температуре 293 К и средней подвижности легких аэроионов $1,29 \cdot 10^4 \text{ м}^2 / (\text{с} \cdot \text{В})$, как найдено нашими численными расчетами,

$$\beta = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}.$$

Использование асимптотической формулы (19) дает такое же значение β , что объясняется малым весом диапазона радиуса от 1 до 10 нм. Следовательно, эффективный коэффициент прилипания с хорошим приближением можно выразить через средний радиус аэрозольных частиц

$$\beta \approx 4\pi D \bar{r}. \quad (21)$$

Теперь, если известны суммарная концентрация ядер конденсации Z и интенсивность ионообразования q , решением квадратного уравнения (1) можно найти концентрацию легких аэроионов n .

В условиях достаточно сильного загрязнения, если

$$(\beta Z)^2 \gg 4\alpha q, \quad (22)$$

можно упростить решение, разложив квадратный корень в степенной ряд и оставив первые члены ряда

$$n = \frac{q}{\beta z} - \frac{\alpha q^2}{\beta^3 z^3} + 2 \frac{\alpha^2 q^3}{\beta^5 z^5}. \quad (23)$$

Эту формулу можно рекомендовать начиная с концентрации $z = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (типичной для сельской местности). Приняв значения $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ и $\beta = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, получим

$$n = 7,7 \cdot 10^{18}/z - 7,3 \cdot 10^{37}/z^3 + 1,4 \cdot 10^{57}/z^5. \quad (24)$$

При вышеуказанной концентрации аэрозоля $n = 7,1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. Из формулы (24) проявляется приблизительно обратно пропорциональная зависимость концентрации аэроионов от концентрации ядер конденсации.

Л и т е р а т у р а

1. McClelland J.A., Kennedy, H. The Large Ions in the Atmosphere. - Proc. Roy. Irish Acad. A, 1912, Vol. 30, p. 72-91.
2. Nolan J.J., Boylan R.K., de Sauty G.P. The Equilibrium of Ionisation in the Atmosphere. - Proc. Roy. Irish Acad. A., 1925, Vol. 37, p. 1-12.
3. Nolan J.J., de Sauty G.P. Atmospheric Ionization. - Proc. Roy. Irish Acad. A., 1927, Vol. 37, p. 71-94.
4. Тверской П.Н. Атмосферное электричество. - Л.: Гидрометеоздат, 1949. - 252 с.
5. Israel H. Atmosphärische Elektrizität. T. 1. - Leipzig: Akad. Verlagsges. Geest & Portig K.-G., 1957. - 370 S.
6. Chalmers J.A. Atmospheric Electricity. - Pergamon Press, 1967.
7. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. - Л.: Гидрометеоздат, 1972. - 324 с.
8. Lissowski P. Das Laden von Aerosolteilchen in einer bipolaren Ionenatmosphäre. - Acta Physicochim. U.R.S.S., 1940, Bd. 13, S. 157-192.

9. Pluvinage P. Etude théorique et expérimentale de la conductibilité électrique dans les nuages non orageux. - Ann. de géophysique, 1946, t. 2, p. 31-54, p. 160-178.
10. Фукс Н.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1947, т. II, с. 341-348.
11. Bricard J. L'équilibre ionique de la basse atmosphère. - J. Géophys. Res., 1949, Vol. 54, p. 39-52.
12. Натансон Г.Л. К теории зарядки амикроскопических аэрозольных частиц в результате захвата газовых ионов. - Ж. техн. физ., 1960, т. 30, с. 573-588.
13. Noppel W.A. Ion-Aerosol Attachment Coefficients, Ion Depletion, and the Charge Distribution on Aerosols. - J. Geophys. Res., 1985, Vol. 90, p. 5917-5923.
14. Таммет Х.Ф. К интерпретации электрической плотности аэрозоля. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с.31-37.
15. Смеркалов В.А. Аппроксимация среднего распределения аэрозольных частиц по размерам. - Изв. АН СССР. ФАО, 1984, т. 20, с. 317-321.

COMBINATION OF AIR IONS IN THE CASE OF SYMMETRICAL
STEADY-STATE IONIZATION

J. Salm

S u m m a r y

Starting from the macroscopic description of the process of combination of small air ions and of condensation nuclei published by Hoppel [13], the relevant attachment coefficients $\beta_i(r)$ have been expressed relying on the earlier theory of Fuchs [10] and including the correction factors of Tammet [14]. Simplified expressions (17) and (18) of the equivalent attachment coefficient $\beta_g(r)$ have been analytically derived for the regions of small and large radii r of particles. With the aid of numerical calculations an approximation formula (20) has been proposed for a wide range of radii.

On the basis of the statistically well-grounded mean distribution of tropospheric aerosol particles by Smerkalow [15] the effective attachment coefficient has been found to be $\beta = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. This can be expressed with sufficient accuracy via the mean radius \bar{r} by means of formula (21). A simplified formula (24) has been derived for the estimation of the concentration n of small air ions in the case of typical concentrations Z of condensation nuclei (aerosols).

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА СПЕКТРОМЕТРИИ ПОДВИЖНОСТЕЙ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ

Х.Ф. Таммет, Ф.Г. Миллер, Э.И. Тамм,
Т.П. Бернотас, А.А. Мирме, Я.Й. Сальм

Введение

Состав легких аэроионов, а вместе с тем и их подвижность являются сверхчувствительными индикаторами микропримесей в воздухе. Спектр подвижности в области перехода от легких к средним и тяжелым ионам может представить существенную информацию для решения проблемы о механизмах генерирования атмосферных аэрозолей. Состав и подвижность легких ионов хорошо изучены для низких давлений и коротких возрастов. Сведения о спектре подвижности легких атмосферных ионов натурального возраста скудны. Высказанное хорошо отражается, например, в обзоре /1/. Противоречивы даже данные разных авторов о границах подвижности легких ионов.

Одна из причин недостаточности информации о спектре натуральных атмосферных ионов — низкая и непроверенная разрешающая способность аппаратуры, что приводит к "размыванию" измеренного спектра по сравнению с действительным. Другая, не менее важная причина — ограниченность наблюдательного материала, что в условиях вариативности спектра в природе может привести к кажущимся противоречиям на уровне случайных примеров.

В настоящей статье описываются аппаратура и методика измерения, позволяющие поставить непрерывные наблюдения за спектром подвижностей в диапазоне легких, а частично и в диапазоне средних аэроионов. Многоканальный метод и полная автоматизация обеспечивают достоверность результатов измерения и возможность накопления обширного наблюдательного материала.

Спектрометр подвижности разработан и изготовлен по заказу Института экспериментальной метеорологии. Авторы выражают глубокую признательность В.В. Смирнову за инициативу разработки аппаратуры, а также всем сотрудникам Аэроэлектрической лаборатории ТГУ, оказавшим помощь при ее изготовлении.

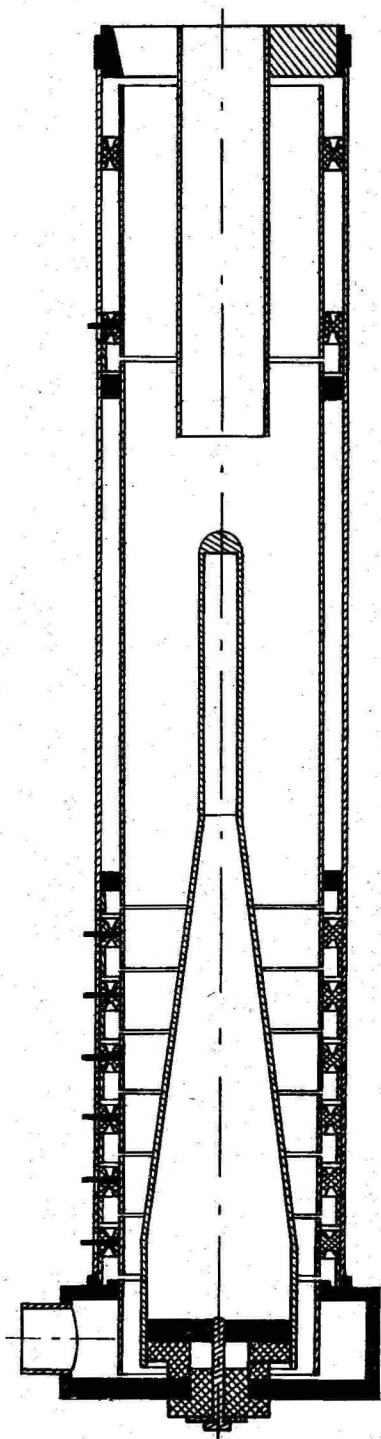


Рис. 1. Измерительный конденсатор.

Общая длина — 695 мм, диаметр — 122 мм. Воздух втягивается сверху через сетку и свободно распределяется на внешний кольцевой слой и внутреннюю струю. Внутренняя струя протекает через заземленную трубку, взвешенную сверху тремя радиальными лепестками, один из которых показан в разрезе. Внешний слой протекает через электрическое поле, создаваемое подачей напряжения на верхний 134-миллиметровый внешний электрод, и теряет все легкие ионы. Для уменьшения искажающего действия тяжелых аэроионов направление поля противоположно направлению поля в зоне собирающих обкладок /4/. Бутылкообразная внутренняя обкладка подключена к источнику напряжения и отталкивает измеряемые ионы к внешней обкладке, которая содержит 6 изолированных секций, подключенных к 6 электрометрическим усилителям. Конструкция секций заимствована из работы /5/. Воздух втягивается снизу через штуцер.

Аппаратура

Основной узел аппаратуры – спектрометр подвижности. Прототипами являются известный прибор Янкера/2/и десятиканальный спектрометр ТГУ/3/. Новый спектрометр рассчитан на повышенную разрешающую силу и, соответственно, суженный диапазон по подвижности. В нем используются предотвращающая краевой эффект схема с внешней собирающей обкладкой и отдельные электрометрические усилители для каждого канала. Устройство измерительного конденсатора разъясняет рис. 1. Используемые электрометрические усилители описаны в работе /6/.

Измерительный конденсатор и электрометрические усилители заключены в прямоугольный металлический кожух. Под измерительным конденсатором в изолированной секции кожуха расположены вентилятор для протягивания воздуха и электронная схема для автоматического блокирования электрометрических усилителей при перегрузке.

В случае повышенной влажности спектрометр подогревается при помощи электрических лампочек, расположенных вне кожуха по его бокам. Для обеспечения сохранности качества электрометрических изоляторов необходимо к спектрометру подвести тепловую мощность до 100 Вт.

Структура полного комплекта аппаратуры показана на рис. 2.

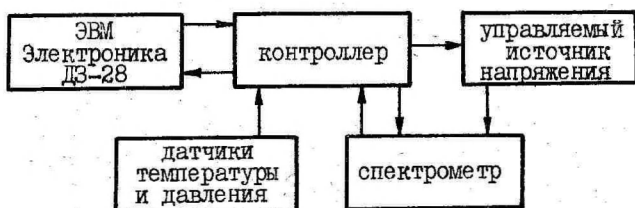


Рис. 2. Структура аппаратуры.

Программу измерения во времени во всех деталях задает ЭВМ, использующая ежеминутные сигналы прерывания от таймера, встроенного в контроллер. Контроллер управляет ключами, замыкающими входы электрометров, и источником напряжения питания внутреннего электрода измерительного конденсатора. Контроллер по командам ЭВМ снимает также сигналы с датчиков температуры и давления и с выходов электрометрических усилите-

лей, преобразует эти сигналы в код и передает ЭВМ. ЭВМ выполняет первичную обработку наблюдений и записывает результаты на кассетную магнитную ленту. Конкретная методика измерения может быть задана произвольно с помощью программы, загружаемой в ЭВМ.

Режим и первичная обработка наблюдений

Процесс наблюдений распределяется на одночасовые циклы. Результаты накапливаются в оперативной памяти ЭВМ и через каждые три часа записываются на магнитную ленту. На две стороны стандартной 90-минутной кассеты помещаются результаты непрерывных наблюдений за 3 месяца.

Внутри одночасового цикла расход протягиваемого воздуха поддерживается постоянным, а напряжение измерительного конденсатора циклически переключается. Полный расход воздуха - 3,34 л/с, расход внешнего кольцевого слоя - 6,97 л/с и центральный (среднегеометрический) расход - 7,62 л/с. Пять возможных напряжений обозначаются U_{2-} , U_{1-} , 0, U_{1+} , U_{2+} . Напряжения с одинаковыми цифрами и разными знаками в индексе по абсолютному значению равны и имеют разные полярности. Напряжение U_1 обеспечивает относительно центрального расхода для краев собирающих обкладок каналов приведенные к нормальным условиям (101325 Па и 0°C) предельные подвижности:

3,16 2,51 2,00 1,59 1,26 1,00 0,79 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Напряжение U_2 обеспечивает предельные подвижности

1,26 1,00 0,79 0,63 0,50 0,40 0,32 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Нулевое напряжение предусмотрено для обеспечения возможности учета текущего нулевого уровня выходного сигнала электрометров и для оценки аппаратного шума в условиях отсутствия сигналов ионов.

Одночасовой цикл распределен на 60 одномоментных интервалов и организован следующим образом:

1 минута - измерение давления и температуры воздуха и вычисление в зависимости от плотности воздуха напряжений U_1 и U_2 ;

2...57 минут - 7 восьмиминутных серий измерений, причем за каждую минуту обрабатываются результаты измерения предыдущей минуты;

58 минута - дополнительное измерение на нулевом напряжении для обеспечения полноты структуры измерений;

59 минута - обработка наблюдений 58-ой минуты;

60 минута - вычисление средних значений и стандартных отклонений по режимам и каналам за час.

Если наблюдалось хоть одно зашкаливание электрометра, то на место стандартного отклонения записывается условное число, которое превышает предел измерения. На каждом третьем часу - запись упакованных результатов на магнитную ленту. Запись выполняется с дублированием.

Восьминутная серия содержит наблюдения при напряжениях

$$0 \quad U_{1+} \quad U_{2+} \quad U_{1+} \quad 0 \quad U_{1-} \quad U_{2-} \quad U_{1-}.$$

Объем статистики по разным напряжениям за час будет следующим:

$$U_{2-}-7 \quad U_{1-}-14 \quad 0-15 \quad U_{1+}-14 \quad U_{2+}-7.$$

Диаграмма времени одноминутного цикла изображена на рис. 3.

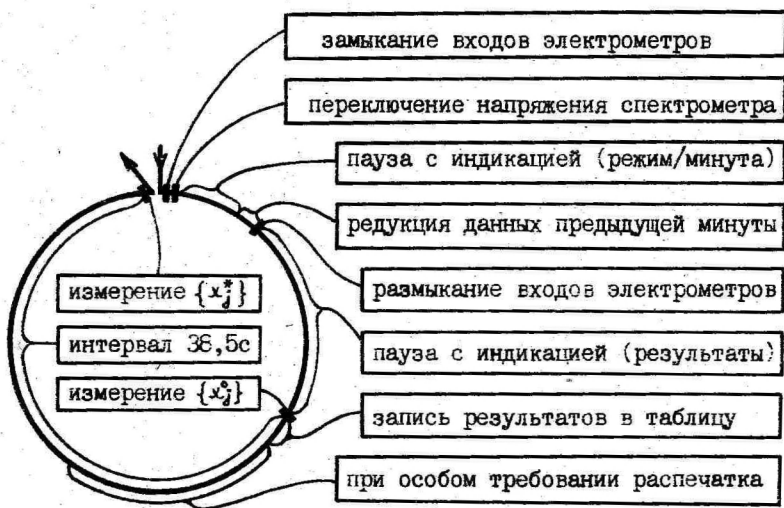


Рис. 3. Диаграмма одноминутного цикла

x_j - сигнал j -того канала, $j = 1 \dots 6$.

Редукция выходных сигналов электрометров соответствует теории RC-режима измерения, изложенной в /7/. Алгоритм следующий:

$$x_j = c_j \left(\frac{x_j^*}{1 - e^{-t/\tau_j}} - \frac{x_j^0}{e^{t/\tau_j} - 1} \right). \quad (I)$$

Здесь t - время между отсчетами (38,5 с),
 τ_j - постоянная времени электрометра (от 53 до 59 с),
 c_j - отношение идеальной ширины канала по подвижности к действительной ширине. Для конкретного измерительного конденсатора эти отношения находятся в промежутке от 0,954 до 1,024. Дополнительно сигнал преобразуется в шкалу концентрации ионов.

Запись на магнитной ленте содержит дату и время, значения давления и температуры воздуха, среднечасовые значения сигналов всех каналов по пяти режимам и стандартное отклонение сигнала по каналам для нулевого режима.

Соответствующая программа ЭВМ "Электроника ДЗ-28" написана на языке Бэйсик с использованием подпрограмм, написанных в машинных кодах.

Методика вычисления спектров

На основе зарегистрированных результатов одночасового цикла наблюдений составляется I2-компонентная логическая запись спектрометра для положительных и другая - для отрицательных ионов по следующей схеме индексации:

Логический канал	1:	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Физический канал	j :	I	2	3	4	5	6	I	2	3	4	5	6
Напряжение:		U_1	U_1	U_1	U_1	U_1	U_1	U_2	U_2	U_2	U_2	U_2	U_2

Физические каналы пронумерованы сверху вниз (см. рис. I).
 Логические каналы 5 и 7, а также 6 и 8 "перекрываются" в том смысле, что они соответствуют совпадающим интервалам подвижности ионов.

Вес логических каналов I...6 определяется по зарегистрированной дисперсии нулевого сигнала $\sigma_j^2 / I4$, а вес логических каналов 7...12 - по дисперсии $\sigma_j^2 / 7^j$ соответственно объемам внутрис часовой статистики по напряжению U_1 и U_2 .

I0-компонентный спектр $\{\varphi_j\}$ определяется как набор фракционных концентраций со следующим разбиением шкалы подвижности:

I 2 3 4 5 6 7 8 9 IO
 3,16 2,51 2,00 1,59 1,26 1,00 0,79 0,63 0,50 0,40 0,32.

Подвижность выражается в единицах $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Если не учитывать аппаратный шум, то каждая компонента логической записи выражается как линейная комбинация фракционных концентраций

$$y_i = \sum_j G_{ji} \varphi_j \quad (2)$$

Спектрометр устроен, шкалы подвижности определены и первичная обработка наблюдений выполнена так, чтобы максимально приблизиться к идеальной ситуации, когда каждый ион осаждается на "собственный" электрод своей фракции, и таблица коэффициентов G , которая называется аппаратной матрицей, состоит из нулей и единиц, в каждой строке - по одной единице.

В идеальной ситуации и при равной точности всех компонент записи оптимальный алгоритм обработки наблюдений прост:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для } i = 1 \dots 4 \quad \varphi_i = y_i, \\ \text{для } i = 5 \dots 6 \quad \varphi_i = (y_i + y_{i+2})/2, \\ \text{для } i = 7 \dots 10 \quad \varphi_i = y_{i+2}. \end{array} \right\} \quad (3)$$

Для учета отклонения аппаратной матрицы от идеальной и неравноточности каналов обработку наблюдений следует выполнить по алгоритму наименьших квадратов (см., например, /9/):

$$\left. \begin{array}{l} C = (G^T D^{-1} G)^{-1}, \\ K = C G^T D^{-1}, \\ \varphi = K y. \end{array} \right\} \quad (4)$$

D - 12×12 -диагональная матрица, на диагонали которой стоят дисперсии ошибок измерения по каналам. На диагонали 10×10 матрицы C появляются дисперсии ошибок измерения фракционных концентраций. Преобразование $y \rightarrow \varphi$ называется проявлением спектра и 10×12 матрица K - проявителем.

Упрощения, которые приводят к идеальной аппаратной матрице, предусматривают бесконечно узкую трубу выпуска ионизированного воздуха в измерительный конденсатор. Отклонение от этого условия приводит к тому, что ионы одной фракции осаждаются не только на собственный электрод, а и на соседние. К тому же приводит тепловая диффузия ионов. При выводе аппаратной матрицы эти эффекты в первом приближении могут быть

учтены на основе теоретических оценок. Существенные затруднения вызывает учет эффекта турбулентной диффузии. Как известно /10/, турбулентность в основном вносится в измерительный конденсатор из внешней среды и является поэтому изменчивой во времени. В универсальной аппаратной матрице можно учитывать лишь минимальный уровень турбулентности, в противном случае часть спектров будет "перепроявлено". Признаком "перепроявления" является появление отрицательных выбросов на флангах острых пиков в оценке спектра. Для установления допустимого уровня учета турбулентной диффузии проведен вычислительный эксперимент проявления 30 наиболее точно зарегистрированных записей при разных оценках интенсивности турбулентности. При этом была допущена линейная зависимость ширины гауссовой функции сглаживания от номера канала. Крутизна этой зависимости подобрана по критерию точности процесса проявления - восстановления записей, поскольку неправильная оценка крутизны приведет к неправильному восстановлению отношений сигналов "перекрывающихся" каналов 5-7 и 6-8. Принятая в основу обработки наблюдений оценка аппаратной матрицы следующая:

0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,95	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,05	0,91	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,08	0,85	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,11	0,77	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,70	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,93	0,03	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,87	0,06	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,79	0,10	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,85	0,00

В случае единичных ошибок всех компонент записи эта матрица приводит к таким ошибкам во фракционных концентрациях: I,03 I,06 I,11 I,19 0,81 0,85 I,07 I,17 I,33 I,22.

Сравнительный пример проявления спектра по алгоритмам (3) и (4) приведен на рис. 4.

Как видно из примера, проявление сводится к небольшой корреляции оценки спектра по сравнению с простым переносом записи согласно тривиальному алгоритму (3). При выборе алгоритма (4) учитывались и дополнительные цели - корректный

учет неравноточности каналов и построение оценки случайных ошибок измерения фракционных концентраций.

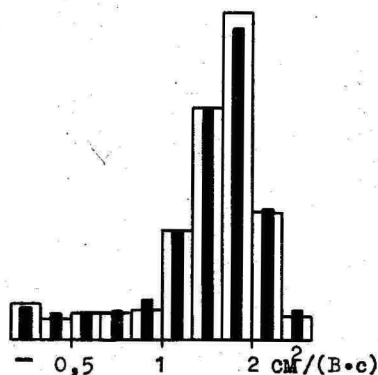


Рис. 4. Пример проявления спектра.

Ступенчатая гистограмма получена по алгоритму (4), жирные вертикальные линии в центрах столбцов - по тривиальному алгоритму (3). Проявлен спектр отрицательных ионов, измеренный в 4 ч. 13.06.85 в Тахкузе. Фракции нумеруются справа налево.

Л и т е р а т у р а

1. Mohnen V.A. Formation, Nature, and Mobility of Ions of Atmospheric Importance. - In *Electrical Processes in Atmospheres*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1977, p. 1-17.
2. Yunker E.A. The Mobility-Spectrum of Atmospheric Ions. - *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, 1940, vol. 45, p. 127 - 132.
3. Сальм Я.И. Десятиканальный спектрометр аэроионов. - В кн.: *Методы и приборы биоинформации и контроля параметров окружающей среды: Межвузовский сб.* Л.: ЛЭТИ, 1981, вып. 150, с. 34-38.

4. Сальм Я.Й. Устройство для определения спектра аэроионов. Авт. свид. СССР, кл. МКИ Н 01 J 39, № 938336, заявл. 14.II.80., опубли. 23.06.82. Бюлл. № 23.
5. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 84-92.
6. Миллер Ф.Г. К разработке электрометров прямого усиления для многоканальных спектрометров аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 124-132.
7. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 55-79.
8. Бернотас Т.П., Кольк Э.Э., Мирме А.А., Рейнарт А.Э., Таммет Х.Ф. Система сбора и обработки данных в спектрометрии аэрозолей и аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 46-53.
9. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. - Таллин: Валгус, 1975. - 100 с.
10. Сальм Я.Й. Экспериментальное исследование действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1969, вып. 239, с. 68-91.

APPARATUS AND METHODS FOR THE SPECTROMETRY
OF SMALL AIR IONS

H. Tammet, F. Miller, E. Tamm, T. Bernotas,
A. Mirme and J. Salm

S u m m a r y

The authors have designed an automatic air-ion spectrometer (Fig. 1). Partial concentrations of 10 logarithmically uniformly distributed fractions in the range of $0.32-3.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ can be measured by this apparatus. The apparatus is completed by a microcomputer, a controller and sensors of temperature and pressure (Fig. 2). The computer predicts the program of operations and carries out preliminary data processing.

Data have been collected on compact cassettes. In the second stage of data processing data will be transmitted to another computer which uses the least mean squares technique [4] for a correct presentation of spectra.

СПЕКТР АТМОСФЕРНЫХ ИОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ПОДВИЖНОСТИ $0,32-3,2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Х.Ф. Таммет, Х.Р. Ихер, Я.Й. Сальм

Введение

Авторами поставлены непрерывные наблюдения за спектрами атмосферных ионов в диапазоне подвижности от $0,32$ до $3,2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при условии логарифмического разбиения этого диапазона на 10 интервалов. Спектр представляется соответствующим набором фракционных концентраций. Аппаратура и методика наблюдений описана в работе /1/. В настоящей статье приводятся предварительные сводки результатов наблюдений, проведенных с 04.06.85 по 10.06.85 в г. Тарту и с 10.06.85 по 15.09.85 в деревне Тахкузе, где в 1984 г. проводились систематические наблюдения за спектрами подвижности легких ионов односекундного возраста /2/. Наблюдательный пункт в Тахкузе расположен в типичном редко населенном сельскохозяйственном районе - 27 км северо-восточнее города Пярну.

В наблюдательном пункте Тахкузе спектрометр с датчиком расположены на чердаке одноэтажного деревянного здания. Воздух всасывался через отверстие в вертикальном фронте чердака с высоты около 5 м от земли. Вблизи здания растут высокие лиственные деревья, в удалении - сельскохозяйственные угодья. ЭВМ, контроллер и датчик давления расположены в комнате с микроклиматом жилых помещений.

Наблюдения проводились круглосуточно, перерывы возникали только в случае технических отказов и перерывов энергоснабжения. Все наблюдения выполнены под управлением одной и той же программы, описанной в работе /1/.

Авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам АЭЛ ТТУ, оказавшим помощь при организации наблюдений в Тахкузе, а также В.В. Смирнову за предоставление аппаратуры.

Обработка наблюдений

Результаты наблюдений, первоначально записанные на касетную магнитную ленту, переписывались на гибкий диск ЭВМ "Искра-226" с помощью системы, описанной в работе /3/. Дальнейшая обработка наблюдений выполнялась на ЭВМ "Искра-226" с использованием системы программирования Бэйсик-02.

В первый этап обработки выполнялось техническое перекодирование информации и выбраковка всех часов, в течение которых наблюдалось хоть одно зашкаливание хоть одного электрометра. Во втором этапе были вычислены фракционные спектры ионов и дополнительно выбракованы те часы, когда точность измерения не удовлетворяла определенным критериям. Метод вычисления спектров представлен в работе /1/. Забраковку результатов описывает табл. I. Забракованные часы распределены не вполне однородно по времени суток - повышенная вероятность отказов электрометрической изоляции наблюдалась в утренние часы, когда влажность высокая. В утренние часы была повышена также вероятность сбоев и помех в электропитании. Суточный ход потерь наблюдений описан в табл. 5.

Таблица I

Объем наблюдений

Место	Начало	Конец	Количество часов			
			возможное	использованное	прошли I этап	прошли II этап
Тарту	04.06.85 18.00	10.06.85 7.00	133	102	91	90
Тахкузе	10.06.85 19.00	15.09.85 19.00	2328	2025	1763	1700

Результаты, полученные за второй этап, составляют базу для всех статистических сводок. Дальнейшее выбраковывание наблюдений по критерию качества измерений исключалось.

Имеется некоторая основа высказать гипотезу, что аппаратная матрица, предложенная в работе /1/, построена на основе слишком осторожной оценки аппаратного сглаживания спектра и приводит к систематическому "недопроявлению" спектров, особенно в условиях повышенной турбулентности. Уточнение аппаратной матрицы возможно только после проведения дополни-

тельных лабораторных экспериментов. Пока мы считали правильным придерживаться нижней грани оценки аппаратного сглаживания, поскольку "перепроявление" привело бы к более существенным искажениям результатов по сравнению с сохранением остаточного аппаратного сглаживания при "недопроявлении".

Во втором этапе обработки наблюдений кроме проявления была внесена коррекция на адсорбцию ионов на входной сетке измерительного конденсатора. По полуэмпирической оценке $4/\text{адсорбция}$ составляет около 4% для подвижности $2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Форма спектра и классификация ионов по подвижности

Для определения средних спектров легких аэроионов в природном воздухе из 1700 часов наблюдений в Тахкузе выбирались только те часы, когда ни один из четырех основных параметров, определяемых в подразделе, не вышел с промежутка $\bar{x} \pm \sigma_x$ ни для положительных, ни для отрицательных ионов. Количество таких часов оказалось равным 443, и они распределены более менее равномерно через весь период наблюдений. Соответствующие спектры были арифметически усреднены. Результат представлен на рис. I.

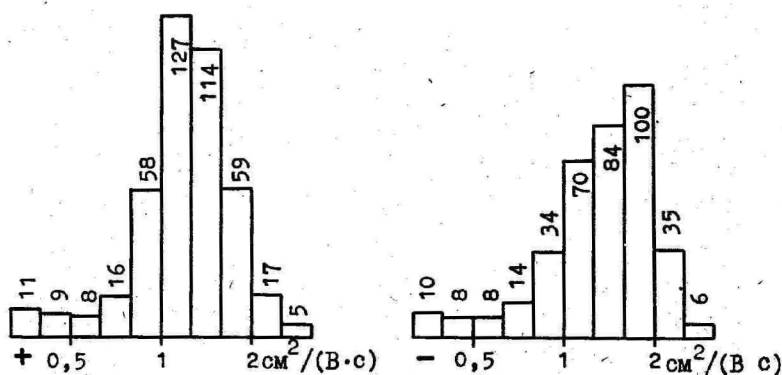


Рис. I. Средние спектры легких атмосферных ионов. Как здесь, так и в дальнейшем фракции указаны в очереди уменьшения номеров и возрастания подвижности. У каждого столбца указано число ионов в см^3 . Границы интервалов подвижности: 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,79; 1,00; 1,26; 1,58; 2,00; 2,51; 3,16.

Стандартное отклонение случайных ошибок измерения фракционных концентраций в отдельных среднечасовых спектрах порядка нескольких ионов в см^3 . Случайные ошибки в средних спектрах рис. I в десятки раз меньше. Однако не исключены заметные систематические ошибки, не уменьшающиеся при усреднении. Одна возможная ошибка — остаточное аппаратное сглаживание спектра. Вполне вероятно, что положительный результат измерения в интервале с подвижностью выше $2,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ появляется только вследствие сглаживания, и таких ионов в действительности нет. Результаты, указывающие на наличие высокоподвижных ионов в атмосфере, публиковались неоднократно, например, в работах /5, 6/. Однако во всех случаях не исключена возможность, что кажущееся наличие таких ионов является результатом низкой разрешающей силы аппаратуры и соответствующего сглаживания спектра.

Наличие малоподвижных ионов в результатах измерения нельзя объяснить приборными искажениями. Такие ионы, которые не всегда присутствуют в воздухе, представляют особый интерес.

В тех спектрах, где отчетливо выражается "тяжелый хвост", наблюдается минимум в районе подвижности $0,5-0,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Минимум наблюдается также в средних спектрах (рис. I). При просмотре набора спектров создается впечатление, что при переходе через подвижность $0,5-0,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ должна изменяться физическая природа ионов. Возможно, что в случае высоких подвижностей у иона доминируют свойства молекулярных кластеров, а в случае низких подвижностей — свойства макроскопических частиц.

Описанная закономерность подтверждает правильность использования границы $0,5-0,6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при классификации ионов. В дальнейшем мы принимаем в согласии с многими другими исследователями конкретное значение границы $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и будем называть легкими по подвижности ионами только ионы с более высокой подвижностью. Ионы с пониженными подвижностями будем относить к группе средних ионов.

Говоря ниже о концентрациях средних ионов мы имеем в виду только подгруппу с диапазоном подвижности $0,32-0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, которая была зарегистрирована при наблюдениях.

Средние ионы чаще всего распределены симметрично по полярности. Однако встречаются примеры, в которых интенсивное образование средних ионов происходит или только для положительной, или только для отрицательной полярности. Рис. 2

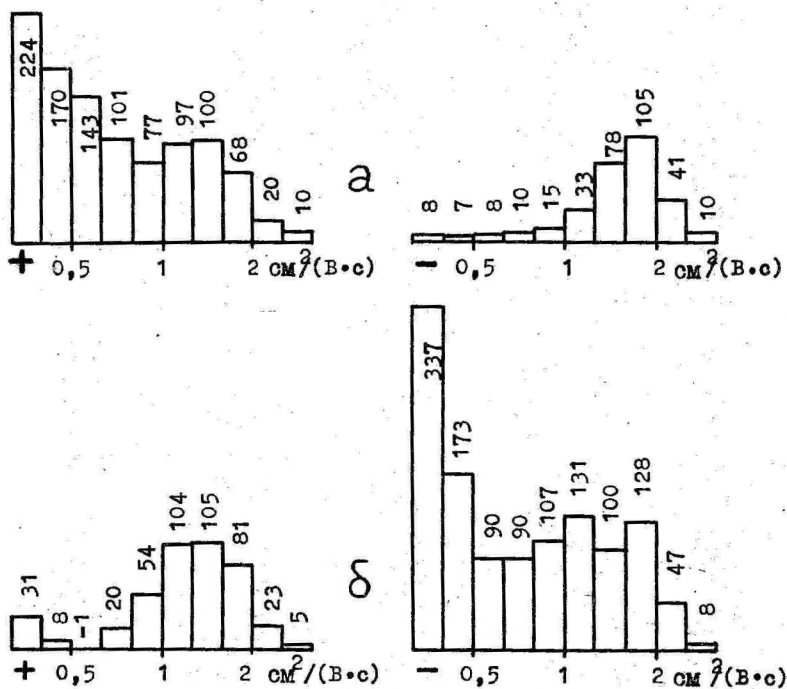


Рис. 2. Экстремальные примеры спектров.
 а - 3 часа 13.06.85; б - 17 часов 05.09.85.
 Оценки стандартного отклонения случайных ошибок не превышают 3 ионов в см^3 для любой фракции.

представляет соответствующие примеры, экстремальные также относительно пропорции средних и легких ионов. Эти примеры позволяют высказать гипотезу, что при разделении ионов на легкие и средние по их физической природе необходимо считать соответствующие диапазоны подвижности частично перекрывающимися. Например, положительные ионы с подвижностями 0,63... ..0,8 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в спектре рис. 2а по физической природе, по-видимому, относятся к средним ионам.

В распределении легких положительных ионов при достигнутой разрешающей силе всегда обнаруживался только один максимум, положение которого довольно сильно варьировалось. В спектре отрицательных легких ионов иногда наблюдалось два

максимума, что видно и на рис. 2. В обычных условиях более подвижный пик спектра сильно доминирует, и промежуточный минимум не проявляется. Экстремально узкий спектр показан на рис. 3. На этом примере реализована также экстремально высокая средняя подвижность и весьма низкая концентрация легких ионов.

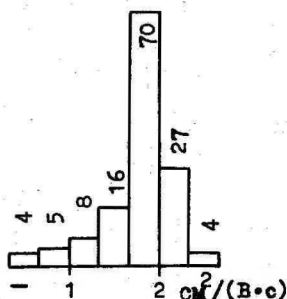


Рис. 3. Экстремально узкий спектр легких отрицательных ионов. 0 часов 30.08.85.

Наши результаты относительно формы спектра хорошо согласуются с примером, приведенным в работе Янкера /7/, с наблюдениями Мисаки и др. /8/, а также с результатами некоторых лабораторных исследований, например, результатами работы /9/.

Параметризация спектра

Для статистического анализа необходимо описать основные свойства спектра с помощью небольшого количества числовых параметров. Используемая ниже параметризация исходит из полученного выше вывода о целесообразности распределения полного диапазона спектра на поддиапазон легких ионов с подвижностями выше $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (8 первых фракций) и поддиапазон средних ионов с подвижностями ниже этого предела (2 последних фракций). Основные параметры определяются и обозначаются следующим образом:

1. Концентрация легких ионов $n = \sum_{i=1}^8 \varphi_i$.

2. Приведенная к нормальным условиям средняя подвижность легких ионов $\bar{k} = \sum_{i=1}^8 k_i \varphi_i / n$, где k_i - среднегеометрические подвижности фракций.

3. Относительная ширина спектра легких ионов

$$s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^8 k_i^2 \varphi_i / n - \bar{k}^2 \right) / \bar{k}}.$$

4. Концентрация фракции средних ионов $m = \varphi_9 + \varphi_{10}$.

В качестве дополнительного параметра рассматривается натуральная средняя подвижность легких ионов.

$$\bar{k}' = \left(\frac{101325 \text{ Па}}{p} \frac{T}{273,15} \right) \bar{k}.$$

Статистические средние и распределения

Средние значения и стандартные отклонения параметров всех 1700 пар спектров, зарегистрированных в Тахкузе, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние параметры спектров в Тахкузе

Параметр	Полярность	Среднее	Ст. откл.	Ед. измерения
n	+	408	145	см^{-3}
n	-	359	136	"-
m	+	24	16	"-
m	-	24	20	"-
\bar{k}	+	1,31	0,10	$\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
\bar{k}	-	1,47	0,13	"-
\bar{k}'	+	1,39	0,10	"-
\bar{k}'	-	1,56	0,13	"-
s	+	0,305	0,022	I
s	-	0,317	0,033	"-

Для сравнения укажем, что летом 1984 г. на о. Вильсанди найдено $\bar{k}'_+ = 1,35 \pm 0,49 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $\bar{k}'_- = 1,59 \pm 0,44 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})/10$. Последние значения получены с помощью интегральных аспирационных счетчиков в условиях больших случайных ошибок измерения, что отражается в соответственно повышенных оценках стандартных отклонений.

Средние проводимости $\lambda_+ = 9,20 \text{ фСм/м}$ и $\lambda_- = 9,12 \text{ фСм/м}$ почти равны; это говорит о подавлении электродного эффекта под высокими деревьями. Приведенные значения не включают

проводимость, обусловленную ионами с подвижностью ниже $0,32 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Статистическое распределение среднечасовых подвижностей описано таблицей 3.

Таблица 3

Распределение среднечасовых подвижностей
легких ионов в Тахкузе

	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
\bar{k}_+	12	235	584	577	234	53	5	0	0	
\bar{k}_-	2	41	135	321	463	475	196	65	2	
\bar{k}'_+	0	28	294	652	520	179	25	2	0	
\bar{k}'_-	0	5	47	150	324	487	457	188	41	

Подвижности ниже $1,1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ встречались только в случае, когда средние по физической природе ионы формально попали в диапазон подвижности легких ионов. Известные распределения Шермана /II/ отличаются от приведенных в табл. 3 в первую очередь увеличенной шириной. Возможная причина - эффект случайных ошибок измерения.

Распределения подвижностей весьма близки к нормальному распределению. Распределения концентраций легких ионов имеют заметную положительную асимметрию и повышенный эксцесс. Существенно отличается от нормального распределение концентрации средних ионов: коэффициент асимметрии превышает 9 и коэффициент эксцесса - 180. Гистограмму распределения можно найти в табл. 9.

Распределение коэффициента униполярности n_+/n_- показано в табл. 4.

Таблица 4

Распределение коэффициента униполярности n_+/n_-
в Тахкузе. В верхнем ряду границы значений,
в нижнем - число значений в указанных границах.

0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
4	66	440	747	353	72	12	3	

Таблица 5

Суточный ход параметров спектров за период наблюдений в Тахкузе. В первом столбце - начало интервала по летнему московскому времени. ν - количество учтенных суток, t - температура воздуха по Цельсию. Внизу η - оценка корреляционного отношения

	ν	t	n_+	m_+	\bar{k}_+	\bar{k}'_+	n_-	m_-	\bar{k}_-	\bar{k}'_-
0	78	14,3	441	23	1,332	1,406	393	23	1,481	1,562
1	74	13,6	443	23	1,338	1,409	391	22	1,500	1,579
2	75	13,0	437	22	1,343	1,410	384	20	1,510	1,586
3	73	12,5	452	28	1,343	1,409	392	21	1,514	1,588
4	72	12,3	440	23	1,355	1,419	380	22	1,516	1,588
5	71	11,6	437	23	1,356	1,417	376	21	1,526	1,595
6	72	11,5	406	24	1,354	1,414	350	22	1,528	1,597
7	67	11,9	399	23	1,347	1,410	344	20	1,526	1,598
8	57	12,5	397	23	1,336	1,401	341	22	1,504	1,578
9	52	14,5	401	27	1,298	1,371	348	24	1,462	1,546
10	58	15,8	391	26	1,299	1,380	338	21	1,463	1,554
11	61	16,9	385	25	1,293	1,377	334	25	1,467	1,562
12	66	18,0	396	28	1,267	1,354	347	31	1,431	1,529
13	70	18,9	399	29	1,262	1,352	348	30	1,441	1,544
14	72	19,3	392	26	1,269	1,361	343	28	1,460	1,566
15	74	19,7	389	27	1,265	1,360	341	30	1,449	1,557
16	76	19,8	379	27	1,266	1,361	334	30	1,435	1,543
17	77	20,0	381	26	1,263	1,358	338	35	1,424	1,532
18	75	19,7	373	23	1,278	1,373	331	24	1,441	1,548
19	75	18,9	381	21	1,281	1,373	340	21	1,443	1,547
20	78	18,7	387	21	1,285	1,376	344	20	1,438	1,540
21	78	17,7	400	20	1,297	1,384	364	19	1,436	1,532
22	75	16,5	420	21	1,307	1,389	381	19	1,443	1,534
23	74	15,4	444	23	1,309	1,387	405	23	1,444	1,530
η	-	64%	17%	17%	32%	23%	17%	19%	26%	19%

Суточный ход

Средний суточный ход основных параметров спектров выражен слабо. В интересах точности данные представлены в виде таблицы 5. Сильный суточный ход концентрации легких ионов,

наблюдаемый в населенных пунктах, вызван суточным ритмом антропогенного загрязнения воздуха. Концентрация легких аэроионов определяется как интенсивностью ионообразования, так и плотностью аэрозоля. В относительно редко населенной сельской местности суточные ходы двух упомянутых факторов, очевидно, компенсируют друг друга.

Ночной максимум концентрации легких ионов обусловлен редкими случаями аномально повышенной концентрации, превышающей $\bar{n} + 3\sigma_n$. Ни одна из таких аномалий не сопровождается аномалией униполярности. Вероятная причина высоких концентраций — аномально низкая концентрация аэрозолей, что встречалось только в ночные часы. Если исключить из наблюдательного материала 2% по критерию повышенной концентрации ионов, то средний суточный ход сильно придавливается — максимум n_+ в 23 и 3 часа падает до 418 см^{-3} .

Суточный ход средней подвижности тесно связан с суточным ходом температуры, что рассматривается специально.

Зависимость подвижности от температуры

Зависимость подвижности от температуры описывает табл.6.

Таблица 6

Зависимость средней подвижности от температуры по наблюдениям в Тахкузе

°C	\bar{k}_+	\bar{k}_+	\bar{k}_-	\bar{k}_-
0-5	1,52	1,48	1,71	1,63
5-10	1,45	1,40	1,62	1,55
10-15	1,40	1,33	1,57	1,49
15-20	1,38	1,29	1,54	1,46
20-25	1,34	1,24	1,51	1,41
25-30	1,32	1,21	1,52	1,39
η	33%	48%	26%	35%

Для ионов с неизменной структурой повышение температуры приводит к повышению натуральной подвижности, которая обратно пропорциональна плотности воздуха. В действительности натуральная подвижность с повышением температуры уменьшается. Это свидетельствует о зависимости структуры ионов от температуры. Зависимость может быть косвенной, ее причиной может

быть рост концентраций примесей воздуха с температурой.

Данные табл. 6 могут поставить вопрос об оправданности способа приведения подвижности пропорционально к плотности воздуха. Для получения дополнительной информации вычислялась зависимость приведенной подвижности от давления воздуха. Результаты, представленные в табл. 7, говорят об отсутствии линейной тенденции, хотя нелинейная зависимость очевидна.

Таблица 7

Зависимость приведенной средней подвижности от давления воздуха

Давление	995-1005	1005-1015	1015-1025	1025-1035	гПа
\bar{k}_+	1,35	1,30	1,30	1,36	см ² /(В·с)
Число случаев	66	795	669	158	

При исследовании подвижностей односекундных ионов зависимость приведенной подвижности от температуры не была обнаружена /2/. Вероятно, что зависимость от температуры обусловлена такими примесями, концентрация которых настолько мала, что время релаксации реакций с ионами существенно выше одной секунды.

Линейные корреляции

Оценка линейных статистических связей в наборе основных параметров представлена в табл. 8. Если не говорить об уже рассмотренных проблемах, то в остальном данные табл. 8 не противоречат привычным представлениям о закономерностях поведения атмосферных ионов.

Таблица 8

Оценки коэффициентов линейной корреляции r за весь период наблюдений. Число реализаций - 1790, и критическое на 99% доверительном уровне значение оценки коэффициента корреляции составляет 6%

$r, \%$	t	n_+	m_+	\bar{k}_+	n_-	m_-	\bar{k}_-
t	+100	-12	-7	-49	-10	+2	-39
n_+	-12	+100	+20	-23	+97	+15	-28
m_+	-7	+20	+100	-24	+17	+63	-23

Продолжение табл. 8

r, %	t	n_+	m_+	\bar{k}_+	n_-	m_-	\bar{k}_-
\bar{k}_+	-49	-23	-24	+100	-24	-28	+86
n_-	-10	+97	+17	-24	+100	+20	-33
m_-	+2	+15	+63	-28	+20	+100	-37
\bar{k}_-	-39	-28	-23	+86	-33	-37	+100

Ионизация и аэрозолеобразование

Образование средних аэроионов является одним из дискутируемых механизмов генерирования атмосферного аэрозоля. Основным интерес представляет проблема конденсации на ионах веществ, отличных от воды и способных образовать стабильные частицы. Некоторые механизмы такого процесса известны [12]. Результаты настоящих наблюдений отчетливо демонстрируют и количественно описывают образование средних ионов в атмосфере и позволяют сделать некоторые выводы относительно аэрозолеобразования.

При наблюдениях за спектрами односекундных ионов в этом же наблюдательном пункте средние ионы не были обнаружены [2]. В специальном опыте в 22 часа 09.06.85 с воздухом г. Тарту на один час перед спектрометром был установлен слабый радиоактивный препарат, что повысило концентрацию легких ионов до 1500 см^{-3} . Это не привело к росту концентрации средних ионов, которая осталась на уровне 20 см^{-3} . Все это указывает на то, что концентрация средних ионов не растет при усилении ионообразования, а придерживается на определенном низком уровне каким-то ограничивающим фактором. Таким фактором может быть концентрация какой-то примеси в воздухе, которая необходима для образования средних ионов.

Поскольку эффект образования средних ионов почти всегда насыщен на уровне природной интенсивности ионообразования, то понятно, почему путем искусственного ионообразования в лабораторных экспериментах не удастся вызвать интенсивного аэрозолеобразования.

Примесью, управляющей образованием средних ионов, не может служить вода, количество которой в воздухе не позволяет объяснить эффект насыщения. Концентрация средних ионов по материалам наблюдений явно не детерминирована влажностью.

Встречаются спектры со средними ионами и спектры без средних ионов как в условиях тумана, так и в сухую погоду. Примеры сильной зарядовой асимметрии, продемонстрированные на рис. 2, говорят о том, что должны существовать разные примеси, способные образовывать средние ионы или одной, или другой полярности. Химическая природа таких примесей пока неизвестна. Задача идентификации упростилась бы, если удалось бы найти условия, в которых стабильно возникают средние ионы. По данным работы /18/ можно предполагать возможность существования таких условий в Карлсбадских пещерах (США), где были зарегистрированы средние подвижности $+0,35 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $-0,50 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для объединенной группы легких и средних ионов в условиях концентрации, превышающей 600000 см^{-3} .

В г. Тарту за период от 04.06.85 до 10.06.85 наблюдалось в среднем $m_+ = m_- = 57 \text{ см}^{-3}$ (в Тахкузе - 24 см^{-3}). Ограниченный объем наблюдений в городе (90 часов) не позволяет сделать из этого уверенного вывода об увеличении концентрации средних ионов в условиях повышенной антропогенной загрязненности воздуха.

Количественное описание статистического распределения концентраций средних ионов и зарядовой симметрии можно найти в табл. 9. На фоне детализированных в таблице малых концентраций наблюдаются отдельные сильно выделяющиеся примеры. К таковым относятся и примеры рис. 2, где m_+ достигает значения 394 см^{-3} (а) и $m_- = 510 \text{ см}^{-3}$ (б).

Таблица 9

Двухмерное распределение концентраций средних ионов разных полярностей с подвижностью от $0,32$ до $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в Тахкузе

m_+ \ m_-	<10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	>60	Σ
<10	22	39	7	3	0	0	0	71
10-20	109	375	106	27	4	1	0	622
20-30	28	232	291	70	16	2	6	645
30-40	2	27	66	70	31	10	4	210
40-50	1	2	6	21	21	15	11	77
50-60	0	0	0	1	7	13	17	38
>60	1	1	1	0	2	5	27	37
Σ	163	676	477	192	81	46	65	1700

Выше предполагалось, что средние ионы образуются вследствие конденсации вещества на легких ионах. Постараемся теперь оценить конкурирующую гипотезу, согласно которой частицы образуются в нейтральном виде и заряжаются вследствие диффузии легких ионов к частицам подобно тяжелым ионам. Диапазону подвижности $0,32-0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ соответствует диапазон диаметром $2-2,7 \text{ нм}$. По наиболее достоверным результатам /14/ средняя вероятность нести заряд одной полярности для этого диапазона около $0,007$. Если $n = 500$ (см. рис. 2), то должно существовать около 70000 нейтральных частиц размером $2-2,7 \text{ нм}$ в см^3 . Имеющиеся данные /15/ говорят о средней концентрации таких частиц в приземном воздухе, не превышающей несколько сотен в см^3 , что приводит к образованию нескольких средних ионов в см^3 . Гипотеза образования средних ионов из нейтральных частиц испытывает затруднения и при объяснении наблюдаемых случаев зарядовой асимметрии.

Однако высказанное недостаточно для решительного опровержения гипотезы образования некоторой части средних ионов из нейтральных частиц. Возможно, что оба рассматриваемых механизма играют в реальной атмосфере свою роль. Пример рис. 26 мог бы получить следующее гипотетическое объяснение. На отрицательных легких ионах активно растут частицы. Эти частицы нейтрализуются при рекомбинации с положительными ионами, и таким образом возникает аномально повышенное количество мелких нейтральных частиц. Путем диффузии положительных ионов к нейтральным частицам возникают положительные ионы с подвижностью $0,32-0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (см. рис. 26).

На основе приведенных результатов наблюдений и спекулятивных рассуждений можно предложить для обсуждения двойную схему классификации атмосферных ионов. Традиционная классификация разделяет атмосферные ионы на легкие, средние и тяжелые формально на основе подвижности. Условная граница $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ между легкими и средними ионами нашла подтверждение в настоящей работе. Для уточнения формальной границы между средними и тяжелыми ионами необходимы дополнительные наблюдения.

Вторая классификация основана на физической природе ионов:

- кластерные ионы - частицы со свойствами молекулярных кластеров,
- конденсационные ионы - частицы со свойствами макроскопических тел, возникающих из кластерных ионов путем роста их размеров,

- аэрозольные ионы - частицы, возникающие в результате прилипания кластерного или конденсационного иона к аэрозольным частицам.

Разница между физическими свойствами молекулярных кластеров и микроскопических тел рассмотрена, например, в книге /16/.

Диапазоны подвижности разных физических групп ионов перекрываются. Если принимать вышеприведенное объяснение спектров рис. 26, то надо сказать, что ионы подвижностью $0,32-0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ в этом конкретном примере конденсационные в случае отрицательной и аэрозольные в случае положительной полярности.

Для проверки вышеизложенных гипотез и для уточнения роли атмосферных ионов в балансе атмосферного аэрозоля следует поставить систематические наблюдения за спектрами атмосферных ионов в расширенном диапазоне подвижности.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. и др. Аппаратура и методика спектрометрии подвижностей легких аэроионов.-См. наст. сб., с.18-28.
2. Таммет Х.Ф., Ихер Х.Р., Миллер Ф.Г. Спектр подвижностей односекундных легких аэроионов в природном воздухе. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 26-36.
3. Бернотас Т.П. и др. Система сбора и обработки данных в спектрометрии аэрозолей и аэроионов. - Уч. зап.Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 46-53.
4. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1967, вып. 195, с. 1-232.
5. Eichmeier J., Braun W. Beweglichkeitsspektrometrie atmosphärischer Ionen. - Meteorol. Rdsch., 1972, 25.Jg. S. 14-19.
6. Cabane M., Milani M.R. Study of the Mobility of Small ions in Air. - Res. Lett. Atmos. Elect., 1983, vol. 3, p. 55-59.
7. Yunker E.A. The mobility spectrum of atmospheric ions.- Terr. Magn. Atmos. Electricity, 1940, vol. 45, p. 127-132.

8. Misaki M., Ohtagaki M., Kanazawa I. Mobility spectrometry of the atmospheric ions in relation to atmospheric pollution. - PAGEOPH, 1972, vol. 100, N 8, p. 133-145.
9. Thomson B.A., Iribarne J.V. Positive and Negative Ion Mobility Spectra of Spray-Produced Ions. - In: Electrical Processes in Atmospheres. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1977, p. 18-23.
10. Хыррак У.Э. Статистические сводки результатов измерения ионов и аэрозолей на о. Вилсанди летом 1984 года. См. наст. сб., с. 47-57.
11. Sherman K.L. Atmospheric Electricity at the College-Fairbanks Polar Year Station. - Terr. Magn. Atmos. Elect., 1937, vol. 42, p. 371-390.
12. Banic C.M., Diamond G.L., Iribarne J.V. Ion-Induced Gas-to-Particle reactions. - In: Proceedings in Atmospheric Electricity. Hampton: A. Deepak Publishing, 1983, p. 36-39.
13. Wilkening M. Characteristics of Atmospheric Ions in Contrasting Environments. - J. Geoph. Res., 1985, vol. 90, p. 5933-5935.
14. Hoppel W.A. Ion-Aerosol Attachment Coefficients, Ion Depletion, and the Charge Distribution on Aerosols. - J. Geoph. Res., 1985, vol. 90, p. 5917-5923.
15. Смеркалов В.А. Аппроксимация среднего распределения аэрозольных частиц по размерам. - Изв. АН СССР. ФАО, 1984, т. 20, с. 317-321.
16. Петров Ю.И. Физика малых частиц. - М.: Наука, 1982. - 360 с.

THE SPECTRUM OF ATMOSPHERIC IONS IN THE RANGE
OF $0.32 - 3.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

H. Tammet, H. Iher and J. Salm

S u m m a r y

Data on the mobility spectra of natural air ions are scanty [1]. The present authors have carried out observations of the spectrum of air ions in the town of Tartu on 4th to 10th June 1985 and in a typical underpopulated rural environment - at the village of Tahkuse in the Estonian S.S.R. on 10th June to 15th September 1985. The observations were carried out throughout day and night. The hourly median mobility spectra of negative and positive air ions with estimates of measuring errors were stored up on a magnetic tape. Finally, the authors obtained data of 90 hours for the town and of 1700 hours for the village.

The mean air-ion spectra are presented in Fig. 1. At each column the number of air ions is shown in cm^3 . A deep minimum in the range of $0.5 - 0.6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ is evident in the spectra. Further on we shall consider as small air ions those ions which have mobilities over $0.5 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ (fractions 1...8) and as intermediate air ions - less mobile fractions (9 and 10). The authors have rarely observed spectra of quite different form showing large concentrations of intermediate ions of one or another sign (Fig. 2).

The mobility spectra have been parametrized, making use of the concentration of small air ions n , the concentration of intermediate air ions m , the reduced mean mobility of air ions \bar{K} (without reduction - \bar{K}'), and the relative width of the small air ion spectra s . The mean values and standard deviations of the parameters are presented in Table 2, the distribution of hourly mean mobilities - in Table 3, the distribution of the coefficient of unipolarity - in Table 4, and the diurnal variation of the parameters - in Table 5. The correlation coefficients between the parameters are shown in Table 6.

Two hypothetical processes of the formation of intermediate air ions (growth from small ions or charging of neutral particles) have been comparatively discussed. Probably both the processes play their own role. For example, Fig. 2b can be explained by means of the hypothesis that negative small ions are growing to intermediate ions, which on recombining turn into neutral particles and some of the latter are afterwards charged positively.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОДКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ИОНОВ И АЭРОЗОЛЕЙ НА О.ВИЛЬСАНДИ ЛЕТОМ 1984 ГОДА

У.Э. Хыррак

Введение

В настоящей работе приведены основные статистические характеристики результатов наблюдений, проведенных на о. Вильсанди за период от 23.07.84 до 12.09.84 экспедицией, организованной М.У. Арольдом.

О. Вильсанди расположен в Балтийском море 6 км западнее о. Сааремаа /1/. Аппаратура была размещена в специальном павильоне, спроектированном М.У. Арольдм по примеру павильона, описанного в работах /1, 2/. Анализируемый воздух всасывался с высоты 2 м. Расстояние павильона от южного берега о. Вильсанди - 0,6 км, от северо-западного мыса - 2 км, а от северного - 1,5 км.

Программа наблюдений была составлена Х.Ф. Тамметом и включала непрерывную регистрацию при помощи аспирационных счетчиков УТ-840I полярных проводимостей (предельная подвижность $k_0 = 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), концентраций легких аэроионов ($k_0 = 0,32 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) и тяжелых аэроионов ($k_0 = 0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Через каждые три часа при помощи прибора П КОГ-0,2-00I регистрировались фракционные концентрации аэрозольных частиц в интервалах между диаметрами 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; ∞ мкм. С такой же частотой были зарегистрированы основные метеозлементы, измеренные метеостанцией, расположенной на северо-западном мысе острова. Программа наблюдений включала также систематические исследования счетчиков аэроионов на эксплуатационную надежность /3/.

Все результаты наблюдений за аэроионами непрерывно записывались на бумажные ленты самописцев. Предварительная обработка наблюдений заключалась в визуальном усреднении кривых по часам, в регистрации часовых средних и специально зарегистрированного за каждые три часа нулевого уровня в журнале, из которого данные были переведены в ЭВМ. Предварительную обработку осуществили студенты П.О.Пост и Э.А.Пылд.

Автор статьи выражает глубокую благодарность М.У. Арольду и Х.Ф. Таммету за любезное предоставление данных наблюдений и руководство работой.

Средние и вариации

Статистические оценки величин, описывающих ионизацию воздуха, приведены в табл. I. Коэффициент вариации определен как отношение стандартного отклонения к среднему значению.

Таблица I

Статистические оценки полярных проводимостей (λ_{\pm}), концентрации легких (n_{\pm}) и тяжелых ионов (N_{\pm}), подвижностей (k_{\pm}) и коэффициентов униполярностей легких (n_{+}/n_{-}) и тяжелых ионов (N_{+}/N_{-})

Величина	Единица измерения	Кол-во измерений	Мин. знач.	Средн. знач.	Макс. знач.	Коеф. вар.
λ_{-}	фС/м	817	0,9	4,7	17,2	0,50
λ_{+}	"	893	0,4	5,3	21,1	0,45
n_{-}	см ⁻³	741	35	173	411	0,39
n_{+}	"	878	38	261	935	0,48
N_{-}	"	558	17	589	3020	0,54
N_{+}	"	633	13	628	2360	0,60
k_{-}	см ² /(В·с)	629	0,52	1,59	3,00	0,28
k_{+}	"	764	0,51	1,36	2,98	0,36
n_{+}/n_{-}		716	0,29	1,58	5,60	0,43
N_{+}/N_{-}		372	0,06	1,14	7,97	0,71

Более детальный анализ показывает, что распределения измеренных величин имеют повышенный эксцесс по сравнению с нормальным распределением. Существуют особые ситуации, когда результаты наблюдений сильно выходят из обычного диапазона. Существование таких ситуаций является одной из причин высоких значений коэффициентов вариации.

Следует обратить внимание на низкие значения полярных проводимостей ($\lambda_{-} = 4,7$ фС/м, $\lambda_{+} = 5,3$ фС/м). Явление можно объяснить своеобразием ионизационного режима прибрежных мест /2, 4/.

В табл. 2 даны статистические оценки для концентраций фракций аэрозолей и некоторых метеозементах. 3 отличие от

табл. 1 в табл. 2 приведены данные, вычисленные не по среднечасовым, а по трехчасовым средним величинам.

Таблица 2

Статистические оценки концентраций фракций аэрозолей A_1 диаметром $d \geq 1$ мкм, $A_2 - (0,8-1)$ мкм, $A_3 - (0,6-0,8)$ мкм, $A_4 - (0,5-0,6)$ мкм, $A_5 - (0,4-0,5)$ мкм, $A_6 - (0,3-0,4)$ мкм, $A_7 - (0,2-0,3)$ мкм и метеозлементов

Величина	Единица измерения	Кол-во измер.	Мин. знач.	Средн. знач.	Макс. знач.	Кэф. вар.
A_1	дм ⁻³	225	12	148	824	0,8
A_2	"	225	4	91	674	0,9
A_3	"	225	20	235	2520	1,2
A_4	"	224	22	526	4810	1,3
A_5	10 дм ⁻³	225	7	223	2637	1,5
A_6	"	224	31	802	5886	1,3
A_7	100 дм ⁻³	224	14	940	4988	1,1
Процент облачности	1%	362	0	63	100	0,6
Направление ветра	градус	360	0	202	350	0,6
Скорость ветра		362	0	5,3	14,0	0,5
Температура земли	°C	362	5,5	18,0	41,8	0,4
Температура воздуха	°C	362	9,2	16,0	27,3	0,2
Давление	кПа	362	90,6	100,8	102,6	0,02

Распределение фракционных концентраций аэрозоля во времени еще больше отличается от нормального распределения по сравнению с концентрациями аэроионов. Типичный коэффициент асимметрии - 3-4 и коэффициент эксцесса - около 20. Не исключена возможность, что прибор П КОГ-0,2-001 в некоторых случаях выходил из строя и давал неправильные показания. Поэтому не гарантируется полная достоверность результатов аэрозольных измерений.

Точность аэроионных измерений была проверена специальной организацией наблюдений. Используя избыточность количества счетчиков, было осуществлено систематическое дублирование

измерений в условиях циклических перестановок приборов. Организация предварительной обработки наблюдений обеспечила полную независимость обработки дублирующих друг друга данных. Для характеристики ошибок измерений пользовались величиной $\bar{Z} = 2(x_1 - x_2)/(x_1 + x_2)$, где x_1 и x_2 - результаты дублированных наблюдений. Для всех дублированных измерений (609 раз) среднее значение величины $\bar{Z} = 0,1$ и стандартное отклонение $\sigma_{\bar{Z}} = 0,27$. Это означает, что точность измерения невелика и будет отражаться также в соответствующем ослаблении корреляционных связей между измеряемыми величинами.

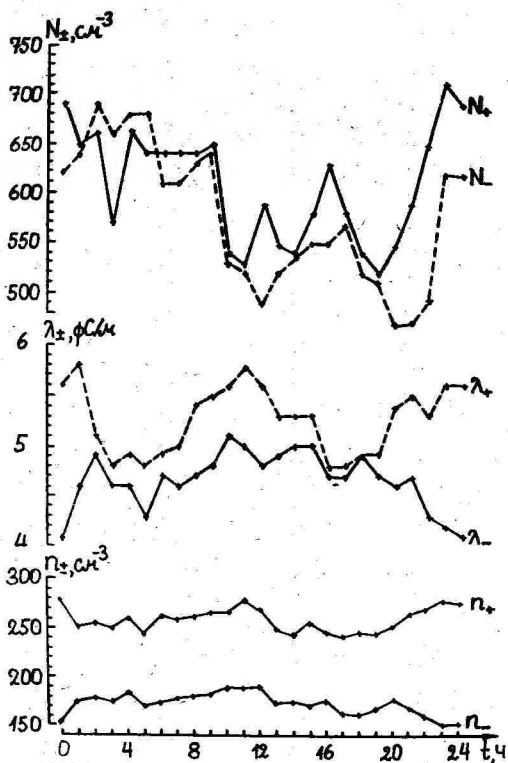


Рис. 1. Суточные вариации отрицательных и положительных проводимостей (λ_{\pm}), концентрации легких (n_{\pm}) и тяжелых ионов (N_{\pm}).

Суточные вариации проводимостей, концентрации ионов и фракции аэрозолей, осредненные по всему периоду наблюдений, имеют довольно консервативный характер. Коэффициенты вариаций этих величин не превосходят 0,12. Суточные вариации проводимостей, концентраций легких и тяжелых ионов приведены на рис. 1.

Суточная вариация суммарной концентрации аэрозолей $d \geq 0,2$ мкм определена вариацией самой мелкой фракции $d = (0,2 - 0,3)$ мкм (относительная концентрация - 81%). Суточные вариации концентраций фракций аэрозолей имеют разные ходы, но для всех фракций наблюдается максимум около 16 часов (летнее московское время).

Статистические связи между измеренными величинами

Для анализа статистических связей были составлены таблицы двумерных распределений и вычислены коэффициенты связи. Полученные результаты приводят к следующим выводам:

I. Сильно коррелирует полярные проводимости и концентрация легких ионов. Оценки корреляционных коэффициентов не меньше, чем 73%. Линейные зависимости между ними можно объяснить относительной стабильностью подвижностей легких аэроионов ($k_- = 1,59 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\sigma_{k_-} = 0,44 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $k_+ = 1,36 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\sigma_{k_+} = 0,49 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$).

Оценки корреляционных связей между отрицательными и положительными проводимостями, концентрациями легких и тяжелых ионов даны в табл. 3.

Таблица 3

Оценки коэффициентов корреляции в % между λ_{\pm} , n_{\pm} и N_{\pm} . Критическое значение абсолютной величины коэффициента корреляции при доверительной вероятности 95% и минимальном объеме данных равно 9%

	λ_-	λ_+	n_-	n_+	N_-	N_+
λ_-	100	83	82	79	-10	-32
λ_+		100	70	78	-30	-35
n_-			100	73	-12	-34
n_+				100	-2	-27
N_-					100	40
N_+						100

Как известно, оценки коэффициентов корреляции зависят от случайных ошибок измерений. Представляет интерес уточнить оценки коэффициентов корреляций с элиминированием влияний ошибок измерений. Для этой цели были использованы данные о распределении относительной ошибки дублирования, т.е. величины ξ . Выяснилось, что скорректированные оценки коэффициентов корреляции между проводимостями и концентрациями легких ионов приближается к 100%. Оценки корреляционных связей проводимости и концентраций легких ионов с концентрациями тяжелых ионов практически не изменялись.

2. Слабая корреляция концентраций и проводимости легких ионов с концентрацией тяжелых ионов (оценки корреляционных коэффициентов отрицательные и не превышают по абсолютной величине 35%) указывает на то, что в природных условиях противоположный ход этих величин, как это указывалось в городских условиях /5, 7/, слабо выражен.

3. Корреляция между концентрациями отрицательных и положительных тяжелых ионов ($k_0 = 0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) слабая, оценка коэффициента корреляций $r \approx 40\%$. Ожидалась более сильная зависимость между ними. Это явление нельзя объяснить только ошибками измерения.

4. Относительно слабая корреляция концентраций грубодисперсного аэрозоля ($d \geq 1 \text{ мкм}$) с концентрациями мелких фракций среднedisперсного аэрозоля ($d = (0,2-0,5) \text{ мкм}$) указывает на разные механизмы их генераций. Среднedisперсные аэрозоли являются преимущественно продуктами конденсационно-коагуляционных процессов, а грубодисперсные аэрозоли - процессов диспергирования /6/. Оценки корреляционных коэффициентов фракций аэрозолей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценки коэффициентов корреляций между концентрациями фракций аэрозолей. Критическое значение коэффициента корреляции при доверительной вероятности 95% $r = 12\%$

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
A_1	100	79	70	52	57	51	52
A_2		100	94	75	82	76	72
A_3			100	83	90	82	76
A_4				100	86	76	73
A_5					100	93	89
A_6						100	96
A_7							100

5. Распределение аэрозолей в атмосфере отличается от распределения Юнге: $n(r) = -Cr^4$. Самое хорошее приближение к обобщенному распределению Юнге получаем при показателе степени $\nu = 4,85$. Для объяснения этого результата можно выдвинуть гипотезу, что распределение Юнге при $\nu = 4$ учитывает наличие антропогенных аэрозолей, которые на о. Вильсанди представлены слабее среднего уровня. Функция распределения концентраций аэрозолей, осредненная по всему периоду измерений, дана в табл. 5.

Таблица 5

Функция распределения аэрозолей. Коэффициенты "С" приведены для показателя степени $\nu = 4,85$

Фракции (мкм)	> I	0,8-I	0,6-0,8	0,5-0,6	0,4-0,5	0,3-0,4	0,2-0,3
Концентр. (дм ⁻³)	150	90	240	530	2230	8010	94000
С	40	18	13	19	30	31	65

Несходство данной и обобщенной функции распределения Юнге проявляется в изменении коэффициентов распределения "С". Для обобщенной функции распределения Юнге $C = \text{const}$.

Нет никаких оснований для такого резкого увеличения коэффициента распределения "С" при последней фракции $d = (0,2-0,3)$ мкм. По всей вероятности, канал $d = (0,2-0,3)$ мкм аэрозольного счетчика оказался несколько шире рассчитанного. Соответствующие концентрации фракций $d = (0,2-0,3)$ мкм должны быть приблизительно вдвое меньше показаний канала, т.к. это соответствует соотношению коэффициентов распределения "С" данной фракции к соседним фракциям. При выявлении показателя степени ν эта фракция в учет не принималась.

6. Корреляционные и регрессионные связи концентраций аэроионов с концентрацией среднedisперсных аэрозолей в общем слабые. Оценки коэффициентов корреляций и регрессий для этих величин приведены в табл. 6.

Связи концентрации и проводимости легких ионов с фракционными концентрациями среднedisперсных аэрозолей становятся сильнее в случае мелких фракций, при которых можно наблюдать обратнопропорциональные зависимости.

Как видно из табл. 6, для проявлений связей регрессион-

ный анализ не дает существенно больше корреляционного анализа в силу большой разбросанности корреляционных полей.

Таблица 6

Оценки коэффициентов корреляции и коэффициентов регрессий зависимости концентраций ионов и проводимостей от концентрации аэрозолей. В скобках приведены абсолютные значения критических величин коэффициентов для данного ряда при доверительной вероятности 95%

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
λ_-	-26(13) 33	-26 33	-28 30	-39 41	-43 48	-51 54	-57 65
λ_+	-43(12) 47	-39 41	-47 52	-52 57	-42 43	-43 46	-44 52
n_-	-14(13) 23	-21 25	-26 28	-25 30	-24 29	-28 34	-31 38
n_+	-26(12) 29	-29 30	-40 42	-45 50	-40 46	-51 53	-57 58
N_-	8(15) 15	7 35	7 30	9 29	-5 32	-18 28	-20 36
N_+	8(14) 20	4 12	1 16	-11 24	-20 32	-22 32	-23 33

7. Независимость концентрации тяжелых ионов ($k_o = 0,001 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) от концентрации фракций среднedisперсных аэрозолей дает основание предполагать существование относительно самостоятельной мелкодисперсной фазы аэрозолей $d \leq 0,05 \text{ мкм}$ в общем спектре аэрозоля этой местности.

8. Сравнительный анализ зависимости концентрации ионов и аэрозолей от направления ветра подтверждает, что атмосферно-электрические факторы можно использовать как характеристики аэрозольного загрязнения окружающей среды /5, 7/. Самой лучшей оказывается суммарная проводимость ($k_o = 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), практически столь же хорошие и полярные проводимости. Коэффициент загрязнения N/n , рекомендованный многими авторами, не имеет реальных преимуществ.

Нужно отметить, что выводы, приведенные в настоящей ра-

боте, были сделаны по материалам кратковременных локальных наблюдений, поэтому их нельзя без критического анализа перенести на другие районы и другие условия.

Л и т е р а т у р а

1. Арольд М.У., Матизен Р.Л., Рейнарт М.А., Эвель Я.Р. О региональных фоновых атмосферно-электрических наблюдениях на острове Вильсанди. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 40-47.
2. Соколенко Л.Г., Ваюшина Г.П. Измерение величин атмосферного электричества на острове Вильсанди. - Труды ГГО, 1984, вып. 474, с. 98-107.
3. Матизен Р.Л. Эксплуатационная надежность счетчика аэроионов Т-840I. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 37-45.
4. Шварц Я.М., Ваюшина Г.П., Соколенко Л.Г. Измерения величины атмосферного электричества в прибрежном районе. - В кн.: Атмосферное электричество: Труды II Всесоюз. симпозиума. Ленинград, 26-28 октября 1982 г. Л.: Гидрометеиздат, 1984, с. 53-54.
5. Прюллер П.К. Исследование спектра атмосферных ионов, гигиеническое и биометеорологическое значение ионизации атмосферы по данным измерений в г. Тарту. - Уч. зап. Тарт. ун-та, вып. 240, с. 61-129.
6. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 365 с.
7. Reinet J. Atmosfääri ionisatsiooni muutustest Tartus aastase perioodi vältel. - Уч. зап. Тарт. ун-та, вып. 59, с. 71-99.

STATISTICAL RESULTS OF AIR IONS AND AEROSOL MEASUREMENTS
ON THE ISLAND OF VILSANDI IN THE SUMMER OF 1984

U. Hörrak

S u m m a r y

The present paper discusses the results of the measurements carried out during the time of the expedition to the Island of Vilsandi organized by M. Arold in the period of 23.07.84 - 12.09.84. According to the measurement programme composed by H. Tammet positive and negative air electrical conductivities λ_{\pm} (limiting mobility $k_0 = 2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, small ion concentrations n_{\pm} ($k_0 = 0.32 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) and large ion concentrations N_{\pm} ($k_0 = 0.001 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) as well as aerosol fraction concentrations with diameters $d = 0.2-0.3; 0.3-0.4; 0.4-0.5; 0.5-0.6; 0.6-0.8; 0.8-1; 1-\infty \mu\text{m}$ were recorded diurnally.

Table 1 presents statistical estimates of the quantities of atmospheric ionization on the basis of the data collected during the expedition. Table 2 contains the same statistical estimates of the fraction concentrations of aerosols of average dispersity and of some meteorological quantities. Averaged diurnal changes in conductivities, concentrations of positive and negative air ions are shown in Fig. 1.

The estimates of the correlation coefficients which characterize linear dependence of air conductivity and air ion concentrations of different polarity are presented in Table 3, and the same estimates of aerosol fraction concentrations are given in Table 4. Table 5 illustrates differences in the averaged aerosol distribution from those of the Junge distribution ($n(r) = -cr^{-\nu}$, $\nu = 4$). The best approximation to the averaged aerosol distribution is obtained by the generalized Junge distribution with an exponent $\nu = 4.85$. The estimates of linear and nonlinear regression coefficients for air conductivity and ion concentrations of different polarity with aerosol fraction concentrations are shown in Table 6. Correlations between small air-ion concentrations (just as between polar

conductivities) and fraction concentration aerosols of average dispersity are generally weak. A stronger correlation is observed in the case of finer aerosol fractions when the reversely proportional correlation becomes evident.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СЧЕТЧИКОВ АЭРОИОНОВ

Р.Л. Матизен

Изучение влияния внешних условий на счетчики аэроионов с целью обеспечения и проверки их стойкости и надежности должно осуществляться в направлении обобщения практического опыта эксплуатации счетчиков аэроионов, анализа причин и механизма отказов, лабораторных испытаний и испытаний в естественных условиях работы. Испытания при работе в полевых условиях были проведены на о. Вильсанди летом 1984 года. Результаты приведены в статье /1/. Важным компонентом лабораторных испытаний на надежность являются климатические испытания. В настоящей работе не ставилась задача проведения климатических испытаний по методикам, определяемым Госстандартом СССР. Проведенные испытания относятся к категории исследовательских доводочных испытаний, целью которых является проверка правильности основных конструкторских решений и соответствие заданным техническим условиям. Задачей исследований было выяснение эффективности мер, предпринятых по повышению и сохранению работоспособности счетчиков аэроионов в условиях воздействия повышенной влажности и температуры окружающей среды.

Для испытаний использовалась климатическая камера КТЛК-1250 с рабочим объемом $1,5 \text{ м}^3$. Максимальная температура нагрева камеры $+60^\circ\text{C}$. Относительная влажность может длительное время поддерживаться близкой к 100%. Обеспечивается контроль, регулирование и автоматическое поддержание заданных значений температуры и относительной влажности.

Испытуемый счетчик аэроионов помещался в рабочую камеру. Учитывая специфику работы счетчиков аэроионов, климатические испытания проводились под электрической нагрузкой, в основном в режиме измерения паразитного тока утечки изоляторов и в режиме измерения проводимости воздуха.

Режим измерения проводимости воздуха использовался для проверки эффективности защиты изоляторов измерительного конденсатора при обеспечении максимального расхода влажного воздуха через измерительный конденсатор.

В первую очередь была проверена эффективность действия фильтра воздуха, через который во внутренний объем корпуса прибора закачивается осушенный воздух для создания небольшого избыточного давления в кожухе прибора и для обдува изолятора измерительного конденсатора счетчика.

Фильтр заполнен силикагелем с индикатором, помещенным между двумя слоями ткани Петрянова. Во время испытаний в камере поддерживалась относительная влажность $95\pm 2\%$ при температуре 40°C . В этих условиях фильтр обеспечивал осушение воздуха в течение 6 часов. По истечении этого времени требовалась замена или высушивание силикагеля. Степень увлажнения силикагеля определялась по цвету индикатора. При наличии фильтра воздуха увеличение тока утечки не наблюдалось даже в случае достижения 100% относительной влажности и выпадения росы.

Повышенная температура воздуха в значительной степени снижает эффективность осушки воздуха за счет снижения динамической активности силикагеля. По данным /2/, динамическая активность силикагеля при 20°C больше, чем при 40°C в 1,7 раза. Это подтверждается и экспериментом - при 20°C осушение воздуха влажностью 95% полностью обеспечивалось в течение 9 часов.

Испытания счетчика аэроионов в климатокамере при наличии фильтра воздуха показали, что его применение достаточно эффективно.

Дополнительным средством защиты прибора от высокой влажности является подогрев воздуха во внутреннем объеме счетчика аэроионов. Для выяснения эффективности этой меры защиты счетчик был испытан в климатокамере без фильтра, при этом присоединительное отверстие для фильтра было закрыто, и избыточное давление внутри кожуха прибора не создавалось.

Установлено, что прибор вполне работоспособен до 90% относительной влажности воздуха. При 90% влажности счетчик выдерживался в рабочем состоянии 8 часов, при этом не наблюдалось увеличения паразитного тока изоляторов измерительного конденсатора выше допустимых пределов. При повышении влажности от 90% до 95% работоспособность прибора сохранялась в среднем еще в течение часа, после чего наблюдался значительный рост паразитного тока изоляторов. После снижения влажности с 95% до 90% ток утечки в течение получаса снижался до нормальной величины.

Выпадение росы при отсутствии фильтра воздуха сразу же

вызывает быстрый рост токов утечки. Проверка показала, что изоляторы электрометрического усилителя при этом оставались сухими и утечки вызывались в основном увлажнением изолятора измерительного конденсатора.

Выводы

1. Комплекс мер, предпринятых по повышению и сохранению работоспособности счетчиков аэроионов, обеспечивает эффективную защиту счетчика аэроионов в условиях высокой относительной влажности.

2. Эффективная защита при 95% относительной влажности и при температуре 40°C без замены силикагеля обеспечивается в течение 6 часов.

3. Нормальная работа счетчика аэроионов без применения фильтра воздуха обеспечивается до 90% относительной влажности.

Л и т е р а т у р а

1. Матизен Р.Л. Эксплуатационная надежность счетчика аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 37-45.
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. - М.: Химия, 1984. - 592 с.

CLIMATE TESTS WITH AIR-ION COUNTERS

R. Matisen

S u m m a r y

This paper presents the results of climate tests with air-ion counters carried out in a climatic chamber at a high relative humidity and at high temperatures. It has been established that the protective measures taken - maintenance of excessive pressure in the body of the counter, blowing of dry air onto the isolator of the measuring capacitor and heating of the internal volume of the counter - guarantee efficient protection for the air-ion counter and its capacity for work at 95% of the relative humidity of the air and at 40°C of the temperature of the air.

МЕТОД И АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ АППАРАТНОЙ МАТРИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА АЭРОЗОЛЕЙ

М.Г. Ноппель, Х.Ф. Таммет

Введение

Процесс измерения аэрозолей электрическим анализатором описывается уравнением $y_j = \sum_{i=1}^m H_{ji} \varphi_i$ ($j=1, \dots, n$) или сокращенно $y = H\varphi$, где набор чисел $\{y_1, \dots, y_n\}$ представляет каналные сигналы, и $\{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ описывает спектр размеров частиц. Аппаратная матрица H определяется в процессе калибровки или градуировки прибора.

Принципы калибровки спектрометра аэрозолей рассматриваются в работах /1-4/. В работе /4/ предложена схема теоретического градуирования, в которой предполагается однородность зарядки и известность функции $P_q(r)$, определяющей вероятность прохождения аэрозольной частицы радиусом r через зарядник в анализатор с q элементарными зарядами.

В работе /2/ рассматривается способ экспериментальной градуировки спектрометра по квази-монодисперсным тест-аэрозолям при условии эмпирической параметризации аппаратной матрицы. В работе /3/ предложена теоретическая схема градуирования спектрометра по электронно-микроскопическому анализу осадка на собирающих обкладках по каналам. В работе /1/ выдвинута схема комплексного градуирования спектрометра. По этой схеме теоретические знания используют в первую очередь для параметризации аппаратной матрицы H , а при определении значений этих параметров пользуются всеми источниками информации - теоретическими оценками, анализом каналных осадков, измерением эталонных аэрозолей.

В настоящей работе будет рассмотрен конкретный способ реализации идей комплексного градуирования. Предлагается параметрическая модель аппаратной матрицы, параметры которой допускают физическую интерпретацию, и описывается алгоритм определения этих параметров по экспериментальным данным измерения эталонных аэрозолей и анализа каналных осадков.

Параметризация аппаратной матрицы

В работе /2/, где описан способ эмпирической параметризации аппаратной матрицы, выявлены также недостатки этого способа. По причине дискретности заряда сигнал от малых частиц имеет сложный вид, и совпадение простых математических моделей с действительным сигналом неудовлетворительное. Однако, если даже ограничиться простыми математическими моделями, количество параметров будет большое, что затрудняет вычисление наилучшей аппроксимации и ухудшает использование теоретической предварительной информации о гладкости аппаратной матрицы по строкам.

Предлагаемая параметризация исходит из теоретической модели электрического спектрометра аэрозолей. Для теоретического градуирования спектрометра необходимо количественно знать не только геометрию измерительного конденсатора и функцию $P_q(r)$ но и распределения электрического и аэроионного полей в заряднике. Затрудненность непосредственного определения этих полей и является причиной, почему не удалось практически выполнить теоретическую градуировку. Трудно определить также некоторые другие параметры спектрометра, в частности, параметры остаточной турбулентности потока воздуха в измерительном конденсаторе.

В настоящей работе используется теоретическая модель аппаратной матрицы спектрометра с неоднородным зарядником, в которой параметры зарядника рассматриваются как параметры аппаратной матрицы. Реализация такого естественного способа параметризации возможна благодаря наличию алгоритма для быстрого вычисления функции $P_q(r)$ /5, 7/.

Математическая модель зарядника построена на основе модели, предложенной в работе /6/. Для количественного описания неоднородности разложим поток воздуха на узкие слои по поверхностям тока воздуха, используя при этом осевую или плоскую симметрию зарядника. Параметром слоя является отношение расходов

$$x = \phi' / \phi, \quad (I)$$

где ϕ - полный расход аэрозоля, поступающего из зарядника в измерительный конденсатор,

ϕ' - та часть расхода, которая остается между поверхностью рассматриваемого слоя и собирающими обкладками.

Допустим, что аэрозоль, протекающий через узкий слой, заряжается таким же образом, как в однородном заряднике с некоторыми эффективными значениями параметров $\alpha = \lambda t / \varepsilon_0$ и E , где λ - проводимость воздуха в слое зарядника, t - время пребывания аэрозоля в слое, ε_0 - электрическая постоянная, E - напряженность электрического поля в слое.

Неоднородность зарядника описывается зависимостью этих эффективных значений от отношения (I). Ограничимся параболической аппроксимацией:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_0 \left[1 + \alpha_1 \left(x - \frac{1}{2} \right) + \alpha_2 \left(4x(1-x) - \frac{2}{3} \right) \right], \quad (2)$$

$$E_{\text{eff}} = E_0 \left[1 + E_1 \left(x - \frac{1}{2} \right) + E_2 \left(4x(1-x) - \frac{2}{3} \right) \right].$$

Выбор ортогональных координатных функций способствует построению вычислительной схемы. Описанная модель зарядника содержит 6 параметров ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, E_0, E_1, E_2$):

При построении модели аппаратной матрицы может оказаться полезным рассмотрение в качестве предварительно неопределенных или плохо определенных параметров дополнительно некоторых параметров измерительного конденсатора. Одним из таких параметров может оказаться действующая емкость C_0 предварительной части измерительного конденсатора, расчет и измерение которых усложнены расположением зарядника непосредственно на входе измерительного конденсатора.

В простейшей модели осаждающее действие зарядника можно приравнять к действию предварительного конденсатора, охватывающего только поток аэрозоля с расходом Φ . Осаждающий эффект такого конденсатора полностью определяется одним дополнительным параметром - эффективным зарядом Q . Взамен заряда может быть использована приведенная емкость зарядника $C_1 = Q / u_0$, где u_0 - напряжение измерительного конденсатора. В качестве третьего дополнительного параметра рассматривается коэффициент сглаживающего переноса сигнала с одного канала на соседние каналы t_0 , который может частично описать не только техническое пролезание сигнала с одного канала на другой, но и следствия остаточной турбулентности в измерительном конденсаторе.

При необходимости используемый набор параметров может быть изменен в ходе вычислений и при анализе экспериментальных градуировочных данных.

Теоретическая модель параметризации аппаратной матрицы

выгодно отличается от чисто эмпирической тем, что результатом конкретной градуировки является не только аппаратная матрица, но и конкретные оценки параметров зарядника. Это позволяет оценить качество зарядника относительно разрешающей способности спектрометра. В частности, появляется возможность контролировать эффект фокусирования, описанный еще в работе /8/, но оставшийся без целенаправленных применений по причине отсутствия возможностей контроля параметров неоднородностей зарядника.

Аппаратная матрица зависит от используемой модели спектра. Для того, чтобы не определять матрицу для каждой модели спектра заново, желательно определить одну матрицу для настолько детального представления спектра, которое позволяет осуществить достаточно точный переход к любой используемой в практике модели спектра. По такой матрице можно потом вычислить конкретные аппаратные матрицы для любого практического представления спектра.

Метод определения параметров аппаратной матрицы

Исходная информация для вычисления аппаратной матрицы представляется в виде набора спектров φ которые известны до градуирования спектрометра и соответствующего набора канальных сигналов u . Если выдвинуть некоторую гипотетическую оценку аппаратной матрицы H , то можно вычислить ожидаемые по этой оценке "теоретические" или "восстановленные" записи $u' = H\varphi$. Расхождение между u и u' обусловлено четырьмя факторами - несовершенством оценки параметров H , аппаратным шумом в экспериментальных канальных сигналах, ошибкой задания значения φ , несоответствием принятой параметрической модели с реальной аппаратной матрицей.

Наша задача сводится к поиску такой оценки H , которая минимизирует меру расхождения между u' и u для некоторого набора спектров и соответствующих записей.

В описанной схеме могут быть использованы спектры, определенные любым способом без применения градуировки рассматриваемого спектрометра. При использовании спектров, найденных по методу канальных проб, следует учитывать, что такие спектры определяются до произвольного множителя, и мера расхождения между u' и u не должна зависеть от их абсолютного уровня. Для упрощения вычислительной задачи мера расхождения (u' , u) конкретно определяется следующим образом.

Для каждой записи y вычисляются три параметра - средний уровень $c = \sum_j y_j / n$, где n - число каналов, средний номер канала $m = \sum_j j y_j / \sum_j y_j$ и ширина в смысле стандартного отклонения по каналам $s = \sqrt{\sum_j (j-m)^2 y_j / \sum_j y_j}$. Такие же параметры c' , m' и s' вычисляются для соответствующих "восстановленных" записей y' . Мерой расхождения y и y' берется взвешенная сумма $d = b_c(c-c')^2 + b_m(m-m')^2 + b_s(s-s')^2$, где веса b_c , b_m и b_s определяются в зависимости от точности задания параметров соответствующего спектра φ . Например, при определении спектра по каналным пробам берется $b_c = 0$, и соответствующая слагаемая вообще исключается из суммы.

Мерой расхождения для набора спектров является $D = \sum_i d_i$. В условиях фиксированного набора спектров и варьирования значений параметров пробной аппаратной матрицы величина D оказывается функцией этих параметров. Назовем оптимальным на конкретном наборе спектров такую пробную аппаратную матрицу, которая придает мере расхождения D минимальное возможное значение. В случае описанного метода эта матрица и выдается как результат градуирования.

Математически задача сводится к минимизации функции многих переменных D . Для выбора подходящего метода минимизации следует изучить характер зависимости этой функции от всех аргументов. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что D зависит от параметров $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, E_0, E_1, E_2$ гладко и линейаризация численным дифференцированием с последующим использованием алгоритма наименьших квадратов Гаусса последовательно для наборов параметров $(\alpha_0, \alpha_1, E_0, E_1, t_0)$ и (α_2, E_2) приводит к сходящемуся вычислительному процессу. Зависимость от параметров C_0 и C_1 нерегулярна, и отмеченная вычислительная схема не пригодна. Поэтому для первых семи параметров можно рекомендовать процесс Ньютона-Гаусса, а для остальных - дискретный покоординатный поиск.

Ниже представлен конкретный алгоритм, которым реализован один из возможных методов минимизации.

Алгоритм вычисления параметров аппаратной матрицы

Введем для описания алгоритма следующие обозначения:

- а) заглавные греческие буквы, например Π , обозначают множества; буквы с двумя точками, как \dot{A} , обозначают двухмерный массив (матрицу); буквы со стрелкой, например \vec{B} , - одно-

мерный массив;

б) \circ = знак присваивания, Γ - знак транспонирования;

в) $\Pi = \{\alpha_0, E_0, \alpha_1, E_1, \alpha_2, E_2, C_1, C_0\}$,

$$\Pi_1 = \{\alpha_0, E_0, \alpha_1, E_1, t_0\}, \quad \Pi_2 = \{\alpha_2, E_2\}.$$

Присваивание типа $\Omega := \Lambda$, где Ω, Λ - разные множества, означает, что новые значения присваиваются тем и только тем элементам из Ω , которые встречаются также в Λ . Например, $\Pi := \alpha_0$ присваивает новое значение только одному элементу из Π , а $\Pi := \Pi_1$ всем элементам, которые входят в Π_1 . Остальные элементы Π остаются при этом неизменными.

г) $\tilde{A} + \tilde{V}$ - матрица, получаемая расширением матрицы \tilde{A} с добавлением ей столбца \tilde{V} . Если первоначально \tilde{A} пусто, то $\tilde{A} + \tilde{V}$ состоит из одного столбца \tilde{V} .

1. Ввод значений рабочих напряжений, расходов воздуха и аэрозоля, действующих емкостей спектрометра, экспериментальных данных для определения параметров аппаратной матрицы.

2. Ввод числа N_5 , которое указывает, на сколько слоев распределяется поток аэрозоля в заряднике.

3. Ввод ограничений на параметры $\pi \in \Pi$ в виде минимальных π^{\min} и максимальных π^{\max} физически возможных значений. Ввод приращений $\Delta\pi$ для всех $\pi \in \Pi$, указывающих на требуемую точность вычисления параметров и используемых при численном дифференцировании.

4. D : = машинная бесконечность.

5. Π : = Π_1 .

6. Вычисление \ddot{H} при текущем состоянии Π по алгоритму, изложенному в конце статьи.

7. Вычисление при всех спектрах и канальных пробах $\vec{\varphi}$ величин $\vec{y}' = \ddot{H}\vec{\varphi}$; c', m', s' (для канальных проб вычисляется только m', s') и составление вектора:

$$\vec{V}' = \left\{ \sqrt{b_c} (c' - c); \sqrt{b_m} (m' - m); \sqrt{b_s} (s' - s), \dots \right\}$$

(размерность $\vec{V}' = 3 \times$ число спектров тест-аэрозоль + 2 \times число наборов канальных проб).

8. \vec{B} : = \vec{V}' .

9. Для всех элементов $x_i \in \Pi_1$, кроме элементов с $\Delta x_i = 0$, вычисляется

- Π : = Π_1 ,

- если $x_i + \Delta x_i > x_i^{\max}$ или $x_i + \Delta x_i < x_i^{\min}$, то $\Delta x_i := -\Delta x_i$,

- Π : = $x_i + \Delta x_i$,

- выполняются п. 6 и 7
- вычисляется матрица $\bar{A} + [(\bar{V} - \bar{B})/\Delta\pi_1]$.
- 10. $\bar{G} := (\bar{A}^T \bar{A})^{-1} (-\bar{A}^T \bar{B})$.

II. Для всех элементов $\pi_1 \in \Pi_1$, кроме элементов с $\Delta\pi_1 = 0$, вычисляется:

- $\pi_1 := \pi_1 + g/p$, где g - очередной элемент из \bar{G} , а величина p имеет следующие значения: 4 для $\alpha_1, E_1, \alpha_2, E_2$; 2 для α_0, E_0, t_0 .

Использование p увеличивает область сходимости алгоритма по параметрам Π_1 и Π_2

- если $\pi_1 > \pi_1^{max}$, то $\pi_1 := \pi_1^{max}$,
- если $\pi_1 < \pi_1^{min}$, то $\pi_1 := \pi_1^{min}$,
- $\Pi_1 := \pi_1$; если $g < \Delta\pi_1$, то $\Delta\pi_1 := 0$

- если не для всех $\pi_1 \in \Pi_1, \Delta\pi_1 = 0$, то повторение вычислений начинается с п. 5.

12. Выполняются п. 5...II, где вместо Π_1 используется Π_2

13. Выполняются п. 6 и 7, и вычисляется $\bar{V}^T \bar{V}$.

14. Если $D > \bar{V}^T \bar{V}$, то $D := \bar{V}^T \bar{V}$, и выполняются п. 5...14.

15. Дискретный поиск значения C_0 , минимизирующий $\bar{V}^T \bar{V}$ ($\equiv D$ мера расхождения). В ходе поиска для каждого выбранного значения C_0 выполняются п. 6, 7 и вычисляется $\bar{V}^T \bar{V}$.

16. Дискретный поиск значения C_1 , минимизирующего $\bar{V}^T \bar{V}$. В ходе поиска $C_1 + C_0$ сохраняют постоянным, а для каждого выбранного значения C_1 выполняются п. 6, 7 и вычисляется $\bar{V}^T \bar{V}$.

17. Выполнение п. 5...16.

18. $N_s := N_s + 1$. Выполнение п. 5...18, пока изменения в значениях параметров, вызванные увеличением N_s , не станут меньше $\Delta\pi$ для всех $\pi \in \Pi$.

Алгоритм вычисления матрицы \bar{H} при заданных параметрах

I. Расширение матрицы \bar{H} на шесть дополнительных строк с целью предотвращения краевого эффекта при сглаживании. Вычисление коэффициентов предельных подвижностей каналов.

2. Для каждого аэрозольного слоя j ($j = 1, \dots, N_s$) вычисляется:

- а) предельная подвижность зарядника, минимальная и максимальная подвижности, в пределах которых спектрометр осаждаёт аэрозоль из данного слоя;
- б) вычисление α_{eff} и E_{eff} по формуле (2);

с) для всех размеров частиц вычисляются:

- по формуле Стокса-Милликена подвижность k_{r_i} частицы с текущим значением радиуса r_i и с одним элементарным зарядом e ;
- среднее зарядное число \bar{q} , стандартное отклонение σ , коэффициенты асимметрии и эксцесса для частиц с r_i по быстрому алгоритму вычисления $P_q(r) / 5, 7/$;
- для каждого q ($\bar{q} - 6\sigma \leq q \leq \bar{q} + 6\sigma$) на основе коэффициентов предельных подвижностей каналов и подвижности частицы $q \cdot k_{r_i}$ выбирается канал, куда осаждаются частицы радиусом r_i и числом элементарных зарядов q .

К соответствующему матричному элементу добавляется величина $P_q(r_i) e q \Phi / N_s$.

3. Сглаживание канальных сигналов, т.е. столбцов матрицы \tilde{N} соответственно значению t_c .

4. Отброс последних шести строк матрицы \tilde{N} .

Примечание: Для экономии времени вычисление п. 2с можно выполнить только для некоторого набора размеров и пробелы в матрице \tilde{N} заполнить путем интерполяции.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф., Ноппель М.Г. Принципы градуирования электрического гранулометра аэрозолей. - В кн.: Методы и приборы ... биосферы: Межвуз. сб. Л.: ЛИАП, 1984, вып. I7I, с. 2I-28.
2. Кикас Ю.Э., Мирме А.А., Пейль И.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Экспериментальная градуировка электрического спектрометра аэрозолей методом эталонных аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 54-7I.
3. Таммет Х.Ф. Калибровка электрического гранулометра аэролей по распределению осажденных частиц. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1983, вып. 548, с. 52-58.
4. Таммет Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1975, вып. 348, с. 30-34.
5. Ноппель М.Г. О распределении зарядов на аэрозольных частицах при униполярной зарядке их легкими аэроионами. Уч. зап. Тарт. ун-та, 1983, вып. 648, с. 32-40.

6. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 55-79.
7. Noppel M.G. Algorithm for rapid approximate calculation of the charge distribution of conductive aerosol particles charged in a strong electric field. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 84-93.
8. Yosikawa H.H. et al. Electrostatic particle size analyzer. - Rev. Sci. Instr., 1956, vol. 27, No. 6, p.359-362.

METHOD AND ALGORITHM FOR THE CALCULATION OF
THE APPARATUS MATRIX FOR THE ELECTRICAL
AEROSOL SPECTROMETER

M. Noppel and H. Tammet

S u m m a r y

Using one's theoretical knowledge of aerosol charging and of the measurement of mobility, a theoretical model for the apparatus matrix of the aerosol spectrometer has been proposed. The parameters of the model can be physically interpreted. The method of calculating the parameters of the model according to the experimental data has been described. The experimental data to be used include the test-aerosol measurements and the electron microscope analysis of the particles collected on the channel electrodes of the spectrometer. The algorithm based on the method has been presented.

О КАЛИБРОВКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА АЭРОЗОЛЕЙ

А.А. Мирме

Введение

Согласно книге /1/ будем рассматривать линейный конечно-мерный спектр. Он описывается аппаратным уравнением

$$Y = H \cdot \Phi, \quad (1)$$

где H - аппаратная матрица, Φ - спектр, Y - аппаратная запись - случайный вектор с ковариационной матрицей D . Обычно считают, что характеристики спектрометра заранее известны, т.е. аппаратная матрица H полностью определена. Задачей спектрометрии тогда является решение уравнения (1), т.е. по конкретным показаниям спектрометра Y и D определить измеряемый спектр Φ . Это называется проявлением спектра и данному вопросу посвящено большое количество работ /1/. в основном они базируются на классическом решении

$$\Phi = (H^T D^{-1} H)^{-1} H^T D^{-1} Y, \quad (2)$$

дополняя его специальными стабилизаторами, что, как это показано в упомянутой книге, означает введение разного рода априорной информации и является вполне законным и даже нужным способом улучшения решения. Однако выбор стабилизатора остается довольно трудным и плохо обосновываемым делом. Вообще необходимость использования наряду с аппаратной матрицей дополнительной информации (и наличие ее) говорит о том, что в ходе вычисления самой аппаратной матрицы такая информация не была учтена. Поэтому поиск методов определения аппаратной матрицы спектрометра, позволяющих учитывать разнородную информацию также полно, как и аппарат решения уравнения (2), является более эффективным средством повышения качества спектрометрии, чем поиск "стабилизаторов".

Определение аппаратной матрицы спектрометра

Обычно строится математическая модель спектрометра, и элементы аппаратной матрицы находят на основе этой модели. Но модель не может быть абсолютно точной, и значит спектрометр не сможет реализовать своих потенциальных возможностей из-за неточности аппаратной матрицы.

В частности, настоящая работа посвящена определению аппаратной матрицы электрического спектрометра аэрозолей /2/, математическая модель которого исключительно сложна. Имеющиеся способы определения аппаратной матрицы /3/ требуют большого количества фундаментальной информации и плохо используют измерительную информацию. Способ эталонных аэрозолей /4/ использует измерительную информацию лучше, но предъявляет жесткие требования к параметрам аэрозолей. Наилучшим кажется способ, основанный на математической модели с параметрами, подбираемыми по экспериментальным данным /5/. Этот способ дает ценную информацию о физических процессах, происходящих в спектрометре, но является весьма трудоемким, и вопрос о достаточной точности модели остается все равно открытым.

С точки зрения теории информации калибровка спектрометра аналогична процессу обучения человека. Это значит, что калибровка должна быть выполнима в тех пределах, в которых имеется в наличии информации. В терминах линейной спектрометрии это означает, что если имеется некоторый набор известных спектров и их аппаратные записи, то после соответствующей калибровки должна быть измерима любая линейная комбинация спектров этого набора.

Прямой метод определения аппаратной матрицы

Нам понадобится некоторый набор аэрозолей, которые будем называть калибровочными. Предъявим им единственное обязательное условие - их спектры должны быть известны, обозначим их индексом k ($k = 1, 2, \dots, K$). Напомним, что в конечномерной спектрометрии любой физический спектр заменяется на вектор, составленный из коэффициентов разложения его на набор т.н. базисных спектров ψ :

$$\varphi(\tau) = \sum_{j=1}^J \varphi_j \cdot \psi(\tau), \quad (3)$$

где τ - аргумент спектра, в данном случае радиус частиц аэрозоля и j обозначает порядковый номер элемента спектра ($j = 1, 2, \dots, J$). Введем еще один индекс i для обозначения порядкового номера элемента аппаратной записи ($i = 1, 2, \dots, I$). В данном случае это совпадает с номером канала спектрометра. Договоримся обозначать векторы и матрицы прописными буквами Y, H, Φ, D , а их элементы - строчными. Если в данном векторе какой-нибудь индекс зафиксирован, то припишем его сверху. В этих обозначениях уравнение

$$\left\{ y_i = \sum_{j=1}^J h_{ij} \cdot \varphi_j \right\}, \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (4)$$

является аналогичным уравнению (1), а Y^k и Φ^k обозначают векторы соответственно аппаратной записи и спектра k -того калибровочного аэрозоля. Предположим, что одновременно с аппаратной записью Y известна и ее диагональная ковариационная матрица D с элементами d_i . Обычно условие диагональности хорошо выполняется. Тогда для калибровки имеется K аппаратных уравнений по I уравнений каждое

$$\left\{ y_i^k = \sum_{j=1}^J h_{ij} \cdot \varphi_j^k \right\}, \quad (i = 1, 2, \dots, I), \quad (5)$$

$$(k = 1, 2, \dots, K).$$

Перегруппируем их, объединяя вместе уравнения с одинаковыми индексами i , и поменяем h и φ местами:

$$\left\{ y_k^i = \sum_{j=1}^J \varphi_{kj} \cdot h_j^i \right\}, \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, I).$$

В векторном виде это выглядит так

$$Y^i = \Phi H^i, \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad (7)$$

Систему (5) можно представить в виде одного матричного уравнения

$$Y = H \cdot \Phi, \quad (8)$$

где k -тые столбцы матриц Y и Φ суть векторы Y^k и Φ^k . Такая постановка задачи встречается в работе /6/, но в отличие от указанной работы, здесь нет никаких ограничений ни на коли-

чество спектров, ни на их форму и расположение. После транспонирования

$$y^T = \Phi^T H^T \quad (9)$$

она распадается на уравнения (7). Поскольку связи между каналами нет (матрицы D - диагональные), то никакой потери информации не происходит. Уравнение (7) является полным аналогом аппаратного уравнения (1). Следовательно, оно решается точно также, как и аппаратное уравнение:

$$H^i = (\Phi^T (D^i)^{-1} \Phi)^{-1} \Phi^T (D^i)^{-1} y^i \quad (i = 1, 2, \dots, I). \quad (10)$$

В силу этой аналогии кажется, что если решение аппаратного уравнения имеется в виде уравнения (2), то аппаратную матрицу нужно находить именно из уравнения (10). Особо привлекает то, что здесь непосредственно применима вся техника решения аппаратного уравнения, притом с гораздо меньшими возражениями. Кроме того, сама матрица преобразования Φ является "управляемой". Ее свойства можно улучшить путем выбора "лучших" калибровочных аэрозолей.

Использование информации

Данный метод непосредственно использует информацию, представленную в виде аппаратных записей и спектров. Именно в таком виде поступает информация при измерении калибровочных аэрозолей. Общее количество измерений определяет количество уравнений K , величина которого ограничивается только возможностями ЭВМ. Таким образом, экспериментальную информацию метод использует достаточно полно. Даже возможна реализация идеи постепенного уточнения калибровки по мере поступления новой информации, например, путем использования какого-нибудь способа последовательной обработки /I/.

Также легко можно использовать теоретическую информацию, если она представлена в виде смоделированной аппаратной записи. Примечательно, что одновременно нужно оценить и точность теоретической модели путем задания ковариационной матрицы D .

Особенность метода

При решении уравнений (7) учитываются только аппаратные записи в данном канале и совсем не учитываются записи других каналов. Тем самым как-будто не учитывается определенная связь между сигналами в разных каналах, и в результате происходит потеря существенной информации. Отметим, что сам метод о такой связи знать не может, поскольку порядок нумерации каналов не обязан совпадать с порядком их физического расположения. Кроме того, такая связь не может быть сильной и потеря информации большой, в противном случае разумнее сократить количество каналов.

Поскольку знание о связи имеет теоретическую природу, то лучше всего оно вводится указанным выше способом учета теоретической информации. Соответствующей "фильтрацией" аппаратных записей можно очень легко "сгладить" действительную физическую особенность спектрометра.

Напомним, что конечной целью спектрометрии является не определение аппаратной матрицы, а измерение спектров. В этом смысле спектрометрию можно представить в виде процесса, состоящего из двух взаимно связанных этапов - этапа определения аппаратной матрицы и этапа проявления спектров. Взаимность проявляется в необходимости проведения новой калибровки, когда только обнаруживается расхождение между проявленными спектрами и нашими знаниями о них, т.е. когда мы имеем новую информацию.

Особенностью данного метода по сравнению с традиционными, является существенно большая роль второго этапа. На первом этапе информация обрабатывается только наполовину, и полученная аппаратная матрица является полуфабрикатом. Ее элементы явно учитывают только информацию в своих каналах, связь между элементами разных каналов еще не проявлена. Полная обработка информации завершается на втором этапе, где происходит учет связи между элементами разных каналов не только аппаратной записи, но и аппаратной матрицы. Если между каналами зависимость существует, то она проявляется именно здесь.

Таким образом, возможная негладкость аппаратной матрицы не мешает ей правильно проявлять спектры, нужно только наряду с ошибками аппаратной записи учитывать и ковариационные матрицы аппаратной матрицы. То же самое переносится и на нахождение самой аппаратной матрицы.

Можно ожидать, что неточность аппаратной матрицы в целом немного ухудшает точность вычисления конкретного спектра, так как в аппаратной матрице учтено гораздо больше информации, чем ее содержится в конкретной аппаратной записи. Поэтому теоретическое "сглаживание" аппаратной матрицы в лучшем случае исключает необходимость учета ее точности, незначительно влияя на общую точность измерения. В этом смысле теория в первую очередь подсказывает рациональные параметры физического прибора и возможные базисные спектры.

Практическое применение метода

Данный метод был использован для калибровки электрического спектрометра аэрозолей. В качестве базиса применялись спектры, предложенные в работе /7/. Использовалась только экспериментальная информация, полученная из измерений калибровочных аэрозолей. Аэрозоли были получены методом электрического сепарирования. Предполагалось, что они подчиняются логарифмически нормальному распределению с параметрами, определяемыми режимом сепарирования /8/.

Общий вид полученной аппаратной матрицы вполне согласуется с вышеприведенными соображениями. Явно ошибочные элементы находятся в местах, где было мало информации (слабые, по сравнению с шумами, сигналы). Это подтверждается и полученными оценками точности элементов.

Сравнение калибровочных спектров с результатами контрольного проявления этих же спектров (рис. I) показало, что метод действительно находит наилучшее соответствие между аппаратными записями и спектрами. Даже приравнивание к нулю тех элементов матрицы, которые по общим соображениям должны быть малы, несущественно ухудшило результаты по сравнению с результатами контрольного проявления. Неизвестные спектры проявляются аналогично.

Для дальнейшего уточнения процесса измерения следует повысить точность измерения параметров калибровочных аэрозолей, увеличить в некоторых диапазонах их концентрации и обязательно ввести учет точности как калибровочных спектров, так и элементов аппаратной матрицы.

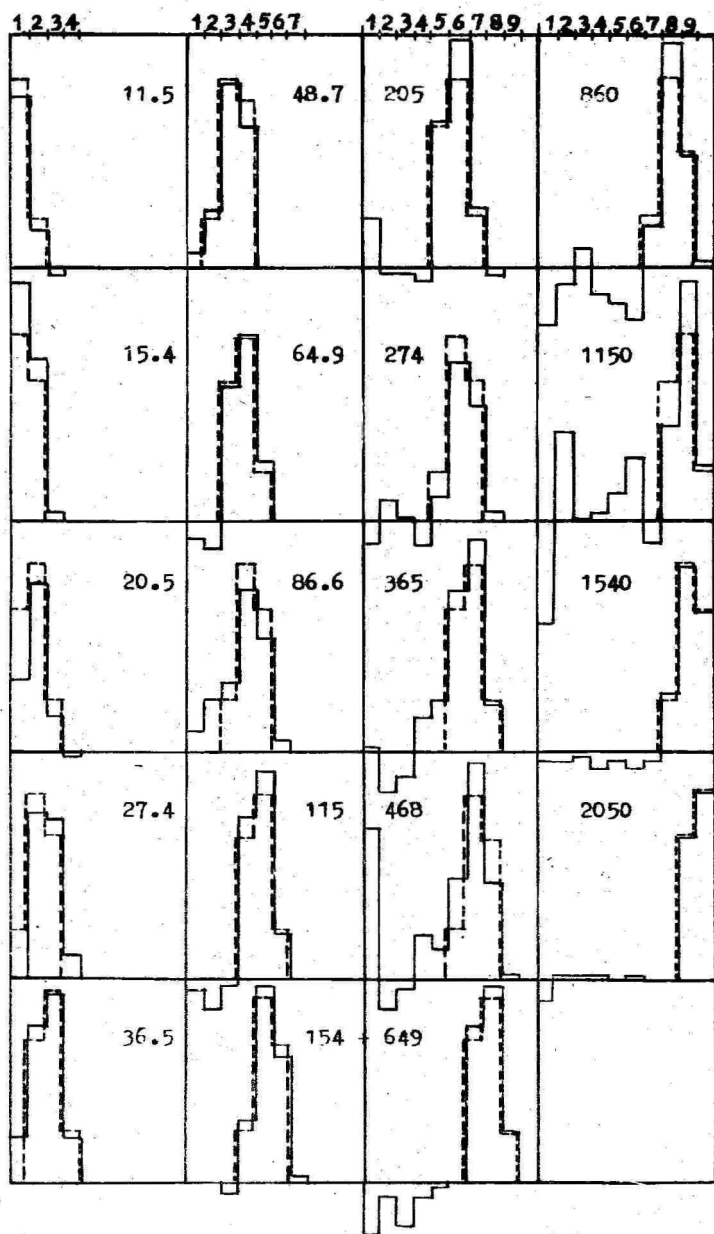


Рис. 1. Результаты контрольного проявления. — — проявленные спектры, - - - спектры калибровочных аэрозолей. Указаны средние диаметры частиц в нанометрах и номера фракций.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную спектрометрию. - Таллин: Валгус, 1975.
2. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 84-92.
3. Таммет Х.Ф., Ноппель М.Г. Принципы градуирования электрического гранулометра аэрозолей. - В кн.: Методы и приборы контроля параметров биосферы. Л.: ЛИАП, 1984, с. 21-28.
4. Кикас Ю.Э. и др. Экспериментальная градуировка электрического спектрометра аэрозолей методом эталонных аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 54-71.
5. Ноппель М.Г., Таммет Х.Ф. Метод и алгоритм вычисления аппаратной матрицы электрического спектрометра аэрозолей. См. наст. сб., с. 62-70.
6. Тамм Э.И. О функциональной зарядке аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1975, вып. 348, с. 35-55.
7. Таммет Х.Ф. Кусочно-линейная модель спектра в аэроионных и аэрозольных измерениях. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 45-54.
8. Кикас Ю.Э. О качестве калибровочных аэрозолей, полученных электрическим сепарированием. См. наст. сб., с. 106-112.

ABOUT THE CALIBRATION OF THE ELECTRICAL
AEROSOL SPECTROMETER

A. Mirme

S u m m a r y

The paper deals with the method of the calibration of the electrical aerosol spectrometer by which the elements of the apparatus matrix are determined by solving the equations which are similar to the spectrometer's apparatus matrix. The method uses especially effectively the information given in the form of experimental data of calibration aerosol measurements.

The results of the testing of the calculated apparatus matrix are in full agreement with the accuracy of the information used for calibration.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ. СРАВНЕНИЕ АНАЛИЗАТОРА TSI СО СПЕКТРОМЕТРОМ ТГУ

А.А. Мирме, А.Э. Рейнарт, Ю.Э. Кикас, Э.И. Тамм,
М.А. Дубровин, Т.П. Вернотас, И.А. Пейль

Введение

В Аэроэлектрической лаборатории ТГУ при участии сотрудников Института экспериментальной метеорологии были проведены сравнительные испытания двух аэрозольных приборов: электрического анализатора аэрозолей модель 3030 фирмы TSI (ЭАА) /1/ и электрического спектрометра аэрозолей, разработанного в ТГУ (ЭСА) /2/.

Измерения проводились путем одновременного отбора калибровочного аэрозоля обоими спектрометрами. Полученные оценки параметров спектров сравнивались с параметрами аэрозоля, определенными при помощи электрического сепаратора и аэрозольного электрометра /3/.

Постановка эксперимента

Использовались монодисперсные калибровочные аэрозоли, генерируемые электрическим сепарированием аэрозоля из конденсационных генераторов. Диапазон размеров по диаметру от $d \approx 10$ нм до $d \approx 2$ мкм перекрывается тремя конденсационными генераторами.

Электрический сепаратор позволяет определить средний размер частиц с ошибкой не более 5%. Относительная полуширина спектров на уровне 50% от максимума имела порядок 10%. Концентрация определялась по переносимому аэрозолем электрическому току. Потери в трактах не учитывались. С выхода сепаратора аэрозоль поступал в аэрозольную камеру объемом 50 л, где смешивался с чистым воздухом. Камера имела два выхода, к которым были подключены соответствующие входы ЭАА и ЭСА. Расположение выходов камеры гарантировало равенство концентраций частиц на входах обоих приборов. Общий расход аэрозоля и чистого воздуха устанавливался несколько больше

суммы расходов ЭАА и ЭСА ($67 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ и $800 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно). Измерения были проведены в установившемся режиме, достижение которого проверялось по стабильности показаний спектрометров (ЭАА с нестационарным аэрозолем работать не может), и строго одновременно обоими приборами.

Спектры представлялись в виде таблиц фракционных концентраций. Разбивка на фракции соответствовала схеме, принятой фирмой ТЭИ. Границы фракций определяются по формуле

$$d_i = (\sqrt[4]{10})^i \cdot 10, \quad (1)$$

где диаметр d_i измеряется в нанометрах. Диапазон размеров меньше 10 нм не рассматривался ввиду малой чувствительности приборов.

Измерение и обработка сигналов ЭАА

Режимы ЭАА устанавливались в соответствии с указаниями фирмы-изготовителя. ЭАА управлялся встроенным программным механизмом, который переключал измеряемые аппаратные фракции (каналы) и выдавал необходимые сигналы на выходной разъем. Измерение и обработка сигналов осуществлялись в режиме непосредственной связи ЭАА с микро-ЭВМ "Искра-226" и ее средствами. Информация регистрировалась встроенным в ЭВМ аналого-цифровым преобразователем по сигналам "READ" с ЭАА. В течение одного сигнала "READ" ЭВМ проводила порядка десяти повторных измерений, вычисляла среднее значение сигнала и ее дисперсию. Номер канала i определялся путем синхронизации работы микро-ЭВМ с началом общего цикла измерения ЭАА. В конце цикла ЭВМ вычисляла разности канальных сигналов, их дисперсии и определяла спектр аэрозоля в виде фракционных концентраций N_i по формуле

$$N_i = a_i (y_i - y_{i-1}). \quad (2)$$

Коэффициенты a_i взяты из инструкции фирмы-изготовителя. Пример оформления результатов измерения приведен в табл. I, где распечатаны границы фракций (в нанометрах), канальные сигналы, среднеквадратичные отклонения сигналов, разности сигналов, их среднеквадратичные отклонения и фракционные концентрации (см^{-3}). Для наглядности в правой части распечатки приведена гистограмма спектра.

Такая обработка соответствует стандартной методике проведения измерений с помощью ЭАА /4/.

Таблица I

Пример распечатки результатов измерения ЭАА (ТС1)

D	TIME 1985		DIFFERENTIAL		
	I	S	DI	S	N
10	0.100	0.006			
18	0.111	0.006	-0.011	0.008	-4.58E+03 :
32	0.115	0.005	-0.004	0.007	-6.68E+02 :
56	0.114	0.008	0.001	0.009	8.70E+01 :*
100	0.057	0.006	0.057	0.010	2.53E+03 :*****
178	0.021	0.007	0.036	0.009	8.67E+02 :*****
316	0.010	0.003	0.011	0.007	1.35E+02 :*
562	0.010	0.005	0.000	0.006	0.00E+00 :
1000	0.009	0.005	0.001	0.007	3.51E+00 :

Измерение и обработка сигналов ЭСА

ЭСА работал на линии с микро-ЭВМ ДЗ-28. Каждое измерение включало сбор информации в виде канальных сигналов, их предварительную обработку и вычисление спектра по методу наименьших квадратов с использованием аппаратной матрицы спектрометра. Физический спектр представлялся в виде линейной комбинации элементарных спектров треугольной формы в выбранном масштабе, вершины элементарных спектров совмещены с узлами (границами фракций) спектра /5/. Найденный спектр в виде набора коэффициентов являлся математическим эквивалентом физического спектра. Каждый коэффициент - значение спектра в соответствующем узле. Наконец определялись фракционные концентрации и оценки их ошибок. Был использован математический аппарат линейной конечномерной спектроскопии /6/.

Основным упрощением в обработке наблюдений являлся не-

учет ошибок элементов аппаратной матрицы, что приводит к снижению оценки ошибок измерения в области малых размеров. В распечатке результатов (табл. 2) даны диаметры соответствующих узлов спектра, значения спектра в узлах, оценки ошибок в виде среднеквадратичного отклонения, оценки, фракционных концентраций (см^{-3}), их среднеквадратичные ошибки и гистограмма спектра.

Таблица 2

Пример распечатки результатов измерения ЭСА (ТГУ)

ЕСА ТГУ 1985					
	11	13	T= 18* 33		
Д	Ф	ДФ	Н	ДН	
10	-121.4	91.4	-263.1	87.6	;
18	-525.9	108.4	-156.4	50.3	;
32	118.9	60.8	-159.6	41.4	;
56	-299.5	30.0	337.4	34.7	*****
100	557.9	12.5	695.6	19.1	*****
178	97.8	6.2	100.7	13.1	***
316	-17.3	2.1	-38.2	5.7	;
562	-3.0	.7	4.5	3.3	;
1000	3.6	.2	12.0	1.3	;
1778	.1	.0	.4	.2	;
3162	-.0	.0			

Основные результаты

Результаты измерения показывают сниженную реальную чувствительность ЭАА по сравнению с ЭСА, которая объясняется пониженным расходом аэрозоля и меньшим объемом статистики. Выявляется, что параллельный принцип измерения, используемый в ЭСА, имеет преимущества перед последовательным принципом, используемым в ЭАА, и в случае измерения стабильного во времени аэрозоля. По таблицам фракционных концентраций оценивались 3 параметра спектра (табл. 3): средний размер частиц \bar{d} , суммарная концентрация аэрозоля N и относительная полуширина спектра на уровне 50% Δ . При этом не учитывались фрак-

ции, находящиеся далеко от главного максимума.

Таблица 3

Оценки параметров спектров аэрозолей

Сепаратор и электрометр				ЭСА (ТТУ)			ЭАА (ТЭІ)		
№	В-во	\bar{d} нм	N MM^{-3}	\bar{d} нм	N MM^{-3}	Δ %	\bar{d} нм	N MM^{-3}	Δ %
1	AgI	11	1,2	11	0,42	30	13	5,8	25
2	AgI	*		11	100	35	13	190	25
3	AgI	15	0,9	15	0,8	35			
4	AgI	21	9,4	-	-	-	24	4,7	25
5	AgI	*		27	75	50	19	124	40
6	AgI	*		28	190	35	22	550	45
7	AgI	27	4,7	28	10	45	20	36	45
8	AgI	37	3,7	36	2,5	30	40	1,8	45
9	NaCl	37	3,0	37	2,6	30	42	1,2	25
10	AgI	*		43	140	35	24	290	40
11	AgI	65	2,1	65	1,6	30	70	1,7	35
12	AgI	*		74	72	60	170	83	85
13	NaCl	*		105	45	70	80	220	80
14	AgI	115	1,7	120	1,1	40	80	3,5	40
15	NaCl	115	6,7	150	3,0	40	110	3,8	40
16	NaCl	154	5,0	130	4,5	35	110	12	45
17	NaCl	154	4,3	190	4,7	35	125	17	40
18	NaCl	210	1,4	210	3,5	45	130	11	50
19	NaCl	270	0,6	270	0,7	40	180	0,9	50
20	DOP	270	3,3	300	2,1	45	200	5,7	60
21	DOP	*		320	10	45	220	23	100
22	NaCl	360	0,8	230	1,4	55	180	3,1	80
23	DOP	360	1,7	360	2,1	50	230	4,2	95
24	DOP	*		420	15	80	240	26	70
25	DOP	480	0,9	480	0,5	80	270	1,1	55
26	DOP	650	0,7	650	0,5	45	270	0,7	65

* - аэрозоль из генератора, несепарированный,
 Δ - определена по гистограммам как полуширина на уровне 50% от максимальной высоты.

Сравнение оценок с параметрами калибровочных аэрозолей подтверждает хорошую точность оценки среднего размера (рис. 1). Оценки ЭСА практически совпадают с данными сепаратора. Отдельные отклонения оценок скоррелированы с отклонениями соответствующих оценок ЭАА, что указывает на некачественность калибровочного аэрозоля, а именно влияние качества исходного аэрозоля на результат сепарирования [3]. Оценки ЭАА хорошо согласуются с остальными оценками примерно до размера $\bar{d} = 100$ нм. В области более крупных размеров ЭАА дало занижение на 30+40% оценки, а размеры $\bar{d} > 450$ нм по показаниям ЭАА неразличимы. Испытуемый экземпляр ЭАА прошел до этого

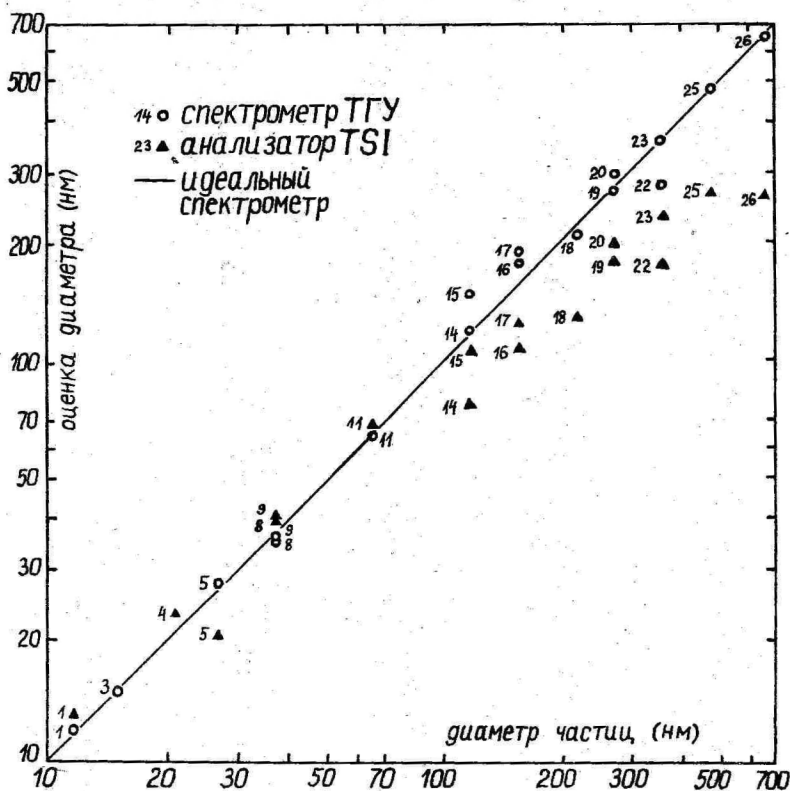


Рис. 1. Оценки среднего размера частиц калибровочного аэрозоля по показаниям разных спектрометров.

многолетнюю эксплуатацию без промежуточных калибровок и подрегулировок. Очевидно, его калибровка в области крупных частиц сдвинута, хотя это не обнаруживалось встроенными средствами контроля. Это может быть связано с исключительно высокой чувствительностью калибровки спектрометра на базе только диффузионной зарядки к режиму зарядника.

Наибольшие расхождения наблюдаются в оценках концентрации. Коррелированность соответствующих оценок ЭАА и ЭСА показывает, что точность измерения концентрации с помощью аэрозольного электрометра в системе генерирования калибровочного аэрозоля невысока.

Завышенные оценки ЭАА по сравнению с ЭСА в области размеров выше 100 нм количественно объясняются ошибками в определении среднего размера. Расхождение оценок концентрации в области малых размеров (ниже 20 нм) может быть вызвано и неточной калибровкой ЭСА в этой области. Оценки ширины спектра имеют наименьшую статистическую надежность. Видно, что они существенно превышают ширину спектра калибровочного аэрозоля, которая даже в наихудшем случае не превышает 17% /7, 8/. Основные причины расширения оценок спектров различны для ЭАА и ЭСА. У ЭАА, имеющего физически лучшую разрешающую способность, это вызвано упрощениями в математической обработке наблюдений, не учитывающей переноса сигнала из одного канала в другой. При ЭСА расширение связано с особенностями перехода от использованной модели спектра к фракционным концентрациям /5/, что даже в случае идеально монодисперсного аэрозоля и идеальной обработки дает ширину спектров в фракционных концентрациях в пределах от 30 до 50%. Это означает сглаживающую фильтрацию спектра, не вызывающую ошибок ни в оценке концентрации, ни в оценке среднего размера.

Авторы выражают благодарность В.В. Смирнову и другим специалистам ИЭМ, благодаря которым настоящая работа оказалась возможной.

Л и т е р а т у р а

1. Sem G.J. Electrical aerosol analyzer: operation, maintenance, and application. - In: Aerosol Measurement, Gainesville, 1979, p. 400-432.

2. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 84-92.
3. Кикас Ю.Э. и др. Об электростатической сепарации аэрозольных частиц. - В кн.: Методы и приборы контроля параметров биосферы: Межвуз. сб. Лен.ин-т авиац. приборостр., 1984, вып. 171, с. 36-42.
4. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H., Karadia A. Electrical aerosol analyser: history, principle, and data reduction. - In: Aerosol Measurement, Gainesville, 1979, p. 311-383.
5. Таммет Х.Ф. Кусочно-линейная модель спектра в аэроионных и аэрозольных измерениях. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 45-53.
6. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию опектросметрии. Таллин, 1975. - 100 с.
7. Кикас Ю.Э. О качестве калибровочных аэрозолей, полученных электрическим сепарированием. - См. наст. сб., с. 106-112.
8. Тамм Э.И., Лангус Л.Э., Мирме А.А. Проверка работы электрического сепаратора аэрозолей в области грубодисперсных частиц. - См. наст. сб., с. 98-105.

MEASUREMENT OF CALIBRATION AEROSOL SPECTRA.
COMPARISON OF THE TSI AEROSOL ANALYZER
WITH THE TSU SPECTROMETER

A. Mirme, A. Reinart, Ü. Kikas, E. Tamm,
M. Dubrovin, T. Bernotas and I. Peil

S u m m a r y

The paper describes the experiment which consisted in comparing two devices: the electrical aerosol analyzer (EAA) manufactured by the American firm TSI and the electrical aerosol spectrometer (EAS) developed at Tartu State University. A large number of monodisperse aerosols of several particle sizes have been measured and three parameters of spectra - the medium particle diameter \bar{d} , the total concentration N and the relative width Δ - have been determined by both analyzers. The comparison of the results (Table 3 and Fig. 1) showed that both analyzers determine the diameter of small particles exactly. For particles with $\bar{d} > 100$ nm the TSI analyzer gave smaller values than the factual diameters (determined by the electrostatic classifier). The coincidence of the measured concentrations was not so good. The overestimation of the relative width of the spectra observed by both analyzers was due to the nature of the mathematical procedures.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ УЗКОГО БИПОЛЯРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА НА ЧАСТИЦАХ АЭРОЗОЛЯ

И.А. Пейль, Э.И. Тамм, П.Н. Зубченко, И.К. Холм, Э.К. Мяги

Электрическое сепарирование. Требования к входному аэрозолю

Монодисперсный аэрозоль необходим как при градуировании аэрозольных измерительных приборов, так и при экспериментальном исследовании физических процессов в аэрозоле. Сейчас для генерирования такого аэрозоля, особенно в области субмикронных частиц, широко применяется метод электрического сепарирования [1, 2, 9, 10]. Узкую фракцию сепарируют из частиц, носящих один элементарный заряд e (положительный или отрицательный). Многократно заряженные частицы, попав на выход сепаратора, расширяют спектр размеров частиц отсепарированного аэрозоля. Для оценки пригодности распределения части по заряду для электрического сепарирования целесообразно ввести два критерия качества:

$$\xi = \frac{n_1}{\sum_{i=2}^{\infty} n_i} \quad (1)$$

$$\xi_0 = n_1/N \quad (2)$$

Здесь n_i означают численные концентрации частиц, носящих элементарные заряды одной полярности, N - полная численная концентрация частиц. С увеличением ξ уменьшается опасность расширения спектра выходного аэрозоля за счет многократно заряженных "чужих" частиц; увеличение ξ_0 ведет к возрастанию концентрации выходного аэрозоля. Критерий ξ есть обратное значение критерия ξ , предложенного в статье [1].

При электрическом сепарировании обычно применяется аэрозоль с равновесным распределением частиц по заряду, которое возникает, если значение параметра зарядки $/3/$

$$\alpha_{(\pm)} = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^{t_0} \lambda_{(\pm)}(t) dt \quad (3)$$

достаточно велико для обоих знаков заряда ионов. Здесь $\lambda(\pm)$ есть полярная проводимость воздуха, t_q - время пребывания аэрозоля в биполярной ионной атмосфере, ϵ_0 - электрическая постоянная. Равновесное распределение возникает независимо от начального состояния в аэрозоле; для не очень малых частиц (радиус $r \gg 0,2$ мкм) равновесная функция вероятности распределения мало отличается от бальмановской /1/.

Равновесное распределение является довольно широким, так что значения критериев ξ и ξ_0 сравнительно малы и уменьшаются с ростом размера частиц. В первоначальном незаряженном или очень слабо заряженном аэрозоле удается получить более узкое распределение частиц по заряду. Для этого необходимо обеспечить малые значения параметров $\alpha_+ \approx \alpha_-$ в зарядном устройстве. Это можно осуществить в заряднике с выключаемым ионизатором, в котором в аэрозоле в некоторый начальный момент создают некоторую начальную концентрацию ν_0 ионов обоих знаков, убывающую затем за счет рекомбинации обоих знаков ионов между собой и с аэрозольными частицами. После израсходования ионов элементарные процессы обмена заряда прекращаются и полученное распределение частиц аэрозоля по заряду сохраняется. Назовем это распределение выходным распределением зарядника.

Теория процесса зарядки

Следуя Фуксу /4/, обозначим через p_i вероятность захвата частицей, носящей i элементарных зарядов, одного иона того же знака за единицу времени при единичной концентрации этих ионов; через q_i - вероятность захвата такой частицей иона обратного знака при тех же условиях. Тогда при допущении, что $p_i = p_{-i}$, $q_i = q_{-i}$ и начальные концентрации ионов обоих знаков равны $\nu_0^+ = \nu_0^- = \nu_0$ что гарантирует симметричность распределения частиц по заряду в любой момент времени, процесс зарядки частиц описывается следующей системой кинетических уравнений:

$$\frac{dn_0}{dt} = \nu(2n_1q_1 - 2n_0p_0),$$

$$\frac{dn_i}{dt} = \nu(n_{i-1}p_{i-1} - n_i p_i - n_i q_i + n_{i+1} q_{i+1}), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, m-1,$$

$$\frac{dn_m}{dt} = v(n_{m-1}p_{m-1} - n_m p_m - n_m q_m),$$

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha v^2 - gv.$$

Здесь n_i обозначает концентрацию i -кратно заряженных частиц (по сделанному допущению $n_i = n_{-i}$), α есть коэффициент рекомбинации ионов между собой, а g — электрическая плотность аэрозоля /5/. Теоретически $m \rightarrow \infty$ при практическом решении системы необходимо ограничиться некоторым достаточно большим конечным значением. Электрическая плотность аэрозоля учитывает все процессы исчезновения ионов за счет прилипания их к частицам; ее можно вычислить по формуле:

$$g = \sum_{i=1}^m n_i (\rho_i + q_i). \quad (6)$$

Система (5) была решена численно на ЭВМ методом Рунге-Кутты для радиуса частиц $r = 0,6$ мкм. Значения ρ_i, q_i были вычислены по теории Фукса /4/, принято $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12}$ м³/с, $m = 5$. Результаты решения показывают, что выходное распределение зарядника полностью определяется отношением v_0/N ; $v_0/N \gg 50$ это распределение практически равновесное. В составленной по результатам решения системы (5) таблице I приведена зависимость критериев ξ и ξ_0 от отношения v_0/N ; значение этих критериев полностью определяется формулой функции вероятности p_i распределения числа частиц по их заряду.

Таблица I

Зависимость рассчитанных значений ξ и ξ_0 от отношения v_0/N

v_0/N	1,0	2,0	3,0	3,3	6,7	10,0	20,0	67	200	по Больцм
ξ	5,66	2,63	1,71	1,54	0,85	0,68	0,56	0,53	0,53	0,42
ξ_0	0,18	0,22	0,22	0,21	0,18	0,17	0,15	0,15	0,15	0,14

Отличие полученного равновесного распределения от Больцмановского объясняется малостью выбранного значения $m = 5$.

Результаты решения позволяют оценить и время формирования выходного распределения зарядника. При $v_0/N \ll 50$, когда это распределение далеко от равновесного, указанное время практически не зависит от v_0 , но уменьшается обратно

пропорционально N . Например, при соблюдении равенства $v_0 = N$ зависимость t от N хорошо аппроксимируется формулой:

$$t / c / = \frac{10^{11}}{N / \text{м}^{-3}} .$$

Время формирования равновесного распределения ($v_0 / N \geq 50$) не зависит от N и уменьшается приблизительно обратно пропорционально v_0 . Условием формирования равновесного распределения по параметру зарядки α было получено: $\alpha \geq 1,4$.

Экспериментальная проверка теории зарядки

Идея эксперимента для проверки вышеизложенной теории следующая. При помощи зарядника с выключаемым ионизатором в аэрозоле с возможно монодисперсными нейтральными частицами известной концентрации N создадут симметрично биполярную ионную атмосферу с регулируемой начальной концентрацией ионов v_0 , обеспечивают аэрозолю время выдержки, достаточное для уменьшения концентрации ионов до натурального уровня, и измеряют распределение по заряду числа частиц аэрозоля на выходе зарядника. Детализованная блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Диоктилфталатовый аэрозоль из конденсационного генератора ГА поступает через электрофильтр ЭФ (для устранения заряженных частиц) на вход смесителя-выдерживателя С-В с расходом Φ_2 . Ионы из коронного ионизатора КИ выдуваются струей фильтрованного воздуха, протекающей со звуковой скоростью вокруг острия перед соплом (расход Φ_T). На острие было подано высокое смешанное напряжение относительно сопла от последовательно включенных источников переменного и постоянного напряжения. Биполярно ионизированный воздух поступает в смеситель через трубу Т регулируемой длиной L (для регулирования начальной концентрации ионов v_0 на входе смесителя). КИ, Т и С-В вместе образуют зарядник с выключаемым ионизатором.

Концентрацию частиц аэрозоля N на входе смесителя определяли фотоэлектрическим счетчиком ФЭС типа АЗ-5. Из-за малости динамического диапазона ФЭС аэрозоль необходимо разбавлять, для этого применялись электрические разбавители ЭР1 и ЭР2 /6/. Распределение частиц по заряду определяли траекторным спектрометром ТСМ /7/. Фотопленки с изображениями треков частиц обрабатывались на полуавтоматическом координатометре /8/, работающем на линии с микро-ЭВМ "Электроника ДЗ-28".

ИЗМЕРЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ

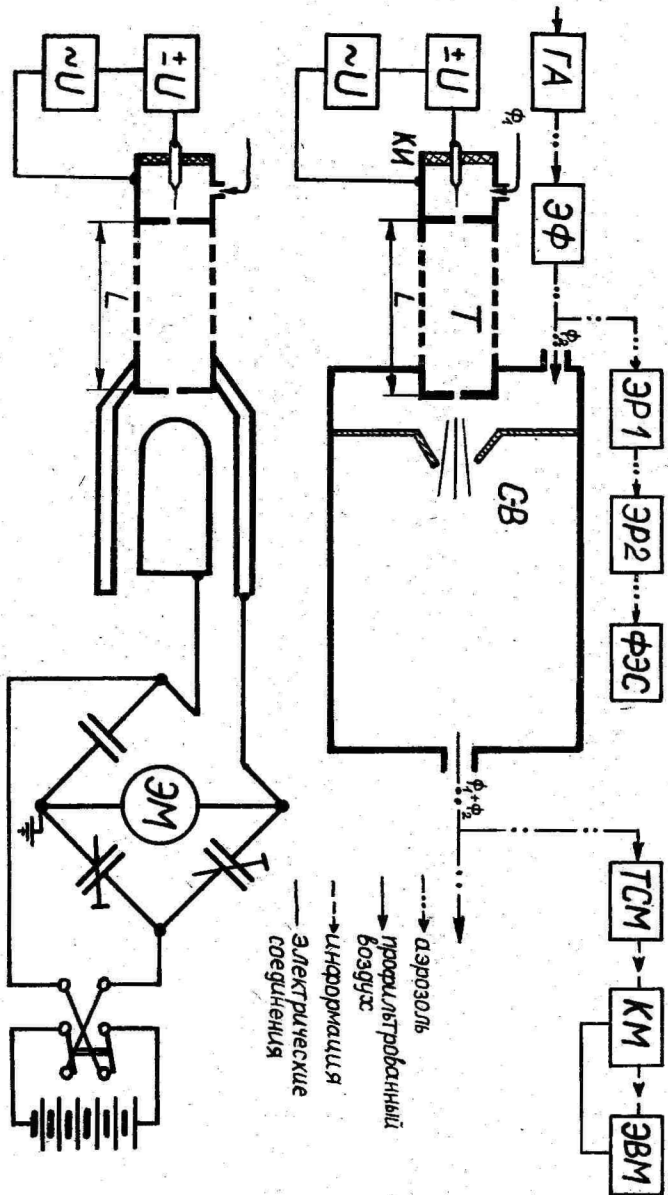


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для определения начальной концентрации ионов ν_0 в зависимости от длины l трубы T , в которой концентрация ионов уменьшается за счет их взаимной рекомбинации, применялась специальная установка, изображенная на рис. 1 внизу. Биполярно ионизированный воздух из трубы T попадает в измерительный конденсатор, в электрическом поле которого ионы разделяются по знаку заряда и осаждаются на обкладках. Коммутируя полярность напряжения на конденсаторе, электрометром ЭМ поочередно измеряют ток ионов обоих знаков на его измерительную обкладку. ν_0 вычисляется через ток и расход Φ_I . Для подавления помех от нестабильности напряжения питания измерительный конденсатор включен в мостовую схему, уравновешенную по переменному напряжению.

Конструктивные и режимные параметры ионизатора были выбраны такими, что изменением длины l от 0 до 430 мм начальная концентрация ν_0 ионов обоих знаков в С-В (учитывая разбавление на Φ_2) регулировалась в пределах $(1,0 \cdot 10^{15} \dots 1,0 \cdot 10^{11}) \text{ м}^{-3}$. Точность определения ν_0 в среднем 15%. Равенство $\nu_0^+ = \nu_0^-$ достигается выбором постоянной составляющей напряжения на острии.

Эксперименты проводились диоктилфталатовым аэрозолем со средним радиусом частиц 0,6 мкм, концентрация частиц в С-В поддерживалась постоянной: $N = (1,0 \pm 0,5) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Точность определения N мала из-за малой точности ФЭС (тот же ФЭС применялся и при определении коэффициентов разбавления ЭР1 и ЭР2).

Распределение числа частиц по заряду было измерено для пяти значений отношения ν_0/N . В каждом случае обрабатывались треки 200...300 частиц. На рис. 2 для примера графически представлены некоторые экспериментальные распределения, для сравнения построены и теоретически рассчитанные кривые для близких значений отношения ν_0/N , а также кривые распределения Больцмана. Сдвиг мод экспериментальных кривых в сторону отрицательных зарядов объясняется тем, что при соблюдении равенства $\nu_0^+ = \nu_0^-$ за счет неравенства подвижностей ионов различных знаков вероятность захвата частицей отрицательного иона больше, чем для положительного иона. Для упрощения задачи в системе уравнений (5) это не учитывается; в формуле Больцмана $|I|$ оно отражается в неравенстве полярных проводимостей. Если теоретические кривые сдвинуть так, чтобы мода совпадала с модой соответствующего экспериментального распределения, экспериментальные точки в пределах довери-

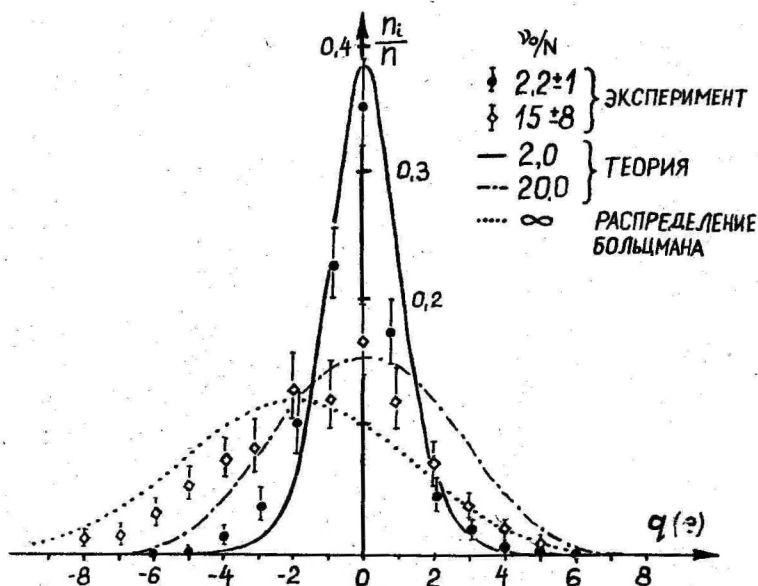


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических распределений. n_i - число частиц с зарядом ie , n - общее число частиц.

тельных интервалов совпадают с теоретическими кривыми. Доверительные интервалы относительных частот n_i/n вычислены по несимметричным формулам оценки.

Выводы

Удовлетворительное совпадение экспериментальных распределений с теоретическими позволяет использовать данные табл. I для выбора режима работы зарядника с выключаемым ионизатором. Для частиц со средним радиусом 0,6 мкм оптимальным значением отношения v_0/N можно считать 2. Зависимость оптимального значения этого отношения от размера частиц требует дальнейшего исследования.

Л и т е р а т у р а

1. Кикас Ю.Э., Сузи Р.Э., Тамм Э.И. К теории метода электростатического сепарирования аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1982, вып. 631, с. 76-84.
2. Пейль И.А., Тамм Э.И. О получении монодисперсного аэрозоля методом электрического сепарирования. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с. 44-52.
3. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 55-79.
4. Фукс Н.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов. - Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1947, № 4, с. 341-348.
5. Таммет Х.Ф. Электрические параметры загрязненности воздуха. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1977, вып. 443, с. 48-51.
6. Пейль И.А. Электростатический разбавитель аэрозоля. - См. наст. сб., с. 120-125.
7. Тамм Э.И., Фишер М.М. Определение размеров и зарядов аэрозольных частиц в пределах радиусов от 0,35 до 1,2 мкм ультрамикроскопическим (траекторным) методом. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1973, вып. 320, с. 109-128.
8. Мирме А.А. и др. Полуавтоматический координатомер. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1979, вып. 479, с. 132-139.

GENERATION OF THE NARROW BIPOLAR CHARGE DISTRIBUTION
ON AEROSOL PARTICLES

I. Peil, E. Tamm, P. Zubchenko, I. Holm and E. Mägi

S u m m a r y

It has been theoretically and experimentally shown that the use of a special charging device gives a narrower bipolar charge distribution on aerosol particles than the Boltzmann distribution. At first a bipolar ion atmosphere will be generated in aerosol and then the charging processes will proceed until all the ions will be recombined. The charge distribution, the most suitable one for the electrostatical separation of aerosols, is obtained when the ratio of the initial concentrations of ions and aerosol particles is 2.

ПРОВЕРКА РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА АЭРОЗОЛЕЙ В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ ЧАСТИЦ

Э.И. Тамм, Л.Э. Лангус, А.А. Мирме

Введение

Электрический сепаратор аэрозольных частиц как генератор монодисперсных тест-аэрозолей считается абсолютным прибором в том смысле, что параметры выходного аэрозоля поддаются теоретическому расчету через значения режимных и конструктивных параметров, и необходимость экспериментальной градуировки отсутствует. Модальный радиус r_m частиц выходного аэрозоля вычисляется из формулы Милликена через подвижность, соответствующую вершине треугольной аппаратной функции сепаратора:

$$k_1 = \frac{\epsilon_0 \Phi_1}{C U}, \quad (I)$$

где Φ_1 - расход чистого воздуха во второго порядка дифференциальном аспирационном конденсаторе сепаратора,
C - действующая емкость конденсатора,
U - напряжение на конденсаторе,
 ϵ_0 - электрическая постоянная.

Относительная полуширина спектра выходного аэрозоля на уровне 50% от максимума обычно принимается равной этому параметру аппаратной функции сепаратора, которая определяется отношением расходов аэрозоля Φ_2 и чистого воздуха Φ_1 :

$$\delta_{50\%} = \frac{\Phi_2}{2\Phi_1}. \quad (2)$$

Но эти формулы применимы лишь при выполнении довольно жестких требований, предъявляемых ширине спектра и концентрации входного аэрозоля, и при согласовании режима сепаратора со спектром входного аэрозоля /1, 2/. Тогда течение в аспирационном конденсаторе сепаратора остается ламинарным (отсут-

ствует электрический ветер), на выход попадут, в основном, только частицы, носящие один элементарный заряд. Последнее обстоятельство позволяет вычислить концентрацию частиц, третью основную характеристику выходного аэрозоля, которая не поддается теоретическому расчету, через измеренный выходной ток сепаратора.

Вышеуказанные ограничения теории сепаратора аэрозольных частиц вызывают необходимость ее экспериментальной проверки. Опубликованные результаты подтверждают применимость формулы (1) /3/, однако ширина спектра оказывается больше получаемой по формуле (2) /4/. В Аэроэлектрической лаборатории ТГУ проведены исследования параметров тест-аэрозолей, получаемых электрическим сепаратором с рабочим пределом от 10 нм до 2 мкм по диаметру частиц /5/. Проверялось совпадение параметров выходного аэрозоля сепаратора при правильном выборе режима сепарирования с расчетными их значениями; исследовалось влияние неточности выбора режима сепарирования на параметры выходного аэрозоля. Результаты электронно-микроскопических исследований мелкодисперсных аэрозолей даны в статье /6/, ниже приводятся результаты исследования более грубодисперсных аэрозолей, полученные траекторным методом /7/.

Постановка опыта

Для сепарирования использовался диоктилфталатовый аэрозоль из конденсационного генератора, средний радиус частиц определялся по спектрам Тиндала. Выбором расходов $\Phi_1 = 280 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\Phi_2 = 28 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ установили расчетное значение $\delta_{50\%} = 0,05$. По методике, описанной в /2/, выбирали значение напряжения U так, чтобы предельная подвижность сепаратора (формула (1)) была меньше подвижности соответствующей максимальной концентрации однократно заряженных частиц. Правильность выбора напряжения и отсутствие электрического ветра проверялись визуальным наблюдением /2/. По выбранным значениям U и Φ_1 , используя формулы (1) и Милликена, определялось расчетное значение модального радиуса частиц. Назовем такое сепарирование в оптимальном режиме основным опытом (опыт А).

Для исследования влияния различных неточностей при выборе режима сепаратора были предприняты следующие опыты. Сохраняя остальные режимные параметры неизменными уменьшили напряжение U так, что 1) предельная подвижность соответ-

ствовала максимуму функции плотности распределения концентрации двукратно заряженных частиц по подвижности (опыт Б); 2) K_1 имело промежуточное значение между значениями в опытах А и Б (опыт В). В условиях опыта А увеличили концентрацию частиц, так что визуально было установлено существование электрического ветра (опыт Г).

Параметры спектра размеров и зарядов выходного аэрозоля определяли путем измерения размера и заряда отдельных частиц и последующей статистической обработки полученных данных. Для этого треки частиц фотографировались в ультрамикроскопической кювете траекторного спектрометра /7/, где частицы движутся в стоячем воздухе под действием сил тяжести и горизонтального электрического поля, при стробоскопическом освещении фотопленки обрабатывались на полуавтоматическом координатомере, описанном в статье /8/ и модернизированном А. Рейнартом в его дипломной работе. Координатомер теперь работает на линии с микроЭВМ "Электроника ДЗ-28". Он снабжен пакетом калибровочных, измерительных и тест-программ. Треки проецируют на экран из матового стекла, оператор вручную совмещает шуп с точками трека и дает сигнал измерения. Координаты точек записываются в память ЭВМ; после введения координат всех точек трека вычисляются и записываются в память радиус r и заряд q частицы, память из-под координат освобождается для следующего трека. После введения всех треков производится статистическая обработка выборки - вычисляются средние радиус и заряд, их среднеквадратические отклонения, по желанию строятся гистограммы распределения и т.д.

Обработка треков. Оценка ошибок

Формулы для расчета r и q , полученные из формулы Стокса с поправкой Кенингема, приведены в статье /7/. Они содержат пройденный частицей в течение n периодов световых импульсов путь s и угол наклона β трека относительно вертикали. Направление физической вертикали на экране координатомера определяется через средний угол наклона треков, полученных без электрического поля в кювете, относительно вертикальной оси технической системы координат координатомера. Искаженный броуновским движением трек в виде последовательности точек заменяется прямой линейной регрессии; s есть расстояние между проекциями I-ой и n-ой точки трека на эту прямую, β - угол наклона прямой относительно направления физической вертикали на экране.

В статье /7/ проведен анализ систематических и случайных ошибок измерения и обработки треков. Для относительной предельной ошибки определения среднего радиуса частиц получено:

$$\frac{\Delta \bar{r}}{\bar{r}} \approx 0,01 + \frac{t_{N-1}}{\sqrt{N}} \frac{\sigma_r''}{\bar{r}}, \quad (3)$$

где σ_r'' - среднеквадратическая случайная ошибка определения радиуса одной частицы, N - объем выборки, t_{N-1} - множитель Стьюдента. Для относительного стандартного отклонения распределения частиц по радиусу получено:

$$\frac{\sigma_r}{\bar{r}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_r'}{\bar{r}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_r''}{\bar{r}}\right)^2}, \quad (4)$$

где σ_r' - стандартное отклонение этого распределения без поправки на случайные ошибки.

Среднеквадратическую случайную ошибку можно оценить по формуле:

$$\left(\frac{\sigma_r''}{\bar{r}}\right)^2 \approx \left(\frac{\sigma_r'''}{\bar{r}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{\delta p}}{\bar{s}}\right)^2. \quad (5)$$

Здесь σ_r''' учитывает aberrации оптики и неточности при фиксировании пленки в ее канале и совмещении щупа с точкой трека.; $\sigma_{\delta p}$ - среднеквадратическое вертикальное броуновское смещение за время экспонирования, \bar{s} - среднее детерминированное вертикальное смещение за это время. Если в кювете существует и нестационарная конвекция, то соответствующее смещение неотличимо от броуновского смещения.

Хотя для устранения конвекции приняты специальные меры /7/, для проверки отсутствия нестационарной конвекции было предпринято специальное исследование. Для ансамбля вертикальных треков монодисперсных частиц со средним радиусом 0,6 мкм измерено горизонтальное отклонение 10-ой и 20-ой точек от вертикали, проходящей через 1-ую точку. Объем выборки равнялся 51. Среднеквадратические отклонения получились соответственно 0,0126 мм и 0,0172 мм, их отношение с большой точностью равно 2, а численные значения совпадают с вычисленными для $r = 0,6$ мкм по формуле Эйнштейна значениями среднеквадратического броуновского смещения. Это показывает, что случайное смещение частиц полностью объясняется броуновским движением и последний член в формуле (5) можно оценить

по теории броуновского движения. Для частиц с плотностью вещества приблизительно $1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и времени экспозиции примерно 8 с при комнатной температуре получается /7/:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{сп}}}{\bar{r}}\right)^2 = 2,1 \cdot 10^{-4} \bar{r}^{-5} / \text{мкм}^{-5}. \quad (6)$$

Второй член в формуле (5) оценивался следующим образом. Один трек измерялся повторно, перемещая его по экрану смещением пленки в канале. Стандартное отклонение полученных значений радиуса дает оценку σ_r^m . Для частиц с $r = 0,6 \text{ мкм}$ получилось $\frac{\sigma_r^m}{\bar{r}} = 0,034$.

Результаты

В табл. I приведены некоторые результаты, полученные в оптимальном режиме сепаратора (опыт А).

Таблица I

Результаты основного опыта А

№ п/п	r_m мкм	\bar{r} мкм	$\frac{\sigma_r}{\bar{r}}$
Ia	0,63	$0,64 \pm 0,02$	0,09
Iб	0,63	$0,68 \pm 0,02$	0,26
2a	0,55	$0,56 \pm 0,02$	0,10
2б	0,55	$0,54 \pm 0,015$	0,12

В первом случае (Ia, Iб) вершина аппаратной функции k_1 была слишком мало сдвинута от максимума тока однократно заряженных частиц, и на выход попало довольно большое число (5% от общего числа) многократно заряженных частиц, которые заметно влияют на спектр отсепарированного аэрозоля. Во втором случае (2a, 2б) сдвиг вершины аппаратной функции был достаточным, многократно заряженные частицы отсутствуют полностью, но по непонятным причинам попали на выход некоторые маленькие частицы. После применения цензуры к выборкам (Ia и 2a) \bar{r} совпадает с r_m в пределах ошибок измерения, относительное стандартное отклонение не превышает 10%.

Результаты исследования влияния неточностей при выборе режима сепаратора на свойства выходного аэрозоля приведены в

табл. 2. Во всех случаях (Б, В, Г) отклонение режима сепаратора от оптимального расширяет спектр выходного аэрозоля, вызывая и заметный сдвиг среднего размера от расчетного медианного размера. Например, в режиме Б расчетный медианный радиус был только 0,30 мкм, но на выход попали в основном двукратно заряженные частицы, которые при равной подвижности имеют примерно двукратный размер.

Таблица 2

Влияние неточностей режима сепаратора

Режим	\bar{r} , мкм	$\frac{\sigma_r}{\bar{r}}$
А	0,68	0,08
Б	0,63	0,11
В	0,53	0,14
Г	0,66	0,12

Табл. 2 относится к сравнительно монодисперсному входному аэрозолю (относительное стандартное отклонение 17%... 19%). В случае широкого входного аэрозоля неправильный выбор режима отражается более резко.

Выводы

Электрический сепаратор аэрозольных частиц выдает калибровочный аэрозоль с известным по расчету средним размером частиц только при правильном выборе значений режимных параметров. Для этого необходимо довольно точно знать параметры спектра входного аэрозоля. Ширина спектра оказывается, примерно, вдвое больше расчетной. Причины расширения пока детально не выяснены.

Авторы выражают благодарность А.Э. Рейнарту за указанное содействие в уходе за оборудованием.

Л и т е р а т у р а

1. Кикас Ю.Э., Сузи Р.Э., Тамм Э.И. К теории метода электростатического сепарирования аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1982, вып. 631, с. 76-84.

2. Пейль И.А., Тамм Э.И. О получении монодисперсного аэрозоля методом электрического сепарирования. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с. 44-52.
3. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H. A submicron aerosol standard and the primary, absolute calibration of the condensation nuclei counter. - J. Coll. Interf. Sci., 1974, vol.47, N 1, p. 155-171.
4. Scheibel H.G., Forstendörfer J. Generation of monodisperse Ag- and NaCl-aerosols with particle diameters between 2 and 300 nm. - J. Aerosol Sci., 1983, vol. 14, N 2, p. 113-126.
5. Кикас Ю.Э., Мирме А.А., Пейль И.А., Тамм Э.И. Об электростатической сепарации аэрозольных частиц. - В кн.: Методы и приборы контроля параметров биосферы: Межвуз. сб. Л., 1984, с. 36-42.
6. Кикас Ю.Э. О качестве калибровочных аэрозолей, полученных электрическим сепарированием. См. наст. сб., с.106-112.
7. Тамм Э.И., Фишер М.М. Определение размеров и зарядов аэрозольных частиц в пределах радиусов от 0,35 до 1,2 мкм ультрамикроскопическим (траекторным) методом. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1973, вып. 320, с. 109-128.
8. Мирме А.А., Таммет Х.Ф., Фишер М.М., Арольд М.У., Тамм Э.И. Полуавтоматический координатомер. - Уч.зап.Тарт. ун-та, 1979, вып. 479, с. 132-139.

CHECKING OF THE OPERATION OF THE ELECTRIC AEROSOL
SEPARATOR IN THE RANGE OF LARGE PARTICLE SIZE

E. Tamm, L. Langus and A. Mirme

S u m m a r y

Diocetylphthalate aerosol was chosen for the checking of the operation of the electric aerosol separator as a mono-disperse test-aerosol generator in the range of large particle size. The sizes and charges of the aerosol particles which left the separator were determined by the trajectories photographed in the trajectory spectrometer. Films were treated by means of the semiautomatic digitizer of the co-ordinates operating on-line with a microcomputer of the type "Электроника АЗ-28". Systematic and accidental errors in the measurement and treatment of the trajectories were checked. The effect of the electric wind was studied.

It was established that modal linear size of the separated particles coincides well with the calculated one, but the width of the spectrum is wider than the calculated one.

О КАЧЕСТВЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕПАРИРОВАНИЕМ

Ю.Э. Кикас

Введение

В аэрозольных измерениях широко известен метод получения монодисперсных аэрозолей путем электрического сепарирования. Лиу и Цуй /5/ описали генератор субмикронных монодисперсных частиц, состоящий из пневматического распылителя частиц, нейтрализатора заряда и дифференциального анализатора подвижностей. Этот генератор служит основой промышленного генератора эталонных аэрозолей Model 3050, выпускаемого фирмой TSI. Номинальное теоретически определяемое геометрическое стандартное отклонение генерируемого в нем аэрозоля $\delta_g < 1,06$. Подобные системы широко используются для генерирования эталонных аэрозолей с известными параметрами. При этом необходимо знать, насколько параметры реального аэрозоля соответствуют теоретическим, а также искать пути улучшения параметров сепарированного аэрозоля.

Теоретически ширина спектра подвижности сепарированного аэрозоля определяется конструктивными параметрами сепаратора и выбором его рабочих параметров. Ширина спектра размеров частиц сепарированного аэрозоля всегда больше ширины спектра подвижностей. Существует ряд причин этого уширения.

В случае равновесного распределения заряда на частицах (именно такое осуществляется в нейтрализаторе заряда) в сепарированный аэрозоль всегда попадают двукратно заряженные частицы. Они больше по размеру, но имеют такую же подвижность, как и однократно заряженные. Они расширяют спектр размеров сепарированного аэрозоля. Доля двукратно заряженных частиц в сепарированном аэрозоле возрастает с увеличением среднего диаметра частиц и ширины спектра первоначального аэрозоля. В каждом конкретном случае долю двукратно заряженных частиц можно уменьшить или увеличить выбором напряжения сепарации. Для этого необходимо заранее определить средний размер спектра первоначального аэрозоля. Несогласованность

работы сепаратора и генератора первоначального аэрозоля может вызывать заметное уширение спектра размеров сепарированного аэрозоля /1/.

Ширину спектра размеров полученного монодисперсного аэрозоля также увеличивает отклонение формы частиц от сферической.

В данной работе путем электронно-микроскопического анализа исследовалась зависимость ширины спектра сепарированного аэрозоля от ширины спектра первоначального аэрозоля и от формы первоначальных частиц. Проверялась также гипотеза о лог-нормальности распределения размеров как первоначального конденсационного, так и сепарированного аэрозоля.

Описание эксперимента

Монодисперсный аэрозоль генерировался в системе, состоящей из конденсационного генератора аэрозолей, биполярного коронного нейтрализатора зарядов и из электрического сепаратора. Параметры аэрозоля определяли электронной микроскопией проб частиц, осажденных на ядерные фильтры. Они проверялись электрическим спектрометром аэрозолей. Система получения аэрозоля подробно описана в статье /2/.

Применялись конденсационные аэрозоли трех веществ: AgI , NaCl и Hg_2Cl_2 (каломели). Частицы AgI генерировались в генераторе с быстрым охлаждением. Частицы NaCl и каломели генерировались в простых теплообменных генераторах, в которых имеется возможность разбавления аэрозоля для уменьшения коагуляции.

В коронном нейтрализаторе распределение зарядов частиц доводилось до равновесного Больцмановского распределения. Электрическим сепаратором служил второго порядка дифференциальный аспирационный конденсатор с узкой щелью для высасывания частиц с определенной электрической подвижностью. Пределы применяемого на его внутренней обкладке напряжения - от 1 В до 10 кВ, что обеспечивает сепарирование частиц диаметром от 10 нм до 2 мкм. В работе применялись объемные скорости $\Phi_1 = 1000$ л/час чистого воздуха и $\Phi_2 = \Phi_3 = 100$ л/час входного и выходного аэрозолей. Это дает теоретическую относительную полуширину спектра подвижностей 4,7% /3/.

Частицы осаждались просасыванием на ядерные фильтры с номинальными средними диаметрами отверстий 33 нм или 57 нм. Электронные микрофотографии проб обрабатывались на полуавто-

матическом координатомере на линии с ЭВМ.

Обсуждение результатов

Определялись параметры распределений частиц как первоначальных конденсационных, так и сепарированных аэрозолей, изучались зависимости от параметров работы генераторов. Параллельно исследовались сепарированный аэрозоль и тот конденсационный аэрозоль, из которого он сепарировался. Таким образом изучалось влияние качества конденсационного аэрозоля на качество конечного монодисперсного аэрозоля.

По анализу электронных микрофотографий конденсационный генератор частиц AgI в пределах от 30 нм до 120 нм выдает аэрозоль со средней полушириной спектра 19% (минимальная - 15%, максимальная - 25%). Табл. I иллюстрирует зависимость среднего размера d_k и полуширины δ_k спектров частиц AgI от режимов работы генератора.

Таблица I

Параметры конденсационного аэрозоля AgI
в зависимости от режимов генератора

Температура генератора	Расходы		Аэрозоль	
	Φ_a (л/час)	$\Phi_{разб.}$ (л/час)	δ_k (%)	d_k (нм)
200°C	100	100	18,3	37
350°C	100	100	19,6	49
400°C	100	0	20,6	115

Увеличение среднего размера достигается или повышением температуры паров AgI или уменьшением разбавления аэрозоля. Обе эти меры увеличивают коагуляцию частиц и тем самым вызывают уширение спектра размеров.

Конденсационный генератор частиц $NaCl$ в пределах диаметров от 100 нм до 300 нм выдает аэрозоль со средней полушириной спектра 23% (минимальная - 18%, максимальная - 29%).

Конденсационный генератор частиц каломели выдает в пределах диаметров от 0,5 до 1,7 мкм аэрозоль со средней полушириной 42%. Зависимость средних параметров аэрозоля от режимов генератора иллюстрирует табл. 2.

Анализ сепарированного аэрозоля показал большую зависимость качества сепарированного аэрозоля от ширины спектра

конденсационного аэрозоля, что и можно было ожидать по теоретическим соображениям /4/.

Таблица 2

Параметры конденсационного аэрозоля Hg_2Cl_2
в зависимости от режимов генератора

Температура генератора	Расходы		Аэрозоль	
	Φ_a (л/час)	$\Phi_{разб.}$ (л/час)	δ_k (нм)	d_k (%)
220°C	25	75	510	39
200°C	100	0	870	47
250°C	100	0	970	43
330°C	50	50	1030	41

Сепарирование каломели не дало удовлетворительных результатов: концентрация сепарированных частиц на выходе оказалась ничтожной. Это объясняется широким спектром первоначального аэрозоля. Количество частиц, имеющих определенную подвижность, выделяемую в сепараторе, мало. После разбавления в нейтрализаторе и сепарирования концентрация падает ниже предельной для аэрозольного электрометра сепаратора и для спектрометра.

Спектры размеров сепарированных аэрозолей AgI и $NaCl$ имели полуширину от 9% до 17%. Это заметно больше теоретической величины, но хорошо совпадает с данными работы /6/, в которой были получены сепарированные аэрозоли $NaCl$ и AgI в пределах диаметров от 3 до 300 нм с полушириной спектра от 9% до 19%.

Полуширина распределения сепарированного аэрозоля тем больше, чем больше полуширина спектра конденсационного аэрозоля. Это хорошо видно из данных табл. 3.

Важным источником уширения спектра сепарированного аэрозоля является несферичность формы частиц. Твердые частицы AgI и $NaCl$ в процессе коагуляции не сливаются в большие сферообразные частицы, а предпочитают соединяться в длинные цепочки (рис. 1А). Такие одномерные цепочки имеют электрическую подвижность соответственную их аэродинамическому диаметру и попадут в сепарированный аэрозоль (рис. 1Б). Если исключить двукратно заряженные частицы, а также цепи, состоящие явно из двух или трех частиц, получим исправленный спектр

сепарированного аэрозоля шириной от 10% до 14% (табл. 3).

Таблица 3

Влияние параметров конденсационного аэрозоля на параметры сепарированного аэрозоля

Вещество	Конденсационный аэрозоль		Сепарированный аэрозоль			
			Реальный спектр		Исправленный спектр	
	d_k (нм)	δ_k (%)	d_k (нм)	δ_k (%)	d_k (нм)	δ_k (%)
AgI	85	15	72	10	-	-
AgI	111	15	87	9	-	-
NaCl	107	19	90	14	91	10
NaCl	100	27	102	16	99	12

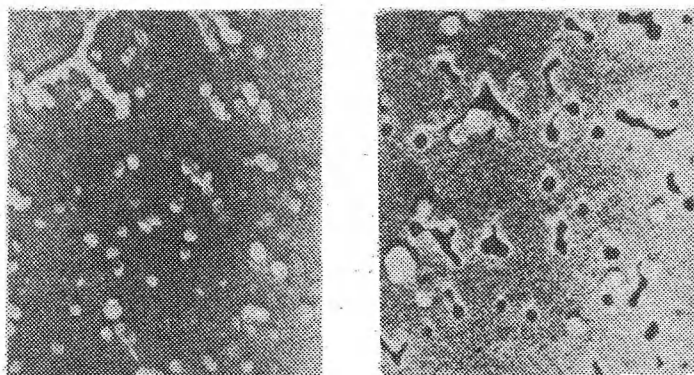


Рис. 1. Присутствующие в конденсационном аэрозоле А одномерные цепочки попадут и в сепарированный аэрозоль Б. Видны также двукратно заряженные частицы (Б).

Сепарированный аэрозоль AgI имеет ширину спектра 9%-10% (при ширине конденсационного аэрозоля AgI 15%) и содержит в основном сферические частицы (рис. 2).

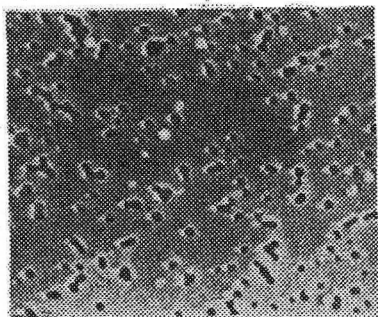


Рис. 2. Сепарированный аэрозоль
Средний диаметр - 65 нм, полу-
ширина спектра - 9%.

При использовании монодисперсных аэрозолей для калибровки аэрозольных приборов часто необходимо знать характер распределения размеров. В теоретических расчетах обычно принимается лог-нормальное распределение. В данной работе методом наименьших квадратов проверяли гипотезу о возможности аппроксимации спектров размеров лог-нормальным распределением. В результате расчетов оказалось, что для всех спектров сепарированных аэрозолей, для спектров конденсационных аэрозолей AgI при $d \leq 60$ нм, а также для широких спектров каломели ($\sigma_g = 1,66$) гипотезу о лог-нормальности нельзя отвергать. Для конденсационных аэрозолей AgI ($d > 60$ нм) и NaCl гипотезу о лог-нормальности нельзя принимать.

Хочу выразить благодарность сотрудникам Института физики АН ЭССР И. Ренге, В. Саммелсельг, Х. Келле и Е. Асари за оказанную мне в данной работе помощь.

Л и т е р а т у р а

1. Пэйль И.А., Тамм Э.И. О получении монодисперсного аэрозоля методом электрического сепарирования. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с. 44-51.
2. Кикас Ю.Э., Мирме А.А. и др. Экспериментальная градуировка электрического спектрометра аэрозолей методом эталонных аэрозолей. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 54-71.

3. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1967, вып. 195. - 232 с.
4. Кикас Ю.Э., Сузи Р.Э., Тамм Э.И. К теории метода электростатического сепарирования аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1982, вып. 631, с. 76-84.
5. Liu B.Y.H., Pui D.Y.H. A submicron aerosol standard and the primary absolute calibration of the condensation nuclei counter. - J. Coll. Interf. Sci., 1974, V 47, N 1, pp. 155-171.
6. Scheibel H.G., Porstendörfer J. Generation of monodisperse Ag- and NaCl aerosols with particle diameters between 2 and 300 nm. - J. Aerosol Sci., 1983, V 14, N 2, pp. 113-126.

ABOUT ELECTRICALLY SEPARATED CALIBRATION AEROSOLS

Ü. Kikas

S u m m a r y

Size distributions of NaCl, AgJ and Hg₂Cl₂ condensation aerosols and of electrically separated aerosols have been investigated experimentally by electronic microscopy.

Condensation aerosols of AgJ with the mean half-width of the size distribution $\delta_k = 19\%$, those of NaCl with $\delta_k = 23\%$ and those of HgCl₂ with $\delta_k = 42\%$ have been generated. Electrically separated aerosols of NaCl and AgJ with $\delta_k = 9-17\%$ have been produced. Those widths of separated size distributions are in good agreement with the experimental results [6] but exceed the calculated value, which is 5%.

The dependence of separated aerosol parameters on condensation aerosol parameters has been discussed.

The log-normal distribution has by the least squares method been demonstrated to be a good approximation to the size distributions of all separated aerosols as well as to Hg₂Cl₂ and AgJ ($d_k < 60$ nm) condensation aerosols.

ВИБРАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР МОНОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

В.Б. Тамме, И.В. Кошпелмаа

Введение

Для исследования и проверки аналитических методов измерения аэродисперсных систем необходимы модельные аэрозоли с задаваемыми счетной концентрацией и физико-химическими свойствами. При этом наиболее целесообразным является монодисперсный аэрозоль, частицы которого по возможности одинаковы по структуре, форме и размерам.

Один из способов получения модельных (в основном грубодисперсных) аэрозолей базируется на монодисперсном диспергировании растворов ионных солей или малолетучих органических веществ в летучем растворителе. После испарения последнего образуется аэрозоль из твердых или малолетучих жидких частиц одинакового размера.

В Аэроэлектрической лаборатории ТТУ разработан аналог генератора монодисперсных аэрозолей типа Бергlund-Лиу, выпускаемый фирмой "Термо-Системс" (США).

Целью данной работы было уточнение условия монодисперсного распыления для генератора, конструкция которого описана в /1/. В этой же работе /1/ экспериментально определена область образования капель одинакового размера в зависимости от рабочих параметров распылителя: $U_{кр}$ - напряжения на пьезокристалле и λ/d_0 - отношения длины волны пертурбации на начальный диаметр струи жидкости. Для выбора монодисперсного режима распыления надо также учитывать физические свойства рабочей жидкости и относительную скорость струи и воздуха в сопле распылителя.

Условия естественного распада струи в воздухе, определенные с помощью размерного анализа /2/, находятся в зависимости от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{vd_0\rho}{\mu},$$

где v - относительная скорость жидкости и воздуха,
 d_0 - диаметр струи,
 ρ - плотность жидкости,
 μ - динамическая вязкость, и от числа Z

$$Z = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma} d_0},$$

где σ - поверхностное натяжение. Число Z можно выразить как отношение числа Вебера к числу Рейнольдса:

$$Z = v \sqrt{\frac{d_0}{\sigma}} \frac{v d_0 \rho}{\mu} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma} d_0}.$$

Онезорге /3/ на основе скоростного фотографирования процесса распада струи жидкости установили графическую зависимость между числом Z и числом Рейнольдса.

На графике (рис. I) различают три зоны распада струи.

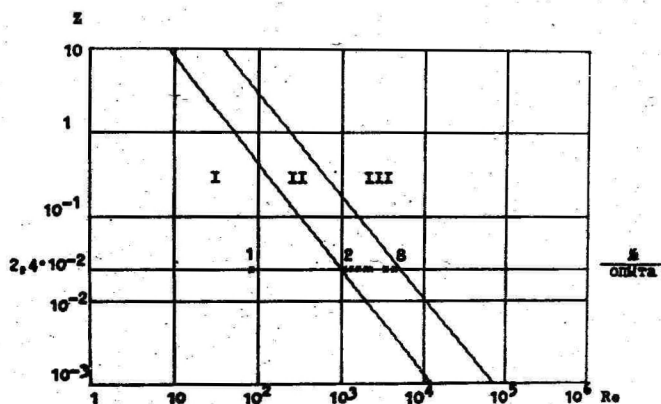


Рис. I. Графическая зависимость распада струи от числа Рейнольдса.

Так, при малом значении числа Рейнольдса вид распада струи соответствует I-ой зоне и подобен механизму Релея, с возрастанием числа Рейнольдса вид распада струи переходит во II-ую зону, в которой распадающаяся струя совершает боковое движение с возрастающей амплитудой, что по форме соответствует спиральной или синусоидальной кривой. Это относительно узкая зона, и она является переходом в III-ую зону - зону полного распыления.

Таблица I

Сравнение $u_{кр}$, v , Re , σ_g и относительного содержания мультиплетов при различных скоростях воздуха распыливания

№ опыта	$u_{кр}$ (В)	v (м/с)	Re	% мульти- плетов	σ_g	D_g (мкм)	№ рисунка
I	50	4	94	-	I,26	I04,I	рис. 3
2	50	45	I090	-	I,19	76,5	
3	50	70	I688	2,5	I,038	66,6	
4	20	I08	2596	II,I	I,10	69,8	рис. 4
5	50	III	2660	5,6	I,09	7I,I	
6	50	II4	2729	6,7	I,09	68,I	
7	20	I52	3645	6,9	I,22	62,7	рис. 5
8	20	I86	4455	-	I,76	69,9	

Методика эксперимента

Исследовано влияние скорости воздуха, обдувающего цилиндрическую струю жидкости (дистиллированная вода), на степень моности дисперсности распыла при прочих условиях моности дисперсности ($\lambda/d_0 = 4,5$ $U_{кр} = 20$ В, 50 В) для струи с начальным диаметром $d_0 = 25$ мкм. Характеристиками степени моности дисперсности служили стандартное геометрическое отклонение σ_g , и относительное содержание мультиплетов (двойных, тройных и т.д. капелек).

Целью исследования был поиск режима максимально моности дисперсного диспергирования воды (т.е. с минимальным содержанием мультиплетов).

В опытах капли воды улавливались в ванночках, содержащих слой вазелинового масла, и быстро фотографировались. Обмер и счет капель проводили с пленки при помощи полуавтоматического координатометра ЦТ -7603 /5/.

Скорость воздуха в сопле вычисляли по общепринятой методике на основе измерений статического и полного давления /4/. Пример из практически моности дисперсных капель приведен на рис. 2. Результаты опытов сводятся в табл. I. Для наглядности при некоторых режимах добавлены рисунки с соответствующими распределениями размеров капель.

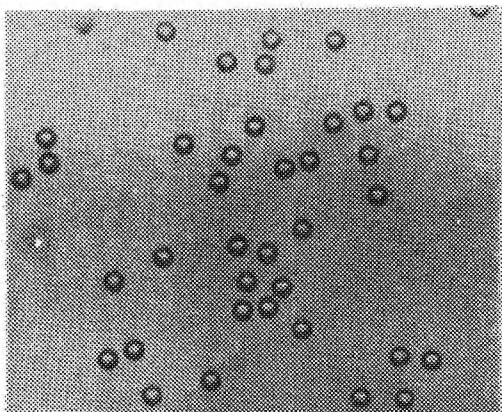


Рис. 2. Пример из практически моности дисперсных капель воды в иммерсионной среде, $v = 124,8$ м/с.

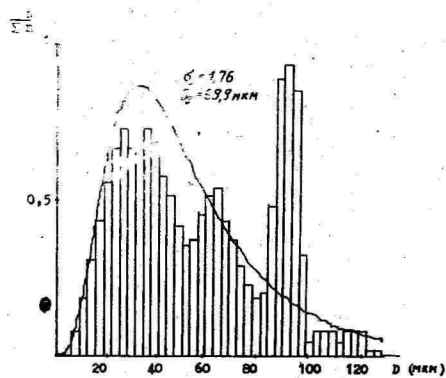
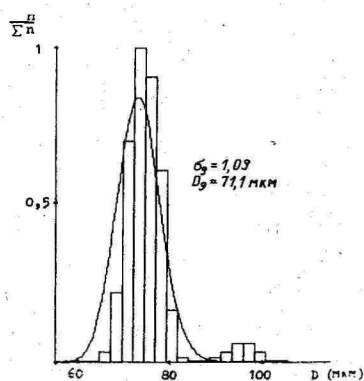
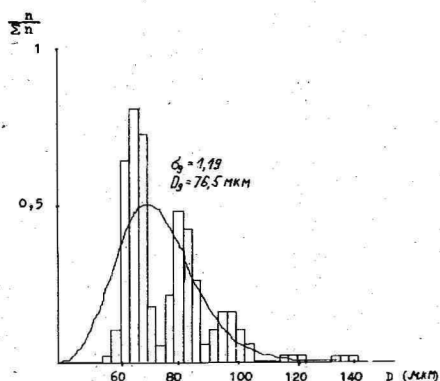


Рис. 3, 4 и 5. Распределение размеров капель:
 $v = 45 \text{ м/с}$, $v = 111 \text{ м/с}$, $v = 186 \text{ м/с}$.

Выводы

Из табл. I наши экспериментальные данные перенесены на графическую зависимость Онезорге (рис. I). При данной жидкости (вода) и диаметре жидкостного сопла образуется прямая линия параллельная оси абсцисс. Наблюдается переход из II-ой в область полного распыления III (см. рис. 4). Самый монодисперсный режим распыления отмечается в области II. Вышесказанное наводит на мысль, что классификация Онезорге может быть полезной при определении правильной скорости распыляющего воздуха, а также для других рабочих жидкостей и размеров жидкостных сопел.

На основе наших опытов можно сделать еще некоторые выводы: - мультиплеты образуются в результате слияния "основных" капель, поскольку их объемы равны сумме объемов двух, трех, и т.д. основных капель. Следовательно, причиной образования мультиплетов является кинетическая коагуляция у воздушного сопла;

- область монодисперсного распыления описывается совокупностью параметров $U_{кр}$, λ/d_0 , Re , Z в четырехмерном фазовом пространстве;

- область монодисперсности, возможно, обладает и тонкой структурой, отличающейся исключительно малым содержанием дублетов 2,5% (см. в табл. I, опыт № 3).

Л и т е р а т у р а

1. Berglund R.N., Liu I.H. Generation of Monodisperse Aerosol Standards. - *Env. Sci. & Techn.* 1973, vol. 7, p. 147-153.
2. Marshall W.R. Atomization and Spray Drying. - New-York, Am. Inst. Chem. Engrs. 1954. - 120 p.
3. Ohnesorge V. Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. - *Z. angew. Math. u. Mech.* 1936, B. 16, N. 6, S. 23-26.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. - М.: Наука, 1969. - 824 с.
5. Мирме А.А. и др. Полуавтоматический координатомер. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 479, с. 132-139.

VIBRATING GENERATOR OF MONODISPERSE AEROSOLS

V. Tamme and I. Koppelmaa

S u m m a r y

It has been shown in this paper that the operating range of the Berglund-Liu type generator depends greatly on the speed of the dispersing air as well as on the parameters λ/d_0 , U_{kr} , Re , Z in the multidimensional space, where λ/d_0 is the ratio of the disturbance wavelength to the initial liquid jet diameter, U_{kr} is the piezoceramic voltage, Re is Reynold's number and Z is the ratio of Weber's number to Reynold's number.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗБАВИТЕЛЬ АЭРОЗОЛЯ

И. А. Пейль

В экспериментальной аэрозольной физике нередко возникает необходимость измерить численную концентрацию частиц. В качестве измерителя чаще всего применяются оптические счетчики (например, АЗ-5, ПКОГ 0,2-001, РОУСО). Крупные частицы ($r > 0,2$ мкм) пересчитываются непосредственно, мелкие требуют предварительного укрупнения в специальных конденсационных камерах. Оптические счетчики имеют относительно высокую точность, но недостатком является низкая предельная концентрация. Счетчик АЗ-5 /2/ позволяет анализировать аэрозоль с концентрацией, не превышающей $3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. В то же время производительность аэрозольных генераторов часто более 10^{12} м^{-3} . Следовательно, требуется разбавление около 10^4 раз.

Получение такого большого разбавления довольно сложно. В литературе описываются многие способы. Основным является механическое смешивание аэрозоля и профильтрованного воздуха. Смешивание производится в специальной камере или путем всасывания аэрозоля в турбулентную струю воздуха /4/. Фукс и Сутугин пользовались разбавителем, состоящим из абсолютного фильтра и присоединенного с ним параллельно капилляра /3/. Недостатком механического смешивания является огромный необходимый объем профильтрованного воздуха, расход которого должен быть точно контролируемым вместе с расходом аэрозоля. Фильтр с капилляром не требует дополнительного воздуха, но имеет высокое гидравлическое сопротивление. Кроме того, сопротивление фильтра постепенно изменяется и кратность разбавления не постоянна. Такой метод тоже требует контроля за расходом.

Разбавитель, разработанный в Аэроэлектрической лаборатории Тартуского государственного университета, также имеет фильтр с капилляром. Чистый воздух получают путем электростатической фильтрации. По сравнению с другими абсолютными фильтрами, электростатический отличается малым гидравлическим сопротивлением, не требуется контроль за расходами. Принципиальная схема такого разбавителя изображена на рис. I.

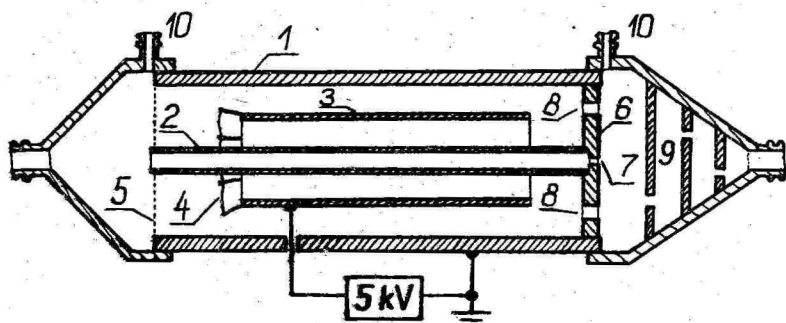


Рис. 1. Конструкция электростатического разбавителя.

Разборный трубчатый корпус 1 изготовлен из нержавеющей стали. Разборка необходима для очистки фильтра. Вдоль оси расположена трубка малого диаметра 2, через которую направляется непрофильтрованный аэрозоль. Электростатический абсолютный фильтр образуется в объеме между аэрозольной трубкой 2 и корпусом. Трубка и корпус служат заземленными электродами фильтра. Высоковольтная обкладка 3 подвешена с помощью капроновых ниток коаксиально между ними. Для зарядки аэрозольных частиц к лобовой части высоковольтного электрода прикреплено коронирующее кольцо 4 из вольфрамовой нити (диаметр сечения нити - 30 мкм).

На систему подается напряжение около 5 кВ, которое обеспечивает стабильный интенсивный коронный разряд и надежную работу зарядника в ударном режиме зарядки. В таком режиме заряжаются практически все частицы и осаждаются на обкладках. При расходе $28 \text{ см}^3/\text{с}$ и напряжении 5 кВ частицы проникают в межэлектродное пространство не глубже чем на 4 см.

Передний конец аэрозольной трубки прикреплен с помощью сетки 5, а задний опирается на заднюю стенку 6. В стенке имеются отверстия 7 и 8 для аэрозоля и профильтрованного воздуха, соответственно. Перемешивание воздуха и аэрозоля производится в лабиринтной камере 9. Для измерения перепада давления на разбавителе имеются штуцеры 10.

Кратность разбавления определяется отношением расходов аэрозоля через фильтр и аэрозольную трубку, т.е. отношением сопротивлений отверстий 7 и 8 в задней стенке 6. Теория ламинарных течений вязких сред показывает, что при течении в цилиндрических трубах объемная скорость и градиент давления

вдоль трубки связаны следующим образом /1/:

$$\phi = - \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial l} . \quad (1)$$

Здесь R - радиус сечения трубы и μ - коэффициент вязкости текущего газа. Отверстия в задней стенке электростатического разбавителя можно рассматривать как трубы радиусом R и длиной l . Тогда расход через аэрозольное отверстие 7

$$\phi_1 = - \frac{\pi \Delta p_1}{8\mu} \frac{R_1^4}{l_1} , \quad (2)$$

а через воздушное отверстие 8

$$\phi_2 = - \frac{\pi \Delta p_2}{8\mu} \frac{R_2^4}{l_2} . \quad (3)$$

Так как сопротивления упорной сетки 5 и аэрозольной трубки очень малы, можно взять $\Delta p_1 = \Delta p_2$. Учитывая, что число отверстий для профильтрованного воздуха равно N , для вычисления кратности разбавления получаем следующую формулу:

$$k = N \frac{R_2^4 l_1}{R_1^4 l_2} . \quad (4)$$

Степень разбавления зависит только от геометрии задней стенки, и общий расход на процесс не влияет.

Кратность k можно вычислить по формуле (4), но простыми технологиями изготовления и измерения отверстий не обеспечивается достаточная точность. Относительная погрешность значения k сильно зависит от погрешности определения радиусов отверстий:

$$\frac{\Delta k}{k} = 4 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2} . \quad (5)$$

Кроме того, саму формулу (4) придется в данном случае считать приближенной, т.к. в относительно коротких каналах параболический профиль скоростей течения не формируется полностью.

Целесообразнее определить кратность разбавления экспериментальным путем. Для этого необходимо иметь два разбавителя (рис. 2).

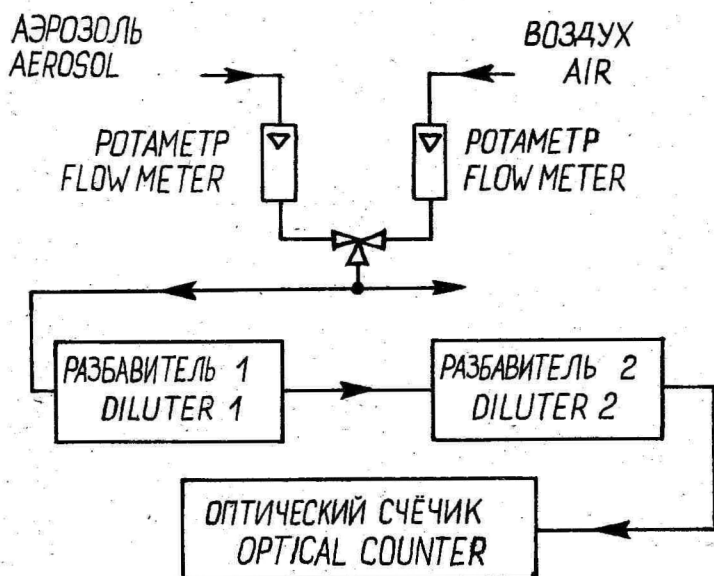


Рис. 2. Определение кратности разбавления.

Аэрозоль из генератора предварительно разбавляется механическим путем и направляется через два последовательные исследуемые разбавителя I и 2 в оптический счетчик. Обозначим показания счетчика следующим образом: n_0 - оба разбавителя включены, n_1 - включен только первый, n_2 - включен только второй разбавитель. Тогда получается для первого разбавителя

$$k_1 = \frac{n_2}{n_0} \quad (6)$$

и для второго

$$k_2 = \frac{n_1}{n_0} \quad (7)$$

Точность метода определяется стабильностью аэрозольного генератора и точностью счетчика.

В лаборатории построено и исследовано два электростатических разбавителя. Размеры выходных отверстий были выбраны следующими. Для аэрозоля диаметр $D_1 = (0,41 \pm 0,02)$ мм, длина

канала $\ell_1 = (1,3 \pm 0,1)$ мм и для профильтрованного воздуха $D_2 = (1 \pm 0,02)$ мм, $\ell_2 = (5 \pm 0,1)$ мм, число $N = 10$. Согласно формулам (4) и (5) получается

$$k = 92 \pm 35.$$

По экспериментальным исследованиям

$$k = 80 \pm 8.$$

При общем расходе разбавляемого аэрозоля $28 \text{ см}^3/\text{с}$ сопротивление одной установки — около 7 мм водного столба. Оно целиком определяется сопротивлением выходных отверстий. Уменьшить сопротивление нецелесообразно, т.к. тогда на кратность разбавления будет влиять давление электрического ветра зарядника.

Л и т е р а т у р а

1. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. — Л.: Гостехтеоретиздат, 1951. — 420 с.
2. Фотоэлектрический счетчик аэрозольных частиц типа АЗ-5: Паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации. — М. В/О маллприборимторг. — 32 с.
3. Фукс Н.А., Сутугин А.Г. Высокодисперсные аэрозоли. — Коллоидный ж., 1964, т. 26, № 1, с. 110-115.
4. Brockmann J.E., Liu B.Y.H. and McMurry P.H. A Sample Extraction Diluter for Ultrafine Aerosol Sampling. — Aerosol Science and Technology, 1984, Vol. 3, N 4, pp. 441-451.

AN ELECTROSTATICAL AEROSOL DILUTER

I. Peil

S u m m a r y

Aerosol dilution is an important problem for aerosol measurements with optical counters. The present paper describes the principle of a novel design of a diluter. The type of the device is an absolute filter with a parallel connected capillary. In the place of the absolute filter a unipolar charger and an electrostatical aspiration condenser are used. The dilution ratio of the device depends on the sizes of the output openings of the filter and of the capillary. The diluter has a small aerodynamical resistance and a high stability.

25 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМЕТРИИ
В ТАРТУСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

К.-С.К. Ребане, О.В. Сакс, Е.И. Шуличенко

В Тартуском университете электрометрия имеет очень давние корни. Известно, что в 1823 г. электрометр для измерения атмосферного электричества был сконструирован и изготовлен в Тарту по указаниям профессора физики Г.Ф. Паррот /1/. Электрометр входил в группу приборов, изготовленных для кругосветного путешествия под командованием О.Э. Коцебу, которыми пользовался в этом путешествии Эмиль Ленц.

Возрождение электрометрии в Тарту также связано с исследованиями атмосферного электричества. В 1936-1938 гг. А.М. Митт измерил колебания плотности молионов в атмосфере г.Тарту. С 1950-го года по его рекомендации исследованием ионизации атмосферы занялся Я.Ю. Рейнет /2/. Эти исследования потребовали автоматизации измерительной аппаратуры, из этой проблемой в 1952 г. по поручению Я.Ю. Рейнета начал заниматься О.В. Сакс, будучи в то время студентом отделения физики. О.В. Сакс завершил свою работу в 1954 г. Эта работа положила начало исследованиям по электрометрии в Тартуском государственном университете /3/.

После создания О.В. Саксом первого динамического конденсатора в 1958 г. /4/, он вместе с В.А. Рэзбен создал первый динамический электрометр для счетчика атмосферных ионов. В 1959 г. на основании хоздоговора с Таллинским заводом "Пунане РЭТ" был разработан динамический конденсатор ДК-60. Последний использован в первом промышленном милливольтметре-электрометре В2-5. В 1963 г. О.В. Саксу и инженерам из конструкторского бюро завода Комитетом по делам изобретений и открытий СССР было выдано удостоверение о регистрации приоритета № 33753.

В 1961-64 гг. в сотрудничестве с Дзержинским филиалом ОКБ Автоматики О.В. Саксом разработаны динамические конденсаторы ДК-62 и ДК-64 /5, 6/. Главной проблемой того времени являлось уменьшение дрейфа контактной разности потенциалов ДК. О.В. Саксом была разработана высокопроизводительная тех-

нология золочения пластин ДК методом катодного распыления /5/, обеспечивающая нестабильность нулевого уровня ниже 0,05-0,2 мВ в сутки и ниже 15 мкВ/К. Динамические конденсаторы ДК-62 и ДК-64, изготавливаемые по этой технологии, были внедрены в серийное производство и долгое время применялись в различных промышленных приборах, выпущенных заводами "Пулане РЭТ", "Микропровод", Дзержинским филиалом ОКБ Автоматики, а также экспериментальными мастерскими Тартуского университета.

К 1964 г. группой исследователей по электрометрии был создан стабильный генератор тока на основе радиоактивных препаратов с длительным периодом полураспада. На базе этого генератора сконструировали высокостабильный тераомметр /7/. На некоторые приборы, разработанные в этот период, выданы авторские свидетельства /8, 9/.

Разработанные приборы экспонировали на выставках (ВДНХ - в 1964 г., выставка "25 лет Советской Эстонии" и др.). В 1964 г. за динамический конденсатор типа ДК-62 коллективу авторов во главе с О.В. Саксом присудили вторую премию на конкурсе, организованном Научно-техническим обществом приборостроительной промышленности им. акад. С.И. Вавилова.

К этому времени О.В. Сакс уже работал на кафедре экспериментальной физики ТГУ преподавателем, читал курс о методах измерения слабых токов. У него образовалась исследовательская группа из студентов и молодых физиков, окончивших университет. Среди них были: Э.Мяртинсон, В.Парк, А.Вайн, Т.Мадисе, Р.Карниол, Х. Вяртнью, У. Мельдер, Р.Пиквер, Ю. Хямалов, Я. Виллем, В. Алтухов, К. Румма и др. Так при кафедре экспериментальной физики возникла лаборатория электрометрии.

На основе экспериментально-теоретических исследований, начатых в 1960-х годах /10/, разрабатывалась серия электрометров с динамическим конденсатором ДК-64, соответствующих уровню мировых стандартов по стабильности, точности и чувствительности. Участие в 1969 году в конкурсе электрометрических усилителей, организованном Советом научного приборостроения при Президиуме АН СССР, принесло коллективу лаборатории электрометрии ТГУ всесоюзное признание. После проведения сравнительных испытаний электрометров, представленных на конкурс от многих ведущих организаций, электрометр ТГУ был признан лучшим. Цитируем выписку из протокола комиссии: "УИ. Исходя из сравнения полученных характеристик, можно считать, что наилучшими параметрами в группе приборов с ди-

намическим конденсатором отличается прибор УТ-6801 (Тартуский госуниверситет). Прибор имеет хорошие технические характеристики, малые габариты, удобен в обращении и соответствует представлениям современной технической эстетики. Прибор может быть использован для измерения токов до 10^{-17} А."

Электрометры типа УТ-6801 /II/ и УТ-7101 экспонировались на ВДНХ и на многих международных выставках, а в 1970-ые годы выпускались малыми сериями экспериментальными мастерскими ТГУ в сотрудничестве с лабораторией электрометрии. Было выпущено свыше ста электрометров, многие из которых используются до настоящего времени в институтах, заводах, конструкторских бюро и высших учебных заведениях, в том числе в ТГУ. В этот же период электрометры с ДК-64 нашли применение в спектрометрах и счетчиках ионов, разработанных в Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей ТГУ /I2/.

Последними достижениями электрометристов ТГУ в этой области являются динамический конденсатор с электростатическим возбуждением ДК-79 /I3, I4/ и электрометр на его базе - УТ-8208. Члены авторского коллектива (М.Э. Роос, О.В. Сакс и Ю.А. Хяммалов) удостоены золотой медали и грамот ВДНХ. Среди известных во всем мире приборов с ДК электрометр УТ-8208 отличается быстродействием. Он имеет полосу пропускания от 0 до 200 Гц, но верхний предел частоты может быть ступенями переключен до 0,1 Гц.

Работы по повышению чувствительности электрометров с ДК являлись одним из направлений исследований лаборатории электрометрии с самого начала ее существования. Теоретические и экспериментальные работы, завершенные к 1975 г. /I5/, показали, что 1) предельная чувствительность по току 10^{-18} А может быть достигнута не только в вакууме, но также при атмосферном давлении путем уменьшения активного объема /I0/ ниже 1 см^3 ; 2) конденсаторы с газовым диэлектриком, а также в вакууме в диапазоне токов ниже 10^{-16} А нельзя считать шумящими; в них наблюдаются флуктуации тока и заряда, не объяснимые известными источниками шумов с точки зрения электрометрии. К настоящему времени этот вид шумов подробно исследован Ю.А. Хяммаловым. Им теоретически и экспериментально выяснено, что причиной такого шума являются адсорбционно-десорбционные процессы на поверхностях конденсаторов, а частотный спектр этих шумов характеризуется $1/f$ -распределением /I6, I7, I8/.

Новым направлением в работе лаборатории является исслед-

дование динамики электрометрических устройств. Руководителем и главным исполнителем теоретических и экспериментальных работ по динамике является М.Х. Ансо. Его работы сдвинули верхний предел полосы пропускания электрометрических усилителей до рекордных значений частот. В 1982 г. на ВДНХ был экспонирован широкополосный электрометрический усилитель тока УТ-8105 /19/, обладающий верхним пределом полосы пропускания 3 кГц на самом чувствительном поддиапазоне (усиление 10^{12} В/А). За достигнутые успехи автор М.Х. Ансо был награжден серебряной медалью ВДНХ. М.Х. Ансо разработаны аналитические методы расчета быстродействующих электрометрических усилителей малого тока и методика их настройки /20-26/. Результаты его работы доложены на научно-техническом совещании "Вопросы динамики электрометрической аппаратуры" в 1982 г. в Тарту /27/ и подытожены в кандидатской диссертации, защищенной в 1984 г. /28/.

Параллельно с другими работами коллектив лаборатории электрометрии обратил большое внимание на метрологическое обеспечение электрометрических устройств /29-32/. Разработаны меры малого тока ИИТ-9 + ИИТ-13 (10^{-9} - 10^{-13} А) /19/. Результаты продолжительных исследований стабильности выходного тока ИИТ приведены в работе /30/. Многие научно-исследовательские организации и лаборатории государственного надзора Госстандарта снабжены комплектами ИИТ для поверки электрометрических измерителей тока. В 1982-85 гг. для метрологического обеспечения электрометрических устройств коллективом разработан комплекс аппаратуры, состоящий из двух поверочных установок - УТ-8303 /31/ и УТ-8304 /32/ и ряда приспособлений. Кстати, по имеющимся данным впервые в мировой метрологической практике Тартуским коллективом разработаны методика поверки и соответствующая установка (УТ-8303) для динамической поверки электрометрических усилителей тока и заряда в диапазоне от 0,001 Гц до 50 кГц.

Высокий научно-технический уровень разработанных в ТГУ электрометрических устройств достигнут благодаря применению многих специальных точных приборов и компонентов /3-9, 11, 13, 15, 19, 29, 32, 33/, изготовленных мастерами-механиками наивысшей категории: А.К. Сузи, Ю.Э. Кирсс, Э.Е. Кайтса, Л.Г. Висберг и др. Фамилии их редко встречаются среди авторов публикаций, но большую роль их при реализации идеи физиков-электрометристов следует особо подчеркнуть.

В конце 1960-х годов в лаборатории электрометрии парал-

тельно с другими исследованиями по электрометрии по инициативе Я.Я. Виллема возникло направление на стыке экспериментальной физики и электрометрии – исследование органических молекул методами фотоионизации и электрометрии /34/. К настоящему времени Яаном и Ниной Виллем измерены и идентифицированы фотоэлектронные спектры более чем трехсот пятидесяти органических молекул. Количество публикаций по исследованию фотоэлектронных спектров составляет более 70.

Всесоюзный научно-технический семинар "Теоретические проблемы электрометрии" /35/, проведенный с 17 по 19 сентября 1985 г. в Тартуском университете, подтвердил мнение, что работы электрометристов ТГУ приобрели признание и авторитет среди членов коллективов, занимающихся аналогичными вопросами. Электрометристы ТГУ имеют также тесные научные связи с многими организациями, например, с научно-производственными объединениями "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", "Буревестник", "Микропровод", "Пуанане РЭТ", ОКБ Института космических исследований АН СССР и др.

Л и т е р а т у р а

1. Прюллер П.К. Физики Тартуского университета и Петербургская академия наук. – В кн.: Петербургская академия наук и Эстония. Таллин: Валгус, 1978, с. 31-74.
2. Рейнет Я.Ю., Прюллер А.К., Сакс О.В. О научно-исследовательских работах в области естественной и искусственной аэроионизации и электроаэрозолей в Тартуском государственном университете. – Уч. зап. Тарт. ун-та, 1963, вып. 140, с. 3-15.
3. Сакс О.В. Автоматический фотографический счетчик ионов (на эст. яз.). – Уч. зап. Тарт. ун-та, 1956, вып. 42, с. 84-93.
4. Сакс О.В. О конструкции динамического конденсатора для счетчиков атмосферных ионов. – В кн.: Приборы и методы исследований: III всесоюз. научн. метеорол. совещ. IX. Л., 1963, с. 303-306.
5. Сакс О.В. Емкостный вибропреобразователь ДК-62 для электрометрических усилителей. – Измерит. техника, 1966, № 3, с. 51-53.

6. Сакс О.В., Мадисе Т.В. Динамический конденсатор ДК-64Т. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1969, вып. 239, с. 106-121.
7. Лоог П.К., Пиквер Р.И., Рээбен В.А., Сакс О.В. Тераомметр с радиоактивным генератором тока. - Приборы и средства автоматизации, 1965, № 8, с. 37-42.
8. Лоог П.К., Пиквер Р.И., Рээбен В.А., Сакс О.В. Тераомметр со стабилизированным источником питания. Авт. свид. СССР, кл. G 01 R 21e 29/01, № 162238, заявл. 26.03.63., опубл. 16.04.64., бюлл. № 9.
9. Веске У.В., Вяэртнуу Х.В., Ирд В.Я., Каск А.К., Рабинович И.К., Розенталь Н.К., Сакс О.В., Султсон Р.И. Малогабаритный контактный вибропреобразователь. Авт. свид. СССР, кл. H - 02, 21 d 10, - 198439, заявл. 16.05.66., опубл. 28.06.67., бюлл. № 14.
10. Сакс О.В. Собственные помехи преобразователя с динамическим конденсатором. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1977, вып. 443, с. 99-138.
11. Кайтса Э.Е., Кирсс Ю.Э. Мадисе Т.В., Рээбен В.А., Сакс О.В. Высокочувствительный электрометр типа УТ-6801 с динамическим конденсатором / Тр. ВНИИЭТРИ. М., 1973, т. 10(40), с. 18-26.
12. Таммет Х.Ф. Электрометрия в атмосферно-электрических измерениях. - В кн.: Теоретические проблемы электрометрии: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. сем. Тарту, 1985, с. 16-17.
13. Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. Динамический конденсатор. Авт. свид. СССР, кл. H 01 G 5/16, - 892493. заявл. 29.04.80., опубл. 23.12.81., бюлл. № 47.
14. Роос М.Э., Хяммалов Ю.А. Преобразователь постоянного напряжения в переменное. Авт. свид. СССР, кл. G 01 R 19/18, № 1018035, заявл. 26.08.81., опубл. 15.05.83., бюлл. № 18.
15. Разработка и исследование вакуумированного входного устройства динамического электрометра. Тарту, 1976. - 37 с. (деп. в ВИНТИ, № В 515485.)
16. Хяммалов Ю.А. Некоторые результаты исследования зависимости токовых помех от температуры в динамическом электрометре. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1982, вып. 631, с. 125-132.
17. Хяммалов Ю.А. О фликкер-шумах адсорбционных процессов на поверхности. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с. 85-93.

18. Хяммалов Ю.А. Об эволюционном механизме возникновения $1/f$ -флуктуаций. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 123-131.
19. Ансо М.Х. Широкополосный усилитель малого тока УТ-8105. - Приборы и техника эксперимента, 1982, № 4, с. 257.
20. Ансо М.Х. Расширение полосы пропускания усилителя с динамическим конденсатором при помощи параллельного канала. - Измерит. техника, 1976, № 9, с. 55-57.
21. Ансо М.Х. Быстродействующий измеритель малых токов. Авт. свид. СССР, кл. G 01 R 19/00, № 813259, заявл. 09.II.78., опубл. 15.03.81., бюлл. № 10.
22. Ансо М.Х. Методы повышения быстродействия электрометрических измерителей малых токов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 16-20, 3-15.
23. Ансо М.Х. Резистивный источник малого импульсного тока. Авт. свид. СССР, кл. G 01 R 19/00, - 943589, заявл. 24.09.80., опубл. 15.07.82., бюлл. № 26.
24. Ансо М.Х. Быстродействующий электрометр. - Приборы и техника эксперимента, 1981, № 5, с. 128-130.
25. Ансо М.Х. Согласование быстродействующего измерителя малых токов с объектом измерения. - Измерит. техника, 1982, № 10, с. 35-36.
26. Ансо М.Х. Многодиапазонный измеритель малых токов. - Авт. свид. СССР, кл. G 01 R 19/00, № 1133559, заявл. 03.03.82., опубл. 07.01.85., бюлл. № 1.
27. Научно-техническое совещание "Вопросы динамики электрометрической аппаратуры": Тез. докл. Тарту, 1982. - 62 с.
28. Ансо М.Х. Разработка основ конструирования измерителей малых токов с повышенным быстродействием на базе высокоомных измерительных резисторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1984. - 14 с.
29. Посметухова Г.В., Сакс О.В. Ионизационный источник тока ИИТ-10-ИИТ-13. - Измерит. техника, 1976, № 9, с. 68-70.
30. Посметухова Г.В., Сакс О.В. Нестабильность ионизационных источников тока ИИТ-9 - ИИТ-12. См. наст. сб., с.134-139.
31. Посметухова Г.В., Роос М.Э., Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. Определения динамических характеристик электрометрической аппаратуры. - В кн.: Теоретические проблемы электрометрии: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. сем. Тарту, 1985, с. 29-32.

32. Сакс О.В., Щор В.Г. Электрометрическая поверочная установка УТ-8304. См. наст. сб., с. 140-149.
33. Сакс О.В., Шуличенко Е.И. О применимости магнитоуправляемых и игольчатых контактов в электрометрических устройствах. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 140-148.
34. Сакс О.В., Виллем Н.В., Виллем Я.Я. Электрометрические измерения в фотоионизационном эксперименте. - В кн.: Теоретические проблемы электрометрии: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. сем. Тарту, 1985, с. 80-83.
35. Всесоюзный научно-технический семинар "Теоретические проблемы электрометрии": Тез. докл. Тарту, 1985. - 116 с.

25 YEARS OF ELECTROMETRICAL INVESTIGATIONS
AT TARTU STATE UNIVERSITY

K.-S. Rebane, O. Saks and E. Schulichenko

S u m m a r y

The necessity to automate the measurements of the ionization of the atmosphere caused the rapid development of research work in the field of electrometry at Tartu State University. The first vibrating reed electrometer was made here in 1959. Improvement of the apparatus with vibrating capacitors is one of the main aims of the researchers. In addition to that, the problem of the dynamics and the metrology of electrometrical instruments have been dealt with and the study of the photoionization of molecules has been carried out with the help of electrometry.

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ИОНИЗАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ИИТ-9 - ИИТ-12

Г.В. Посметухова, О.В. Сакс

Наряду с другими метрологическими средствами калибровки, аттестации и поверки электрометрических устройств по току /1/ находят применение меры малого тока, т.н. ионизационные источники тока (ИИТ). Они разработаны в 1967-1970 гг. в Тартуском государственном университете под руководством О.В. Сакса. В настоящее время ИИТ прилагаются в виде отдельных комплектов к различным электрометрическим устройствам, выпускаемым ТТУ. Ими снабжены некоторые лаборатории государственного надзора и центры стандартизации и метрологии. ИИТ, аттестованные во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, применяются также в качестве встроенных образцовых мер тока или заряда в системах для воспроизведения размера единиц экспозиционной дозы рентгеновского, гамма-излучений, потока частиц и потока энергии частиц электронного и тормозного излучений, а также при проведении международных сличений эталонных установок, входящих в состав эталона СЭВ единицы экспозиционной дозы рентгеновского излучения /2/.

Комплект ионизационных источников тока состоит из четырех ИИТ с фиксированными начальными значениями выходного тока 10^{-9} , 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} А, представляющих собой малогабаритные герметичные ионизационные камеры со встроенным радиоактивным излучателем (плутоний-239 для ИИТ-9, углерод-14 для ИИТ-10, -11, -12). Камера заполнена воздухом при нормальном атмосферном давлении. Конструкция, принцип работы и схемы включения ИИТ подробно изложены в работе /3/.

Точное значение силы тока ИИТ с погрешностью не более $\pm(1\% + 5 \cdot 10^{-15}$ А) указывается в паспорте прибора. Составляющая погрешности $5 \cdot 10^{-15}$ А обусловлена паразитными токами керамического изолятора ИИТ, играющими практическую роль при номинальных значениях 10^{-12} А. Изменение выходного тока ИИТ не превышает 0,5% на каждые 10 К в интервале рабочих температур. Допустимое изменение выходного тока во времени относительно паспортного значения нормировано и не должно превышать $\pm 1\%$ в год.

Возможные источники систематической погрешности, присущие мерам, построенным на основе ионизационной камеры, и их примерная оценка приведены в работе /1/.

Измерения выходного тока ИИТ проводились (поочередно) в ТГУ на стенде для поверки ионизационных источников тока типа УТ-6915 (с погрешностью 0,5%) и во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (с погрешностью 0,3-0,5%) компенсационным методом.

Временная нестабильность ИИТ исследовалась на протяжении 10 лет. Характерные графики зависимости $I(t)$ приведены на рис. 1 (кривые а).

Точки на графиках соответствуют экспериментально полученным значениям тока (при комнатных температурах).

Статистическая обработка результатов измерений 110 ИИТ разных номинальных значений проведена на ЭВМ по методу наименьших квадратов. Методика предусматривала разбивку временного интервала на одинаковые промежутки времени, при этом учитывались как экспериментальные данные, полученные в ТГУ, так и данные, полученные во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Вычислялись среднее годовое изменение выходного тока относительно паспортного значения, стандартное отклонение, вычерчены графики зависимости $I(t)$ (рис. 1, прямые б).

Статистическая обработка данных показала, что при правильной эксплуатации ИИТ (сохранение герметичности камеры, чистота изоляторов) у исследованных источников тока ИИТ-9, ИИТ-II, ИИТ-12 среднее годовое изменение выходного тока относительно паспортного значения, характеризуемое крутизной характеристики $I(t)$, не превышает $\pm 0,5\%$. Стандартное отклонение не превышает 0,2% в год.

Источники ИИТ-10 не подчиняются общей закономерности. Среднее годовое изменение выходного тока у половины из исследованных (28 шт.) ИИТ-10 составляет 1-2% в год, т.е. значительно превышает норму (до 1% в год), тогда как у остальных ИИТ-10 оно составляет $\pm 0,5\%$ в год аналогично другим номиналам.

Проводились дополнительные исследования ИИТ-10, не соответствующих ТУ: вскрывались ионизационные камеры, затем снова герметизировались.

На рис. 2 приведены зависимости $I(t)$ для ИИТ-10 № 668 и № 761, подверженных разгерметизации. Кривые I характеризуют нестабильность выходного тока этих источников на протяжении 3 лет после изготовления. Кривые II отражают изменение выходного тока во времени после вскрытия камер и последующей

герметизации. Как следует из рис. 2, в результате вскрытия камер устанавливалось первоначальное значение выходного тока, которое после герметизации камер со временем увеличивалось по той же закономерности, что и до вскрытия камер, т.е. ход и крутизна характеристики $I(t)$ повторяли первоначальные.

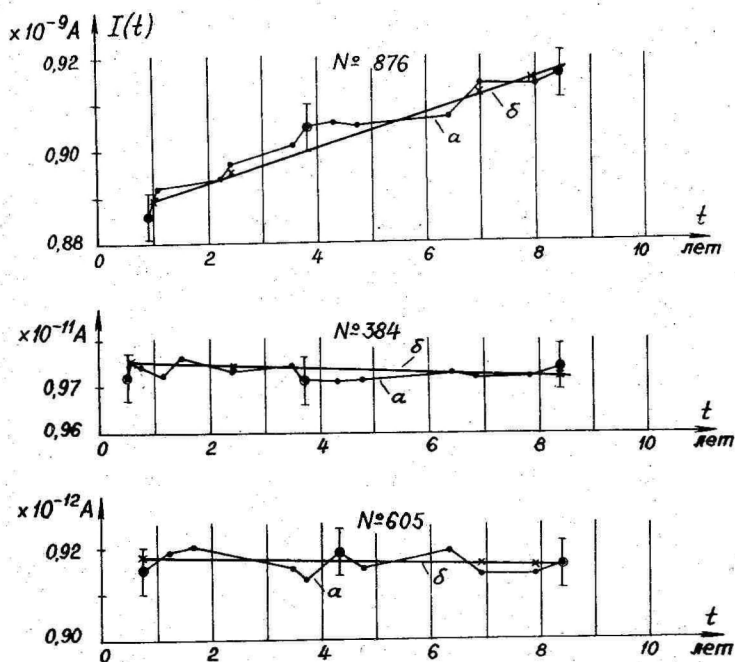


Рис. 1. Временная зависимость выходного тока ионизационных источников тока: а) экспериментальные значения; б) вычисленные методом наименьших квадратов.

В связи с вышесказанным предлагается в дальнейшем вводить соответствующую поправку (коэффициент) в значение тока ИИТ-Ю, даваемое в свидетельстве о поверке.

Для выяснения причины своеобразного поведения ИИТ-Ю проводились специальные исследования. Согласно одной из гипотез предполагалось, что в ИИТ происходит медленный переход

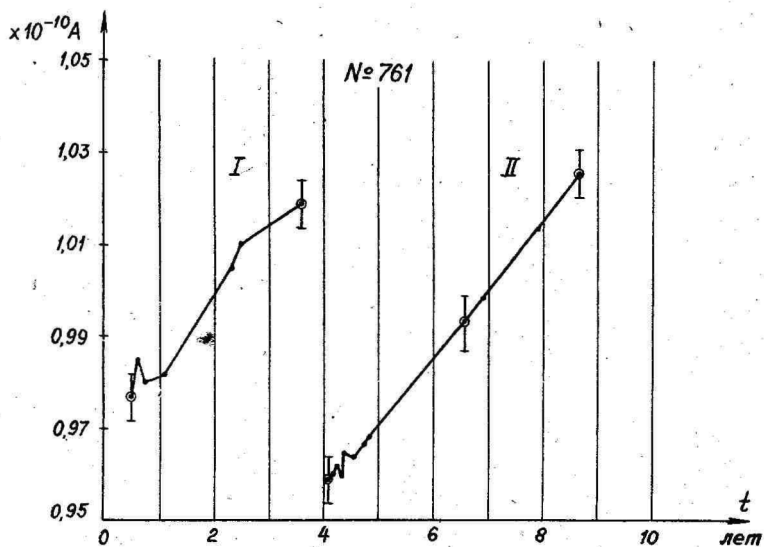
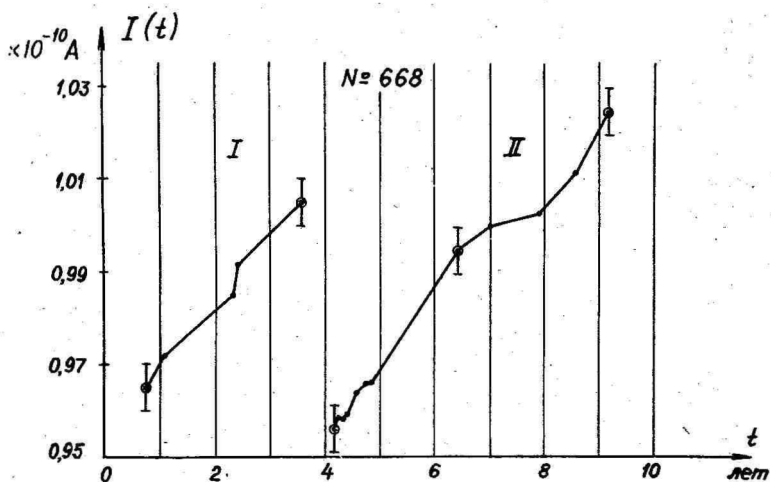


Рис. 2. Временная зависимость выходного тока ионизационных источников тока, подверженных разгерметизации.

радионуклида из твердой фазы в газовую. Для проверки данной гипотезы необходимо было установить наличие радиоактивной примеси в газе, заполняющем камеру, следующим образом. Штен-

гель ИИТ-10 вскрыли и соединили через гибкую трубочку с баллоном жидкого сцинтиллятора. Газ, заполняющий камеру, перекачивали несколько раз пузырьками через сцинтиллятор, активность которого определили на счётной установке. Было получено $2 \cdot 10^5$ импульсов в минуту при эффективности счета 94%. Последняя измерена с помощью стандартного препарата в аналогичном баллоне. По уровню уменьшения ионизационного тока в ИИТ определили, что сцинтиллятор абсорбировал приблизительно десятую долю радиоактивных примесей газа.

Таким образом, получили подтверждение гипотезе: за 5 лет в камере ИИТ-10 накопилось 1-2 мкюри радиоактивных примесей в газовой фазе. Все экспериментальные факты можно истолковать следующим образом.

Излучатель представляет собой цилиндр из оргстекла (полиметилметакрилата), покрытый тонким слоем того же материала, содержащего радионуклид C-14 с периодом полураспада 5568 лет /3/. По-видимому, под действием бета-излучения полиметилметакрилат медленно разлагается, выделяя молекулы, содержащие атомы C-14. У ИИТ-10 этот процесс наиболее сильно отражается в увеличении выходного тока, так как при изготовлении излучателя применен радиоактивный раствор полиметилметакрилата с максимальной концентрацией. Один такой излучатель содержит около 100 мкюри радионуклида. В ИИТ-II концентрация и общая активность радиоактивного материала в 10 раз, а в ИИТ-12 в 100 раз ниже. Так как у этих мер тока не наблюдается увеличения выходного тока, следует сделать вывод, что скорость выделения радиоактивного газа в ИИТ имеет нелинейную зависимость от концентрации радиоактивного полиметилметакрилата с C-14.

Предполагая, что в герметичном ИИТ-10 суммарная активность радионуклида за 5 лет практически постоянна, увеличение тока можно объяснить различием эффективностей ионизации одного и того же радиоактивного материала в газовой и твердой фазах; в газовой фазе она больше.

Практика показала, что применение ИИТ-9 - ИИТ-12 для калибровки и проверки электрометрических устройств вполне себя оправдывает, удобно в эксплуатации и позволяет осуществлять самоконтроль приборов в ходе работы.

Л и т е р а т у р а

1. Антонова Д.И., Рождественская Т.Б. Методы и средства обеспечения единства измерений малых постоянных токов в диапазоне 10^{-15} - 10^{-10} А. - Измерительная техника, 1970, № 4, с. 59-63.
2. Фоминых В.И. Применение источников постоянного тока в метрологии ионизирующих излучений. - В кн.: Всесоюзн. научн.-техн. семинар "Теоретические проблемы электрометрии": Тез. докл. Тарту, 1985, с. 6-8.
3. Посметухова Г.В., Сакс О.В. Ионизационные источники тока ИИТ-10 - ИИТ-13. - Измерительная техника, 1976, № 9, с. 68-70.

INSTABILITY OF THE IONIZATION CURRENT SOURCES ИИТ-9+ИИТ-12

G. Posmetukhova and O. Saks

S u m m a r y

Time-dependent output current instability of the ionization current sources ИИТ-9 + ИИТ-12 has been investigated. Probable reasons for causing instability have been discussed. Graphs have been presented with the aim of illustrating the time-dependence of the output current $I(t)$. The results have been treated statistically by the method of the least squares. The mean deviation of the output current from the certified value per year has not exceeded 1 % for the ИИТ-9, ИИТ-11 and ИИТ-12 nor has it exceeded 2 % for the ИИТ-10. It is recommended to introduce a correction factor in the form of a coefficient, which is presented in the verification certificate for the ИИТ-10 current.

ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОВЕРОЧНАЯ УСТАНОВКА УТ-8304

О.В. Сакс, В.Г. Шор

Для поверки электрометрических измерителей токов в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-16} А часто применяют калибровочные емкостные источники токов /1, 2, 3/, которые наиболее полно удовлетворяют всем требованиям, возникающим в процессе поверки /4/. Однако измерительный конденсатор требует зарядки, что приводит к периодичности измерений.

При наличии высокоомных резисторов высокой точности для поверки измерителей токов могут быть использованы резистивные источники токов, выходное сопротивление которых повышают с помощью электрометрического операционного усилителя /5/. В настоящее время нашей промышленностью выпускаются микропроводочные резисторы с сопротивлением до 10^9 Ом и погрешностью $\pm 0,02\%$. Номинальные значения 10^{10} , 10^{11} и 10^{12} имеют только резисторы типа КВМ, которые (допускают отклонение от номинального значения 5, 10 и 20%) имеют низкую временную и температурную стабильность /6/. Однако, если проводить калибровку этих резисторов непосредственно перед измерением, на их базе можно реализовать точные измерители и источники токов. Метод калибровки образцовых высокоомных резисторов должен отличаться высокой точностью, а кроме того удобством эксплуатации, простотой, высокой производительностью работы. Этим требованиям наиболее полно отвечают мостовые методы измерения сопротивления высокоомных резисторов /7/. Для подобных измерений применяются различные мосты: четырехплечные, двухплечные и шестиплечные /6/. Вследствие простоты схемы, возможности заземления как источников питания, так и нулевого индикатора выбор был остановлен на двухплечном мосте /8/.

Установка для статической поверки УТ-8304 предназначена для выдачи калиброванных напряжений и токов с целью обеспечения поверки электрометрической аппаратуры по постоянному току. С помощью прибора можно также проводить измерение постоянных токов электрометрического диапазона и поверку источников малых токов.

Диапазон выходных калиброванных напряжений установки

составляет от 10^{-5} до $10,22$ В обеих полярностей. Выходное напряжение устанавливается ступенчатое в диапазоне от 10 мВ до $10,22$ В с дискретностью 10 мВ. Кроме того, имеется возможность его ослабления в 10 , 100 и 1000 раз. Основная погрешность установки выходных напряжений на основном выходе прибора не превышает

$$\pm \left(0,1 + \frac{100 \text{ мкВ}}{U_{\text{вых}}} \right) \cdot 100 \text{ \%}$$

На вспомогательном выходе погрешность установки выходных напряжений в диапазоне $10^{-5} \dots 10^{-2}$ В не превышает

$$\pm \left(0,1 + \frac{10 \text{ мкВ}}{U_{\text{вых}}} \cdot 100 \right) \text{ \%}$$

Диапазон выходных и измеряемых приборов токов — от 10^{-17} до 10^{-6} А. Основная погрешность измерения, а также установки выходных калиброванных токов не превышает

$$\pm \left(5 + \frac{10^{-17}}{I} \cdot 100 \right) \text{ \%} \quad \text{в диапазоне} \quad I \leq 10^{-15} \text{ А};$$

$$\pm \left(0,5 + \frac{10^{-17}}{I} \cdot 100 \right) \text{ \%} \quad \text{в диапазоне} \quad 10^{-15} \text{ А} < I < 10^{-13} \text{ А};$$

$$\pm 0,1 \text{ \%} \quad \text{в диапазоне} \quad 10^{-13} \text{ А} < I < 10^{-6} \text{ А}.$$

Выходное сопротивление прибора при работе в режиме источника калиброванных токов не ниже

$$\begin{aligned} 10^{11} \text{ Ом} & \text{ в диапазоне } 10^{-6} \dots 10^{-8} \text{ А,} \\ 10^{13} \text{ Ом} & \text{ в диапазоне } 10^{-8} \dots 10^{-10} \text{ А,} \\ 10^{15} \text{ Ом} & \text{ в диапазоне } 10^{-10} \dots 10^{-16} \text{ А.} \end{aligned}$$

Питание установки УТ-8304 производится от сети переменного тока напряжения 220 В, потребляемая мощность не превышает 60 Вт. Габаритные размеры установки — $490 \times 175 \times 475$ мм, масса — $12,5$ кг.

В комплекте с установкой работает серийно выпускаемый цифровой вольтметр класса $0,01$ (например, ЦЗІ).

Работа прибора в режиме источника тока поясняется рисунком I. От источника калиброванных напряжений (ИКН) через образцовый резистор $R_{\text{обр}}$ подается на вход усилителя У напря-

жение U . Нагрузка (поверяемый электрометрический измеритель тока) включается в цепь отрицательной обратной связи усилителя. Ток I через нагрузку определяется по формуле

$$I = \frac{U}{R_{обр}}$$

В качестве $R_{обр}$ используются проводочные резисторы 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 Ом класса 0,02 и КВМ 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} Ом, которые калибруются непосредственно перед работой с точностью не хуже 0,08%. Параметры ИКН были перечислены выше, но при использовании внешнего вольтметра напряжение можно установить с точностью, определяемой техническими характеристиками этого вольтметра.

Работа прибора в режиме измерителя тока поясняется рисунком 2. Измеряемый ток I компенсируется образцовым током, определяемым величиной $R_{обр}$, полярностью и напряжением ИКН. Момент компенсации регистрируется нуль-индикатором (НИ), который построен на основе усилителя \mathcal{U} .

При работе прибора в режиме калибратора напряжений ИКН подключается непосредственно к выходному разъему установки. В качестве ИКН применяется двенадцатиразрядный цифро-аналоговый преобразователь (К 572 ПА2А), который управляется номеронабирателем с преобразованием двоично-десятичного кода в двоичный.

Рисунки 3 и 4 поясняют принцип калибровки резисторов 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} Ом. На рис. 3 изображен мост, условием равновесия которого является уравнение

$$R_x = \frac{U_x}{U_0}$$

В качестве исходного образцового резистора R_0 используется микропроводочный резистор 10^9 Ом $\pm 0,02\%$. По нему калибруется резистор 10^{10} Ом. Он выбирается величиной 0,8 ... 0,9 $\cdot 10^{10}$ Ом, а мост балансируется нижним плечем делителя R_1 , R_2 (рис. 4а). $U_0 = 0,1$ В, а $U_x = 1$ В. Эти напряжения контролируются с помощью внешнего вольтметра и могут устанавливаться с высокой точностью ($\leq 0,01\%$). Столь низкие значения U_0 и U_x выбраны потому, что при больших напряжениях начинает сказываться зависимость сопротивлений резисторов типа КВМ от напряжения.

На следующем этапе калибруется резистор 10^{11} Ом с помощью R_4 (рис. 4б), а в качестве образцового используется

10^{10} Ом со своим откалиброванным делителем напряжения (R_1 , R_2). После этого по резистору 10^{11} Ом калибруется 10^{12} Ом.

Погрешность калибровки (δR_x) в идеальном случае (т.е. когда при равновесии моста напряжение в точке А (рис. 3) равно нулю) определяется погрешностями установки напряжений U_o и U_x (δU_o , δU_x) и погрешностью аттестации резистора R_o (δR_o).

Однако при реальных измерениях напряжение в точке А от-
лично от нуля. Объясняется это уровнем шумов нуль-индикатора ($U_{ш}$) и уровнем тепловых шумов резисторов R_x и R_o ($U_{т.ш}$). Так как эти резисторы включены параллельно (внутреннее сопротивление источников питания моста значительно ниже), то уровень тепловых шумов будет определяться с достаточной степенью точности наименьшим из резисторов (R_o). С учетом вышесказанного

$$\delta R_x = 1,4 \sqrt{\delta R_o^2 + \delta U_o^2 + \delta U_x^2 + \left(\frac{U_{ш}}{U_o} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{U_{т.ш}}{U_o} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{U_{ш}}{U_x} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{U_{т.ш}}{U_x} \cdot 100\right)^2}$$

Собственные шумы нуль-индикатора составляют 20 мкВ от пика до пика при калибровке резисторов 10^{10} и 10^{11} Ом. Для 10^{12} Ом их уровень возрастает до 50 мкВ. Тепловые шумы резисторов определяются по известной формуле

$$U_{т.ш} = 2 \sqrt{KTR \Delta f}$$

Полоса пропускания нуль-индикатора Δf составляет на пределе измерения 100 мкВ – 0,05 Гц. Величины δU_o и δU_x определяются параметрами внешнего цифрового вольтметра (ЦЗИ) и на его пределах измерения 1 В и 0,1 В составляют 0,01%.

Таким образом, погрешности калибровок измерительных резисторов 10^{10} ... 10^{12} Ом составляют

$$\begin{aligned} 10^{10} \text{ Ом} &\pm 0,037\%, \\ 10^{11} \text{ Ом} &\pm 0,044\%, \\ 10^{12} \text{ Ом} &\pm 0,065\%. \end{aligned}$$

Для удобства работы допускается разбаланс моста при калибровке резисторов 10^{10} и 10^{11} Ом ± 20 мкВ, и ± 40 мкВ для 10^{12} Ом. Погрешность калибровки δR_x при этом ухудшается, но тем не менее даже для резистора 10^{12} Ом не превышает 0,08%.

При работе установки в режиме измерителя или источника токов (рис. 1, 2) добавляется погрешность, обусловленная

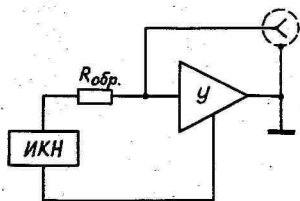


Рис. 1. Работа установки УТ-8304 в режиме источника тока.

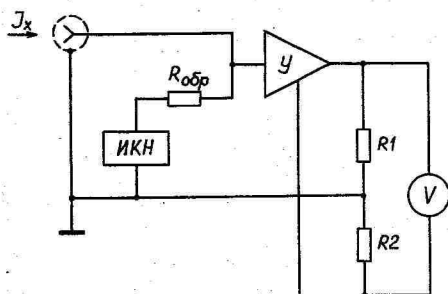


Рис. 2. Работа установки УТ-8304 в режиме измерителя тока.

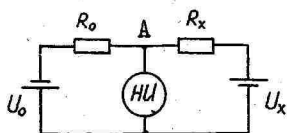


Рис. 3. Схема двух-плечного моста.

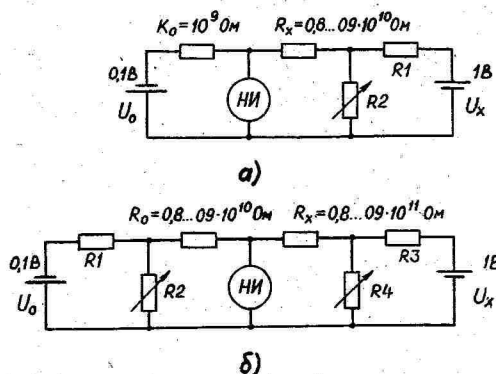


Рис. 4. К пояснению метода калибровки резисторов:
а) 10^{10} Ом;
б) 10^{11} Ом.

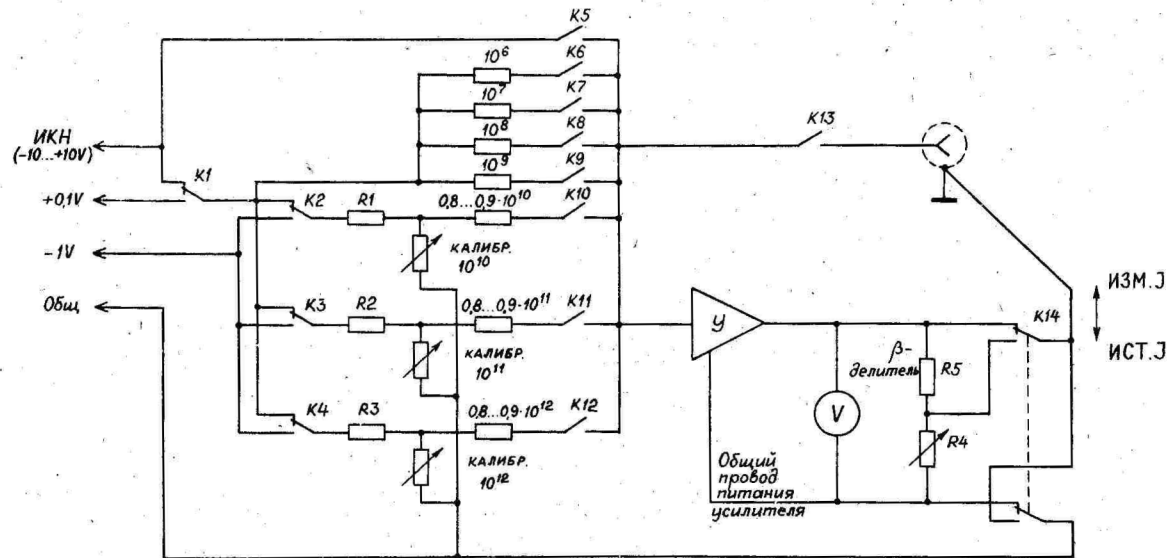


Рис. 5. Упрощенная схема установки УТ-3304.

точностью установки напряжения ИКН, шумами усилителя U и паразитным током изоляторов.

На рис. 5 приведена упрощенная схема устройства. С помощью реле К5 к выходу установки подключается ИКН. Реле К6...К12 коммутируют образцовые резисторы. Реле К1...К4 используют в режиме калибровки. С их помощью на образцовый и калибруемый резисторы подают напряжения $+0,1$ и -1 В. Реле К13 отключает выходной разъем от измерительной схемы, что позволяет производить установку нуля усилителя и калибровку измерительных резисторов, не отсоединяя поверяемый прибор от установки. Реле К14 соединяет с корпусом прибора либо выход усилителя (при работе в режиме источника тока), либо выход β -делителя (в остальных режимах).

Высокая надежность переключений всех измерительных резисторов обеспечивается применением реле с магнитоуправляемыми контактами. Кроме реле К9-К13 все остальные представляют собой серийные реле типа РЭС-55А. Их токи утечки практически не сказываются на точностных характеристиках установки. Однако реле К9-К13 должны обеспечивать суммарный паразитный ток между выходной клеммой установки и корпусом порядка 10^{-17} А. Поэтому они объединены в один узел, разработанный с учетом требований, предъявляемых к коммутационным устройствам высокочувствительных электрометрических устройств /9/.

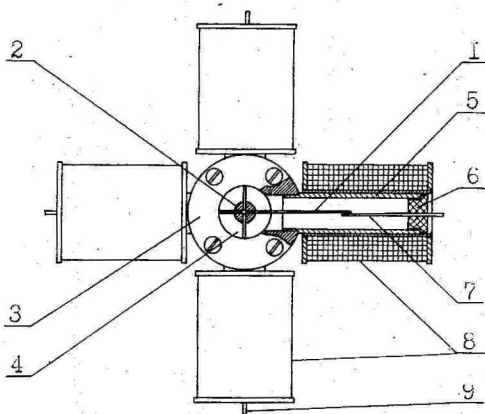


Рис. 6. Узел реле К9-К12 на магнитоуправляемых контактах.

На рис. 6 показано конструктивное расположение реле К9-К12, которые не отличаются друг от друга. Для построения этих реле использованы магнитоуправляемые контакты серийного геркона МК-27-ЗБ, освобожденные от стеклянных баллонов. Контакты I реле К9-К-12 с одной стороны припаяны радиально к центральному стержню 2. Последний закреплен коаксиально в экране 3 с помощью шайбы из лейкосапфира 4. Кроме того, к экрану 3 крестообразно приварены четыре трубочки 5, являющиеся держателями янтарных втулочек 6 с внешними контактами реле 7. На трубочки 5 надеты катушки реле 8. С выводами внешних контактов 9 соединяют резисторы 10^9-10^{12} Ом.

В качестве реле К13 применен геркон типа МКА-10501, который имеет паразитный ток порядка 10^{-17} А /9/. Геркон К13 закреплен между стержнем 2 и центральной клеммой выходного разъема. Изоляционным материалом данного разъема является также лейкосапфир. Таким образом, сопротивление утечки между реле К13 и корпусом установки определяется практически сопротивлением сапфировых шайб, составляющим 10^{15} Ом или выше.

Детали 2, 3, 5 и другие, непоказанные на рис. 6, изготовлены из нержавеющей стали Х18Н9Т, обладающей малым уровнем радиоактивной загрязненности. Для упрощения очистки от монтажа узла поверхности деталей отполированы до блеска. Выбором конструкции и малых размеров узла реле К9-К13 активные объемы воздуха /10/ сведены в сумме до 3-4 см³, при котором обеспечивается ионизационная составляющая паразитного тока ниже $3 \cdot 10^{-17}$ А.

Л и т е р а т у р а

1. Антонова Д.И. и др. Метрологическое обеспечение средств измерений малых постоянных токов. - Измерительная техника, 1982, № 10, с. 33-35.
2. Борзов В.М., Виллен Я.Я., Илюкович А.М., Сакс О.В. Калиброванные источники малых постоянных токов. - Измерительная техника, 1969, № 6, с. 33-37.
3. Борзов В.М., Илюкович А.М. Аппаратура для проверки электрометрических измерителей токов в диапазоне $10^{-8}-10^{-17}$ А. - В кн.: Методы и аппаратура для измерения сверхмалых сигналов постоянного тока в высокоомных цепях / Труды ВНИИЭТРИ. М., 1973. вып. 10(40) с.90-103.

5. Сакс О.В., Посметухова Г.В., Пярн М.М. Резистивный источник тока 10^{-8} - 10^{-14} А с электрометрическим усилителем. - В кн.: I междунар. семинар соц. стран "Научн. косм. приборостроение": Тез. докл. М., 1976, с. 130-132.
6. Илюкович А.М. Измерение больших сопротивлений. - М.: Энергия, 1971.
7. Теплинский А.М. Мосты для измерения высокоомных сопротивлений и малых постоянных токов. - Л.: Энергия, 1970.
8. Теплинский А.М. Двухплечный мост постоянного тока и возможности его применения для измерения больших сопротивлений. - В кн.: Тр. ВНИИМ. М.-Л., 1963, вып. 74 (134), с. II-18.
9. Сакс О.В., Шуличенко Е.И. О применимости магнитоуправляемых и игольчатых контактов в электрометрических устройствах. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1965, вып. 707, с. 140-148.
10. Сакс О.В. Собственные помехи преобразователя с динамическим конденсатором. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1977, вып. 443, с. 99-138.

ELECTROMETRICAL VERIFICATION APPARATUS UT-8304

O. Saks and V. Shor

S u m m a r y

The apparatus under discussion has been designed for the static verification of electrometrical measuring instruments. This apparatus is used as a current source and as a current calibrator in the range of 10^{-16} to 10^{-6} A, as a voltage source - 10^{-5} to 10.22 V. The calibration apparatus itself is based on using the standard resistor $10^9 \Omega$ of the accuracy class 0.02 and the digital voltmeter of the accuracy class 0.01. Before using the resistors 10^{10} , 10^{11} and $10^{12} \Omega$ they are calibrated and adjusted with a relative error, which is less than + 0.08 %. For their calibration the method of the two-arm bridge is used. In the role of the zero-indicator service an electrometrical amplifier is provided with a vibrating capacitor, whose detection sensitivity is 1 to 50 μ V. A specially construed input device guarantees a background current (noise) at a level of about $3 \cdot 10^{-17}$ A.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ДРЕЙФ И ПАРАЗИТНЫЙ ТОК ЭЛЕКТРОМЕТРА

Ю.А. Хяммалов

Во входных цепях электрометрических усилителей часто используются конденсаторы с газовым диэлектриком. Адсорбционное состояние поверхностей этих конденсаторов во многом определяет важные характеристики усилителей, а именно предельную чувствительность и дрейф нуля.

В данной работе исследовалось влияние нарушения установившегося состояния молекул газа на поверхностях входных элементов динамического электрометра на дрейф и паразитный ток. Была сделана попытка сопоставить полученные результаты с теоретическими представлениями, изложенными в работе /1/. С этой целью использовалась электрометрическая установка /2/ с вакуумируемым входным блоком. В данной установке вакуумируемыми являются динамический конденсатор и разделительный конденсатор. Нарушение адсорбционного состояния молекул газа на рабочих поверхностях этих конденсаторов производилось именно вакуумированием и выпуском воздуха во входное устройство.

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений при короткозамкнутом входе электрометра, т.е. в режиме измерения дрейфа. В таком случае наблюдаемый дрейф при вакуумировании и выпуске воздуха определяется лишь изменением работы выхода рабочих поверхностей динамического конденсатора.

Кривая I на рис. 1 отражает ход изменения работы выхода (контактной разности потенциалов) поверхностей динамического конденсатора при вакуумировании и последующем (через относительно короткое время) выпуске воздуха во входное устройство. Данная кривая является одной из реализаций изменения работы выхода, и хотя при повторении опыта получаются несколько иные численные значения, качественная сторона остается неизменной. Видно также, что десорбция молекул газа при вакуумировании и адсорбция при выпуске воздуха не симметричны относительно нулевого уровня. Кривая II на этом рисунке так-

же представляет собой ход изменения работы выхода поверхностей динамического конденсатора при вакуумировании и впуске воздуха во входное устройство, но с той разницей, что впуск воздуха производится через 12 часов после вакуумирования устройства. Наблюдая за участком спада кривой, соответствующим последующему вакуумированию устройства, можно сказать, что верны представления, заложенные в основу результатов работы /1/, а именно - энергия дрейфа при поверхностных явлениях, последующих какому-либо энергетическому воздействию на поверхность, черпается из кинетической энергии молекул газа, окружающих поверхность, и освобождение этой энергии является длительным процессом.

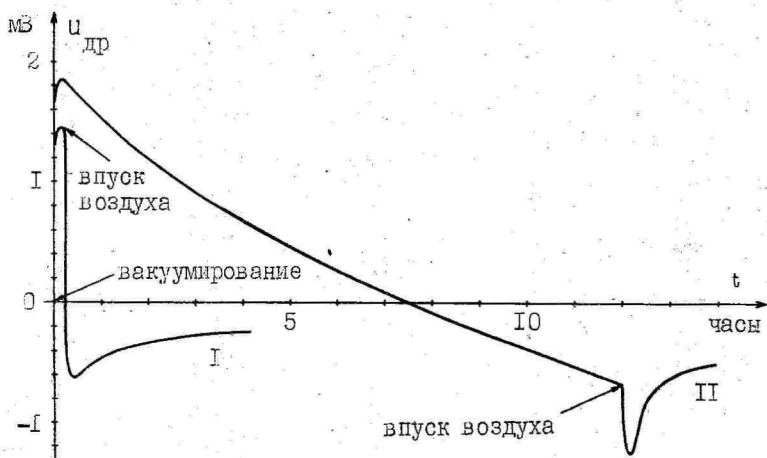


Рис. 1. Изменение нулевого уровня электрометра при короткозамкнутом входе при вакуумировании и впуске воздуха во входное устройство.

На рис. 2а представлены результаты трех измерений спадающего участка, соответствующего последующему вакуумированию устройства. Данные кривые измерений получаются при захвате адсорбционных мест на поверхности молекулами газа с энергиями, возрастающими во времени. Поэтому этот процесс является $1/f$ -процессом, и была сделана попытка искать в этих кривых закономерности $\sim \ln t$ согласно соотношению (4) работы /1/:

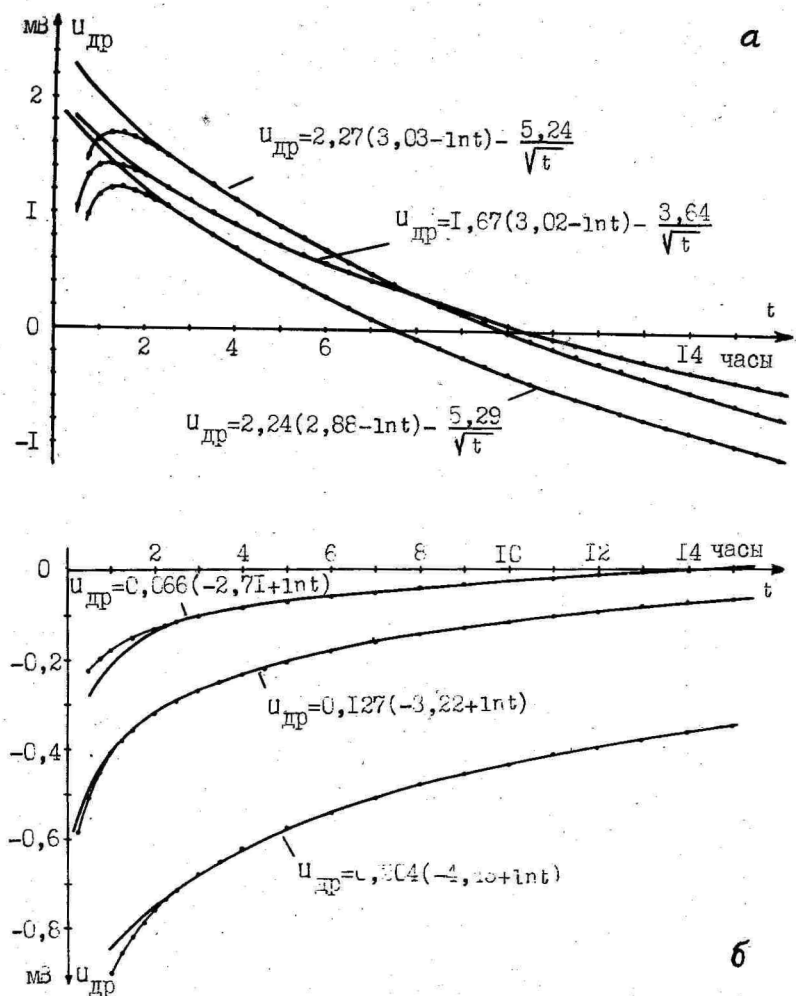


Рис. 2. Дрейф нуля электрометра при короткозамкнутом входе (сплошные линии), последующий: а) вакуумированию и б) выпуску воздуха во входное устройство. Точками обозначены значения приведенных аналитических выражений.

$$U_{др} = A(B - \ln t), \quad (1)$$

где A и B являются константами.

Действительно, такая закономерность обнаружена. На рис. 2а измеренным кривым сопоставлена закономерность (I) с соответствующими численными значениями констант А и В. Но кроме того обнаружено, что дрейф на этом участке кривых содержит еще член, который со временем изменяется согласно закону:

$$U_{гр.1} = \frac{C}{\sqrt{t}}, \quad (2)$$

где С - константа.

Причины возникновения такой компоненты дрейфа неясны, но можно с уверенностью сказать, что ее появление полностью связано с процессами на поверхности динамического конденсатора.

Одной из возможных причин, вызывающих компоненту дрейфа (2), может быть нестационарный процесс диффузии молекул газа, адсорбированных внутри электродов динамического конденсатора, в частности в золотом покрытии этих поверхностей. Известно, что при вакуумировании начинается процесс выделения газа из стенок вакуумируемого объекта, который описывается дифференциальным уравнением Фика /3/ и имеет упрощенное решение в виде:

$$q = \frac{d_0}{\sqrt{t}}, \quad (3)$$

где q - поток молекул газа через единичную площадь в единицу времени;

d_0 - начальная концентрация газа в стенках вакуумируемого объема.

При таком механизме молекулы газа выделяются из глубины электродов динамического конденсатора на их поверхность, где они занимают положение адсорбированных состояний.

На рис. 2б представлены кривые, отображающие дрейф после впуска воздуха во входное устройство. По сравнению с дрейфом, последующим вакуумированию, дрейф в данном случае намного ниже и хорошо согласуется с логарифмическим законом (I). Существенное отличие от кривых рис. 2а заключается в том, что здесь компонента дрейфа $\sim 1/\sqrt{t}$ не обнаружена.

Аналогичные опыты были проведены и при разомкнутом входе электрометра или т.н. режиме измерения тока (рис. 3 и 4). При резком вакуумировании (рис. 3) происходит необратимый скачок показания электрометра в отрицательную сторону, и при повторных проведениях опыта этот скачок находится в пределах

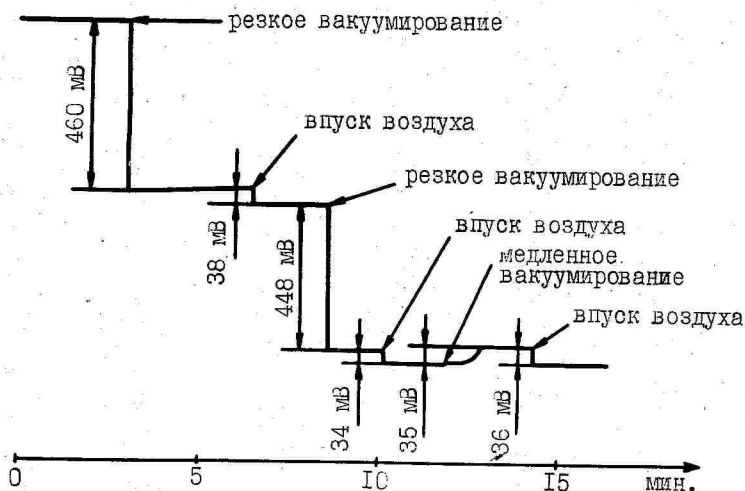


Рис. 3. Изменение показания электрометра при открытом входе (режим измерения тока) при вакуумировании и впуске воздуха во входное устройство, последующих друг другу через короткие промежутки времени.

400–600 мВ. При резком впуске воздуха во входное устройство также наблюдается скачок напряжения в отрицательную сторону, но теперь этот скачок на порядок величины ниже, чем при вакуумировании и находится в пределах 30–65 мВ. При медленном же вакуумировании происходит сдвиг показания электрометра в положительную сторону. Судя по характеру дрейфа, последующего вакуумированию, сдвиг в положительную сторону при медленном вакуумировании соответствует нарушению адсорбционного состояния молекул газа на поверхностях конденсатора связи. Причины возникновения большого отрицательного скачка при резком вакуумировании входного устройства неясны. С одной стороны, это может быть связано с тем, что при резком вакуумировании весь воздух, заключенный в объеме динамического конденсатора, проходит через конденсатор связи, и обнаруженный скачок напряжения может быть вызван рекомбинацией ионов на поверхностях конденсатора связи. При медленном вакуумировании не весь воздух проходит через конденсатор связи; значительная часть его может пройти через узкие щели между кор-

пусом и деталями крепления динамического конденсатора и конденсатора связи. Следовательно, положительный сдвиг при медленном вакуумировании является разницей между положительным сдвигом от адсорбционных процессов и отрицательным сдвигом от рекомбинации ионов. По-видимому, отрицательный скачок при выпуске воздуха также вызван адсорбционным и ионным явлениями, но в этом случае они складываются. То, что теперь происходящий скачок по величине не может быть полностью вызван адсорбционными явлениями, показывает, например, кривая на рис. 4б.

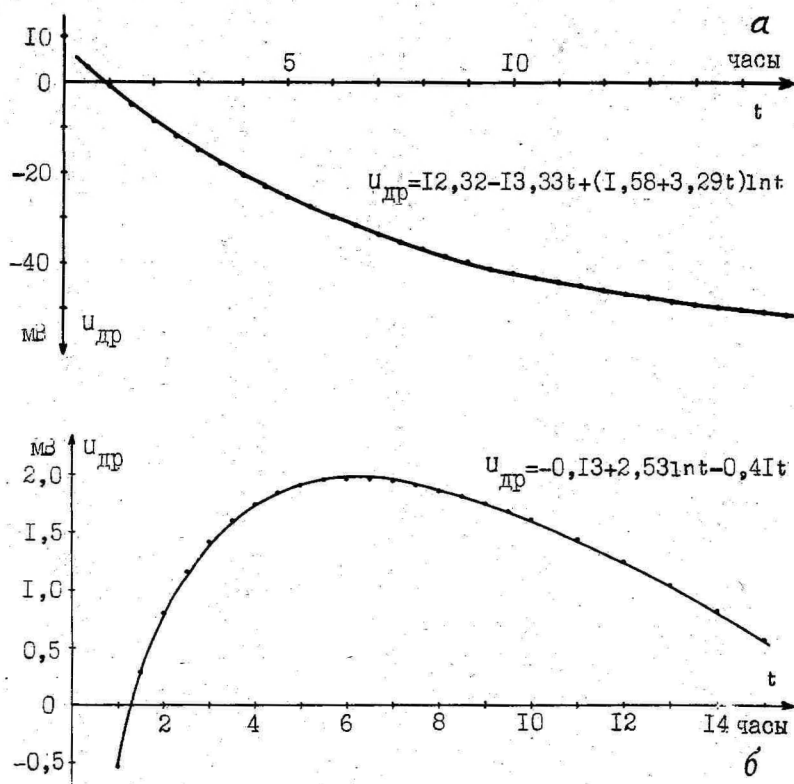


Рис. 4. Дрейф при открытом входе электрометра (сплошная линия), последующий: а) вакуумированию и б) выпуску воздуха во входное устройство. Точками обозначены значения приведенных аналитических выражений.

При отыскании закономерности переходного процесса, следующего вакуумированию устройства (рис. 4а), вначале исходили из предположения, что напряжение дрейфа в данном случае складывается из адсорбционной компоненты и компоненты, линейно изменяющейся во времени. Вторая компонента является, таким образом, компонентой паразитного тока. Аналитическое выражение к кривым на рис. 4а искали в виде:

$$U_{gp} = A(B - \ln t) - Ct, \quad (4)$$

где A , B и C являются константами.

Оказалось, что такое выражение слишком сильно расходится с измеренной кривой. Поэтому было сделано предположение о том, что процесс адсорбций-десорбций молекул газа модулирует собственный паразитный ток электрометра, т.е. компонента в (4) модулируется. Исследователям $1/f$ -флуктуаций в твердом теле хорошо известно, что $1/f$ -процесс обладает модулирующими свойствами (например, обзор /4/). Поэтому в данной работе вместо выражения (4) предполагалось следующее:

$$U_{gp} = U_{gp,0} + A(B - \ln t) - (ct + C_0)(D - \ln t),$$

которое можно привести к виду:

$$U_{gp} = \alpha + \beta t + (\gamma + \delta t) \ln t, \quad (5)$$

где C_0 , D , α , β , γ и δ являются константами.

Действительно, получается очень хорошее согласие между кривой на рис. 4а и выражением (5), приведенным на рис. 4а, численными значениями констант α , β , γ и δ . Важным моментом здесь является то, что паразитный ток, зарегистрированный заранее при нормальных условиях и имеющий в единицах напряжения величину $\approx 0,36 t$ (час) (мВ), после вакуумирования не остается постоянным, а намного увеличивается и со временем медленно убывает по закону $\sim \ln t$. Можно сказать, что это явление полностью связано с процессами в газовой среде и на поверхности обкладок динамического конденсатора и конденсатора связи. Следовательно, рекомбинация ионов на поверхностях названных конденсаторов зависит от состояния слоя адсорбированных там молекул газа или, другими словами,

эффективность рекомбинации ионов на поверхности зависит от энергии связи молекул газа, адсорбированных с поверхности.

Относительно компоненты дрейфа, пропорциональной $1/\sqrt{f}$, можно сказать, что, по-видимому, ее роль в процессах образования кривой рис. 4а настолько мала, что она не обнаруживается.

На рис. 4б представлена кривая дрейфа, последующего впуску воздуха во входное устройство при разомкнутом входе электрометра. В данном случае довольно хорошо прослеживается закономерность по выражению (4), т.е. отсутствует модулирующее действие адсорбций-десорбций молекул газа на поверхности. Отыскание закона изменения дрейфа в данном случае затруднено из-за возникновения больших скачков, вызванных α -частицами, которые при представлении кривой на рис. 4б элиминированы.

В заключение отметим, что теоретические представления, выдвинутые в работе /1/, в проведенных опытах получили определенное экспериментальное подтверждение. Но вместе с тем возникают новые проблемы: появление компоненты дрейфа $1/\sqrt{f}$, большие скачки напряжения при разомкнутом входе электрометра (рис. 3), модулированный паразитный ток.

Л и т е р а т у р а

1. Хяммалов Ю.А. Влияние поверхностных явлений на дрейф и паразитный ток электрометра. - В кн.: Теоретические проблемы электротриии: Тез. докл. Всесоюз. и.-т. семинара. Тарту, 1985, с. 46-49.
2. Разработка и исследование вакуумированного входного устройства динамического электрометра. - Депонированный отчет № В 515485. Тарту, 1976. - 37 с.
3. Левин Г. Основы вакуумной техники. - М.: Энергия, 1969. - 272 с.
4. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: $1/f$ noise. - Revs. Mod. Phys., 1951, Vol. 53, N 3, p. 497-516.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE PHENOMENA
ON THE ZERO DRIFT AND ON THE BACKGROUND CURRENT
OF AN ELECTROMETER

J. Hämmalov

S u m m a r y

Air-spaced capacitors have often been used in input circuits of electrometric amplifiers. The adsorbed state of gas molecules on the surfaces of these capacitors exercises a substantial influence on the parameters of amplifiers, such as the limiting level of sensitivity and the zero drift.

This paper presents the measuring results of the zero drift and of the background current drift which follow the evacuation and the airing of an input device of the dynamic electrometer. The elements evacuated thereby are the dynamic and the coupling capacitors. Evacuation and airing call forth a disturbance of the established balance between the adsorbed and the desorbed gas molecules on the surfaces of these capacitors. These processes result in abrupt changes in the zero level and in the background current level which are followed by their slow drift.

An analysis of the results measured has been carried out on the basis of a theoretical treatment presented elsewhere [1]. On that account the drift of the zero level and the background current level after evacuation or airing is to be subject to the law of $\ln t$, where t signifies time. Good agreement has been established between the measured drift values and the $\ln t$ law.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ $1/f$ - ФЛУКТУАЦИЙ

Ю.А. Хяммалов

Хотя автокорреляционная функция и спектральная плотность являются равноценными характеристиками случайных процессов, в практике исследования $1/f$ -флуктуаций в большинстве случаев используется спектральная плотность. С одной стороны, это естественно, т.к. этот вид флуктуаций получил свое название именно от $1/f$ -закономерности изменения спектральной плотности от частоты. С другой стороны, автокорреляционная (далее корреляционная) функция $1/f$ -флуктуаций недостаточно изучена как теоретически, так и экспериментально.

В теоретическом плане интерес представляет выведение аналитического выражения для коррекционной функции из концепции т.н. широкого набора времен жизни Ван дер Зила-Дю Пре /1, 2/. Типичный алгоритм этой концепции, хорошо прослеживающейся, например, в работе /3/ (соотношения (7), (8) и (13)), приводит к выражению спектральной плотности в виде:

$$S(f) = A \int_{\tau_1}^{\tau_2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-s/\tau} \cos 2\pi f s \, ds, \quad (1)$$

- где A - постоянная величина;
 τ - время жизни системы в данном состоянии; в работе /3/ τ характеризует времена жизни молекул в адсорбированном состоянии на поверхности, и характеризуют соответственно состояния с наименьшим и наибольшим временем жизни;
 s - какой-то интервал времени;
 f - частота.

На основе теоремы Винера-Хинчина можно отметить, что интеграл

$$R(s) = A \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{\tau} e^{-s/\tau} \, d\tau \quad (2)$$

в выражении (1) представляет собой корреляционную функцию $1/f$ -флуктуаций. Так как (2) является интегральной функцией, то обычными методами интегрирования аналитически он не решается. Поэтому решением интегралов в (1) вначале по s , а затем по τ быстро достигается цель, где конкретный вид корреляционной функции не существен.

Интеграл в виде (2) представляет интерес еще и по той причине, что к такому же интегралу мы пришли в работе /4/ при изучении вопросов дрейфа, но лишь с той разницей, что там вместо интервала времени s имело место текущее время t .

С другой стороны, согласно теореме Винера-Хинчина, корреляционная функция $1/f$ -флуктуаций выражается следующим образом:

$$Q(s) = A \int_0^{\infty} \frac{\cos 2\pi f s}{f} df. \quad (3)$$

Если концепция Ван дер Зила-Дю Пре справедлива, то корреляционные функции по (2) и (3) должны привести к единому результату, т.е. $R(s) \equiv Q(s)$.

Известно, что интегралы в (2) и (3) представляют собой интегральные функции и выражаются следующими рядами /5/:

$$Ei(\tau) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{\tau} e^{-s/\tau} d\tau = \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n s^n}{\tau^n n \cdot n!}, \quad (4)$$

$$Ci(f) = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\cos 2\pi f s}{f} df = -\ln \frac{f_2}{f_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (f_2 \cdot s)^{2n}}{2n \cdot (2n)!}, \quad (5)$$

при условии $\tau_1 \ll \tau_2$ и $f_1 \ll f_2$, что является естественным условием для $1/f$ -флуктуаций.

Из (4) и (5) видно, что эти ряды внешне отличаются друг от друга. Чтобы найти решения для (4) и (5) в аналитической форме и проверить тождество $R(s) \equiv Q(s)$, нужно вычислить эти ряды при разных значениях величин s/τ_1 и $f_2 \cdot s$. Такой расчет был проделан с использованием соответствующих таблиц справочника /6/ (с. 627-630). Оказывается, что суммирование в (4) и (5) приводит к следующему аналитическому результату при условии

$$Ei_{\Sigma} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n s^n}{\tau_1^n n \cdot n!} = -\ln \frac{s}{\tau_1} - C, \quad (6)$$

$$Ci_{\Sigma} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (f_2 \cdot s)^{2n}}{2n \cdot (2n)!} = -\ln f_2 \cdot s - C, \quad (7)$$

где $C \approx 0,577$ - постоянная Эйлера-Маскерони.

На рис. I приведены зависимости $Ei_{\Sigma} + \ln s/\tau_1$ от s/τ_1 и $Ci_{\Sigma} + \ln f_2 \cdot s$ от $f_2 \cdot s$ для значений s/τ_1 и $f_2 \cdot s$ до 25. Видно, что величина $Ci_{\Sigma} + \ln f_2 \cdot s$ устанавливается на уровне своего значения, равного $-0,577$, с осцилляциями, убывающими по мере возрастания произведения $f_2 \cdot s$. Следовательно, тождество $R(s) \equiv Q(s)$ действительно имеет место, а в спектральных характеристиках $1/f$ -процессов частотам можно сопоставить времена жизни в разных состояниях согласно концепции Ван дер Зила-Дю Пре.

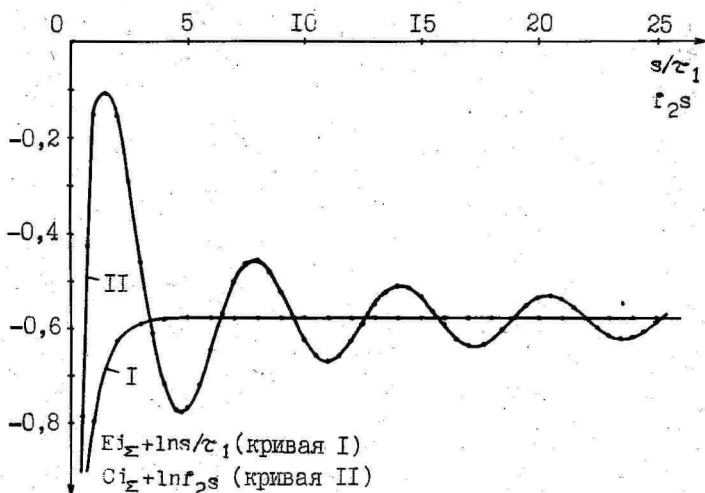


Рис. I. Зависимость функций $Ei_{\Sigma} + \ln s/\tau_1$ и $Ci_{\Sigma} + \ln f_2 \cdot s$ соответственно от значений s/τ_1 и $f_2 \cdot s$.

Подставляя (6) и (4) в выражение (2), а также (7) и (5) в (3), приходим к конечному результату для корреляционной функции.

$$R(s) = A(\ln \tau_2 - \ln s - C), \quad (8)$$

$$Q(s) = A(-\ln f_1 - \ln s - C). \quad (9)$$

В связи с полученным результатом необходимо отметить следующее: корреляционная функция содержит член, пропорциональный $\ln s$, что известно и ранее из некоторых теоретических моделей (как, например, модель на основе RC-цепочки, рассмотренная Кешнером /7/, и модель на основе суммирования единичных импульсов, представленная в работе /8/), но полное аналитическое выражение корреляционной функции отличается от полученного результата выражения (8) и (9). В данном рассмотрении выражение корреляционной функции было получено непосредственно на основе спектральной плотности $1/f$ -процесса (соотношение (9)) и на основе широко распространенной концепции Ван дер Зила-Дю Пре (соотношение (8)).

Нужно отметить также важность результата, полученного в докладе /4/, для выражения дрейфа. Исходный вид интеграла, выражающего дрейф, совпал там с интегралом (2) с текущим временем t вместо s . Для дрейфа было получено выражение, совпадающее с (8), где вместо s присутствовало t . Таким образом была установлена однозначная связь между $1/f$ -флуктуациями и дрейфом в энергетическом аспекте. Подозрение о существовании такой связи возникало и ранее, в частности этот вопрос обсуждался в докладе Малахова А.Н. с сотр. /9/.

Корреляционная функция, вычисленная из интеграла (2), должна при подстановке в выражение (I) привести к спектральной плотности в виде $1/f$. Подставляя корреляционную функцию (8) в (2), получаем

$$S(f) = A \int_0^{\tau_2/C_0} (\ln \tau_2 - \ln s - C) \cos 2\pi f s \, ds, \quad (10)$$

где $\ln C_0 = C$.

Решение интеграла $\int_0^s \ln s \cdot \cos 2\pi f s \, ds$ имеет вид /5/:

$$\int_0^s \ln s \cdot \cos 2\pi f s \, ds = -\frac{1}{2\pi f} \left[Si(fs) - \ln s \cdot \sin 2\pi f s \right] - \frac{1}{4f}, \quad (11)$$

где $Si(fs)$ - интегральный синус.

Можно показать, что интегральный синус $Si(fs)$ в (II) сходится к значению $\pi/2$, также осциллируя, как и кривая II на рис. I. Поэтому на основании (II) можно показать, что решением выражения (10) является $S(f) = A/f$. К этому же результату приходим при определении спектральной плотности на основе корреляционной функции (9).

Следовательно, корреляционная функция в виде (8) и (9)

является такой же специфической характеристикой $1/f$ -процесса, как и сама спектральная плотность в виде $S(f) = A/f$

В связи с изучением корреляционной функции $1/f$ -процессов вопрос о соотношении спектральной плотности и корреляционной функции можно рассматривать также со следующей точки зрения. Известно, что флуктуационные процессы с постоянной спектральной плотностью в бесконечно широком интервале частот имеют корреляционную функцию в виде дельта-функции. Примером являются тепловые флуктуации. Принято говорить, что флуктуации с подобной корреляционной функцией в каждый момент времени не имеют памяти о предшествующих состояниях флуктуационного процесса.

Согласно теореме Винера-Хинчина можно утверждать и обратное: флуктуационные процессы с постоянной корреляционной функцией в бесконечно длинном интервале времени имеют спектральную плотность в виде дельта-функции. Это означает, что подобные процессы имеют бесконечно длительную память о предшествующих данному моменту событиях. Спектральная плотность, т.е. мощность, сосредоточена на нулевой частоте, следовательно, такая система полностью сохраняет свою структуру в бесконечно длительном интервале времени. Безусловно, такое рассмотрение вопроса представляет собой две крайности, которые в природе вряд ли где-нибудь реализуются (рис. 2).

В случае $1/f$ -флуктуационных процессов спектральная плотность, как известно, изменяется пропорционально $1/f$. Из рис. 2 видно, что при $f \rightarrow \infty$ $S(f) = S_0 = \text{const}$, а при $f \rightarrow 0$ $S(f) \rightarrow \infty$. Здесь S_0 представляет собой спектральную плотность тепловых флуктуаций в данной системе. Можно отметить, что в предельных случаях $1/f$ -процесс стремится к рассмотренным выше значениям спектральной плотности, т.е. при $S(f) \rightarrow S_0$ к постоянной и при $S(f) \rightarrow \infty$ - к плотности, описываемой дельта-функцией. Между этими предельными значениями спектральная плотность меняется по закону $1/f$. При рассмотрении корреляционной функции выше было подчеркнуто, что всем частотам $1/f$ -процесса можно сопоставить времена жизни состояний в какой-либо системе. Принимая развитую в работе /10/ эволюционную модель возникновения $1/f$ -флуктуаций, отметим, что эволюция в случайных системах происходит через состояния с разными временами жизни. Такому эволюционному процессу соответствует именно область спектральной плотности между двумя предельными случаями.

Причину изменения спектральной плотности в случайно эво-

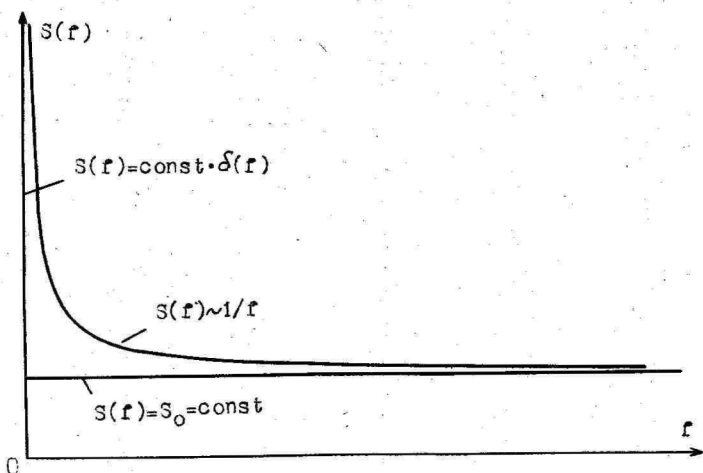


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности от частоты, поясняющая рассуждения, приведенные в тексте.

люционирующих системах в зависимости от частоты именно по $1/f$ закону можно связать с безмасштабностью $1/f$ -процессов. Вопрос безмасштабности $1/f$ -флуктуационных процессов многократно обсуждался, например, в /II/ и в данном случае заключается в том, что эволюционные процессы в разных системах могут произойти совсем в разных масштабах времени.

Л и т е р а т у р а

1. Van der Ziel A. On the noise spectra of semiconductor noise and flicker effect. - Physica, 1950, Vol. 16, N 4, p. 359-372.
2. Du Pre F.K. A suggestion regarding the spectral density of flicker noise. - Phys. Rev., 1950, Vol. 78, N 5, p. 615.
3. Хяммадов Ю.А. О фликкер-шумах адсорбционных процессов на поверхности. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1984, вып. 669, с. 85-93.
4. Хяммадов Ю.А. Влияние поверхностных явлений на дрейф и паразитный ток электрометра. - В кн.: Теоретические проблемы электротриии: Тез. докл. Всесоюз. н.-т. сем. Тарту, 1985, с. 46-49.

5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. - М.: Наука, 1979.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1970. - 720 с.
7. Keshner M.S. $1/f$ Noise. - Proc. IEEE, 1982, Vol. 70, N 3, p. 212-218.
8. Паленскис В.П., Лаучюс Ю.А., Миколайтис Г.С. Моделирование и статистические свойства фликкерных шумов. - Литовский физ. сб., 1984, т. 24, № 2, с. 32-41.
9. Малахов А.Н., Якимов А.В., Кривский М.А. Связь фликкерных флуктуаций с деградацией систем. - В кн.: Флуктуационные явления в физических системах: Материалы III Всесоюз. конф. Вильнюс, 1983, с. 35-38.
10. Хяммалов Ю.А. Об эволюционном механизме возникновения $1/f$ -флуктуаций. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 123-131.
11. Machlup S. Earthquakes, thunderstorms and other $1/f$ noises. - Proc. 6th Int. Conf. on Noise in Physical Systems. Gaithersburg (USA). Dep. Commer Nat. Bur. Stand., Spec. Publ., 1981, N 614, p. 157-160.

DETERMINATION OF THE AUTOCORRELATION
FUNCTION OF $1/f$ -FLUCTUATIONS

J. Hämmalov

S u m m a r y

An analytical expression of the autocorrelation function of $1/f$ -fluctuations has been derived. The derivation has been carried out on the basis of both the expression of the spectral density function of $1/f$ -fluctuations and the so-called Van der Ziel-Du Pre conception of a wide range of the lifetime. It has been shown that the results coincide in both cases. A discussion of the results has been carried out on the basis of the spectral method.

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ КОРОННОГО АЭРОИОНИЗАТОРА ПО КРИТЕРИЮ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Р.Э. Прийман, Х.Ф. Таммет

Введение

Известным побочным эффектом коронных аэроионизаторов является генерирование оксидантов - в основном озона и оксидов азота. Это лимитирует допустимую мощность аэроионизатора. Контроль загрязнения воздуха имеет особое значение в случае аэроионификации помещений, в которых присутствуют люди. Количественные закономерности образования оксидантов при аэроионификации не были изучены. В настоящей работе авторы стараются заполнить пробел и предложить пользователю и разработчику системы аэроионификации способ расчетной оценки загрязнения воздуха оксидантами.

Предполагается, что в случае аэроионификации помещений в качестве коронирующих электродов используются горизонтально натянутые антенны из тонкой проволоки, что предложено и описано в работах /1-4/.

Сложная конфигурация реальных помещений и нестабильность распределения аэрозолей не позволяют осуществить на практике точный расчет режима аэроионизации. Поэтому мы будем ограничиваться оценками первого приближения.

Обозначения и единицы измерения

Расчет аэроионизации непосредственно в единицах СИ весьма неудобен. Для облегчения практического пользования все формулы будут приведены не в универсальном виде, а относительно конкретных практических единиц измерения. Все используемые обозначения и единицы измерения определены ниже в табл. I.

Таблица I

Обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения в формулах	Для перевода в СИ умножить значение на
a	расстояние антенны от потолка	м	I
b	высота антенны над нижней плоскостью	м	I
d	расстояние рассматриваемой точки от антенны	м	I
l	длина антенны	м	I
V	объем помещения	м ³	I
U ₀	начальное напряжение коронирования антенны	кВ	1000
U	напряжение антенны	кВ	1000
I	сила тока антенны	мкА	10 ⁻⁶
τ	время релаксации оксидантов в помещении	с	I
n	концентрация аэроионов	см ⁻³	10 ⁶
c	концентрация оксиданта	мкг/м ³	10 ⁻⁹
K	удельная продукция оксиданта	мкг/мкАл	10 ⁻³

Расположение одиночной антенны в помещении объясняет рис. I.

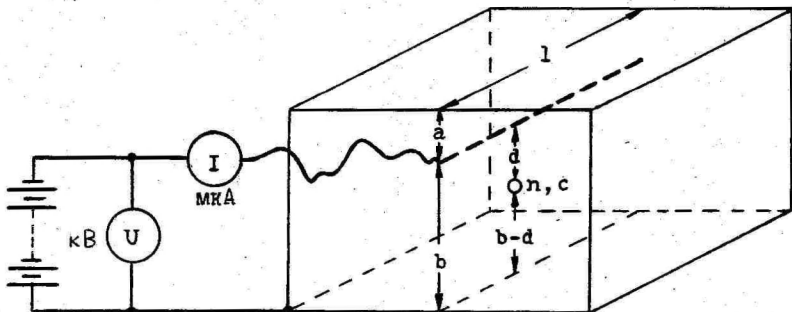


рис. I. Расположение антенны в помещении.

В пустом помещении нижней плоскостью служит пол. Если в помещении, например, в аудитории тесно расположены столы, то нижней плоскостью служит плоскость столов.

Электрический режим

Возникновение аэроионов начинается, когда напряжение антенны превышает порог коронирования U_0 . Для проволоки диаметром 0,1 мм $U_0 \approx 8$ кВ, для проволоки диаметром 0,2 мм $U_0 \approx 11,5$ кВ. Порог коронирования на остриях может быть снижен до 1 кВ.

Если воздух не содержит аэрозольных частиц, то теория коронного разряда /5, 6/ дает для антенны, расположенной согласно рис. 1, следующую оценку:

$$I = \frac{\ell(U-U_0)^2}{400} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right). \quad (1)$$

Наличие аэрозолей уменьшает силу тока антенны, однако в практике аэроионизации это уменьшение обычно не превышает десяти процентов.

Электрическое поле в помещении определяется в основном не зарядом антенны, а объемным зарядом аэроионов. Электрическое поле под антенной мало зависит от высоты, средняя напряженность равна $(U-U_0)/b$. Скорость дрейфа легких аэроионов в этом поле близка к одному метру в секунду.

Концентрация всех аэроионов, как легких, так и тяжелых, рассчитанная по количеству элементарных зарядов в кубическом сантиметре, оценивается по формуле

$$n \approx 5500 \frac{U-U_0}{bd}. \quad (2)$$

Коронный разряд непосредственно создает только легкие аэроионы. Тяжелые аэроионы образуются в результате прилипания легких аэроионов к аэрозольным частицам. Концентрация тяжелых аэроионов зависит от наличия аэрозольных частиц, и в аэроионизированном помещении обычно она колеблется от нескольких тысяч до ста тысяч.

Униполярный объемный заряд аэроионов рассеивает тяжелые аэроионы и тем самым очищает воздух, что называется эффектом электрофилтра. Частицы осаждаются на ограждениях помещения, преимущественно на потолке над антенной. Одновременно растет эффективность осаждения частиц в легких человека, од-

нако в существенно меньшей мере по сравнению с ростом эффективности осаждения на стенках помещения. Эффект электрофильтра сильнее всего проявляется при условии, что антенны установлены над всей площадью помещения.

Примеры. По данным работы /3/ при $b = 3$ м, $d = 2$ м и $U - U_0 = 25$ кВ была достигнута концентрация легких аэроионов 180000 см^{-3} . Формула (2) дает суммарную концентрацию 275000 см^{-3} . Антенна была установлена над всей площадью помещения. Концентрация тяжелых аэроионов после включения антенны быстро возросла до 100000 см^{-3} , однако после 30–40 минут упала до 10000 см^{-3} . По данным другой работы /4, табл. 12/ при $b = 2,1$ м, $d = 1,7$ м и $U - U_0 = 28$ кВ под антенной суммарная концентрация была около 600000 см^{-3} , формула (2) дает 430000 см^{-3} . Антенна была установлена над небольшой частью площади помещения. Концентрация тяжелых аэроионов (разность замеров при предельных подвижностях $0,001$ и $0,01 \text{ см}^2/(\text{В с})$) составляла вначале 50000 см^{-3} и через 15 минут — 20000 см^{-3} .

Химический режим

Интенсивность образования оксидантов при коронном разряде была изучена с помощью установки, схема которой приведена на рис. 2.

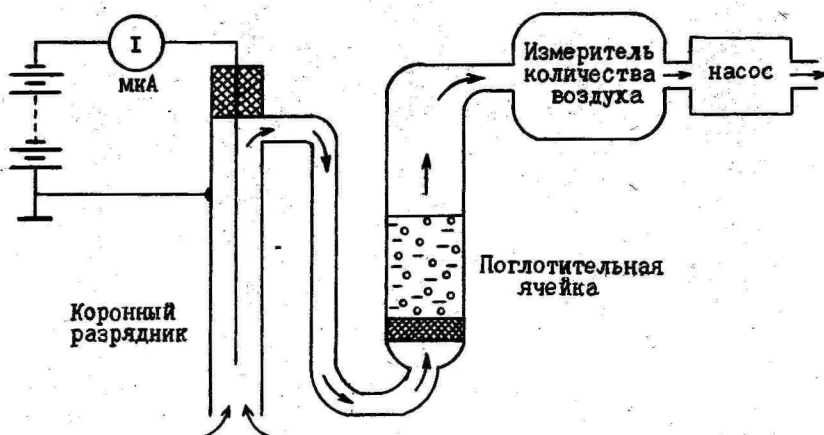


Рис. 2. Схема эксперимента.

Эксперименты были проведены при короне с тонкой проволоки или острия и при силе тока от 1 до 10 мкА. Озон абсорбирован в нейтральном буферном растворе 1%-го йодида калия, окислы азота - в нейтральном растворе 8%-го йодида калия. В качестве поглотительных ячеек служили для озона - абсорбер с пористым стеклянным фильтром, для окислов азота - поглотительный прибор Зайцева. Озон был определен йодометрически титрованием 0,001 н раствором тиосульфата натрия непосредственно после процесса абсорбции /7/, окислы азота (NO_2) - колориметрически с реактивом Грисса /8/.

В первом приближении количество образовавшихся оксидантов оказалось пропорциональным заряду, пропущенному через разрядник. Зависимости от конфигурации электродов, полярности и силы тока разряда выразились относительно слабо.

Из результатов эксперимента можно вывести следующие оценки максимальной удельной продукции оксидантов:

- озон - до 0,015 мкг/мкКл,
- окислы азота - до 0,0015 мкг/мкКл.

Оксиданты удаляются из помещения в результате химических реакций и вентиляции. Интенсивность этого процесса описывается временем релаксации, которое равно отношению количества оксидантов к скорости уменьшения этого количества при условии полного прекращения образования оксидантов. Время релаксации зависит от многих факторов и составляет минуты или десятки минут. Например, в лаборатории площадью около 40 м² без принудительной вентиляции было зарегистрировано время релаксации озона около десяти минут /10/.

При условии постоянной генерации оксидантов концентрация приближается к равновесному значению:

$$C = K\tau I/V. \quad (3)$$

Например, для помещения площадью 50 м², высотой 3 м и времени релаксации 1000 с при $I = 100$ мкА получим $C = 10$ мкг/м³.

Предельно допустимая аэроионизация

Санитарные нормы задают предельно допустимые концентрации озона и окислов азота в воздухе. ПДК озона в рабочих зонах - 100 мкг/м³ и в воздухе населенных пунктов - 30 мкг/м³ /9/. ПДК окислов азота выше. Поскольку аэроионизаторы генерируют озон примерно в 10 раз больше окислов азота, то кри-

тическим оказывается концентрация озона. Норма 30 мкг/м³ довольно высокая, при этом озон уже ощущается по запаху. Рекомендуется рассчитывать системы аэроионизации на более низкие концентрации озона.

В случае заданной ПДК (c_0) можно вычислить предельно допустимую силу тока

$$I_0 = c_0 V / (K\tau). \quad (4)$$

Например, при $c_0 = 15$ мкг/м³, $K = 0,015$ мкг/мкКл и $\tau = 1000$ с допускается сила тока не более 1 мкА на м³ объема помещения.

Максимальная сила тока ограничивает допустимое напряжение антенн, а это в свою очередь концентрацию аэроионов. При условии, что в помещении устанавливается по одной антенне на полосу шириной, равной b , получим оценку предельно допустимой концентрации аэроионов

$$n_0 \approx 10^6 \frac{a}{d} \sqrt{\frac{c_0 b (a+b)}{K\tau(a^2+b^2)}}. \quad (5)$$

Конкретный пример представлен на рис. 3.

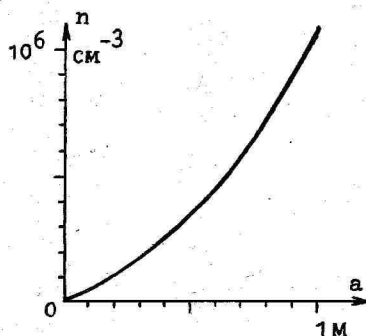


Рис. 3. Предельно допустимая концентрация аэроионов по генерированию озона на высоте 1 м в помещении высотой 3 м при $c_0 = 15$ мкг/м³, $K = 0,015$ мкг/мкКл и $\tau = 1000$ с в зависимости от расстояния между антенной и потолком.

Если провести расчеты для известных систем аэроионизации, содержащих коронирующие антенны, то выясняется, что ПДК озона, а тем более окислов азота, в этих системах не превышает. Как правило, оставлен большой запас, что позволяет повысить мощность аэроионизации, если это необходимо, например, для усиления эффекта пылеосаждения.

Осуществление усиленной униполярной аэроионизации в помещениях, в которых присутствуют люди, допустимо только при условии установления и соблюдения санитарно-гигиенических ограничений на концентрацию аэроионов.

Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. К вопросу создания аэроионизаторов и ионетров для широкого внедрения аэроионотерапии. - В кн.: Аэроионизация и гидроаэроионизация в медицине. Ташкент, 1962, с. 250-256.
2. Таммет Х.Ф., Сальм Я.И. Ионизирование воздуха больших помещений посредством проволочных антенн, питаемых аппаратом для франклинизации. - В кн.: Аэроионизация в гигиене труда. Л., 1966, с. 237-240.
3. Таммет Х.Ф., Сальм Я.И. Об использовании проволочных антенн для аэроионизации. - Уч. зап. Тарт.ун-та, 1979, вып. 479, с. 19-25.
4. Лангус Л.Э., Рейнет Я.Ю. Об ионизации воздуха в закрытых помещениях при помощи коронных ионизаторов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1979, вып. 479, с. 38-55.
5. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. Алма-Ата, 1984. - 208 с.
6. Таммет Х.Ф. Действующая ширина идеального проволочного нейтрализатора статического электричества. - Уч.зап. Тарт. ун-та, 1969, вып. 239, с. 47-52.
7. Кривописин И.П. Озон в промышленном птицеводстве. - М.: Россельхозиздат, 1979. - 95 с.
8. Унифицированные методы определения атмосферных загрязнений / Под ред. Сидоренко Т.И. и Дмитриева М.Т. М., 1976. - 263 с.

9. Беспамятнов Г.П., Кротов Ю.А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л., 1985. - 528 с.
10. Приyman P.Э. Применимость озонного индекса для оценки загрязнения воздуха. - См. наст. сб., с.175-183.

ASSESSMENT OF THE PERMISSIBLE POWER OF THE CORONA IONIZER
ACCORDING TO THE CRITERION OF THE CHEMICAL POLLUTION
OF THE AIR

R. Priiman and H. Tammet

S u m m a r y

The generation of ozone and nitrogen oxides restricts the permissible power of the corona ionizer. The present paper quantitatively describes the intensity of the generation of these substances and its relationship with the concentration of air ions. The article treats the ionization of the air of an enclosed room generated by means of the high-voltage antenna (Fig. 1). The intensity of the current consumed can be assessed by means of formula (1) and the concentration of air ions can be assessed by formula (2). These formulas do not agree with the basic units of measurement of the SI system but are in agreement with the practical units of measurement mentioned in the penultimate column of Table 1. The generation of ozone and of nitrogen oxides was measured with the device described in Figure 2. It appeared that the charge of $1 \mu\text{C}$ produces only up to $0.015 \mu\text{g}$ of ozone and up to $0.005 \mu\text{g}$ of nitrogen oxides; the notation of the corresponding equivalent is K. The power of the air ionizer is limited by ozone. If the relaxation time of the decomposition of ozone in the enclosed space is τ , formula (4) can be used to compute the maximum permissible intensity of the current. The restriction of the current intensity also limits the concentration of air ions according to formula (5). The permissible air ion concentrations proceeding from the limiting concentrations of ozone are high and significantly exceed the standards of air ionization recommended by medical scientists.

ПРИМЕНИМОСТЬ ОЗОННОГО ИНДЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Р.Э. Прийман

Введение

Воздух в помещениях загрязнен многими десятками химических веществ, раздельное определение которых методами аналитической химии или же физико-химическими инструментальными методами либо весьма трудоемкий процесс, либо требует дорогостоящей и дефицитной аппаратуры.

В практике в большинстве случаев нет необходимости определять количественно все загрязняющие воздух ингредиенты, а лишь те, концентрация которых в данных условиях может оказаться близкой к ПДК, или те, наличие которых в этой воздушной среде необходимо специально установить.

Кроме того, для экспрессной оценки гигиенического состояния воздуха часто находят различные суммарные показатели, характеризующие какое-либо суммарное действие, свойство или фрагмент сходного химического строения загрязнителей по определенным группам или всех вместе.

Таковыми суммарными показателями, характеризующими загрязненность воздушной среды, являются содержания общего и органического углерода, фотооксидантов, окисляемость воздуха, плотность заряда тяжелых аэроионов, озонный индекс и др.

Физико-химическое объяснение к озонному индексу

Применение озонного индекса в качестве характеристики чистоты воздуха (чем меньше этот индекс, тем чище воздух) разработано и предложено лабораторией физико-химических и радиологических методов исследования Института общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Сысина АМН СССР /1/.

Известно высокое окислительное действие озона. (По этому действию озон уступает лишь фтору и его окислам и свободным радикалам.) Озон окисляет подавляющее большинство органических и неорганических соединений, образуя их высшие окисные формы: озониды, перекиси, окислы, гидроперекиси и пр. Разло-

жение озона в воздухе происходит тем быстрее, чем больше загрязнен воздух. Точный механизм распада озона довольно сложен, он зависит от химического состава примесей в воздухе и от внешних условий. Имея в виду, что большинство реакций окисления с озоном протекает по бимолекулярному механизму, скорость распада озона в воздухе является произведением концентрации озона, оставшегося после его прореагирования, и суммы произведений концентраций каждого из загрязнителей и константы скорости их реакций с озоном. Отдельное определение концентрации каждого загрязнителя затруднено; неизвестны также константы скоростей многих загрязнителей с озоном. Поэтому сделано упрощение, и скорость распада озона (что экспериментально легко определить) выражена в пересчете на одно вещество, почти всегда присутствующее в воздухе как его микропримесь-загрязнитель и условно как бы суммирующее действие всех имеющихся в воздухе загрязнителей. Этим веществом выбран гексен-1; его константа скорости реакции с озоном измерена с большой точностью и составляет $119 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{мг} \cdot \text{мин}$.

Имея эти данные и экспериментально измеренную концентрацию оставшегося озона (т.е. после определенного времени его прореагирования с загрязнителями воздуха) и скорость разложения озона, можно найти концентрацию всех прореагировавших с озоном загрязнителей по уравнению

$$F = 84 \cdot \frac{S}{[O_3]}, \quad (I)$$

где F - концентрация всех загрязнителей, реагирующих с озоном в пересчете на гексен-1, $\text{мг}/\text{м}^3$; S - скорость распада озона в воздухе, $\text{мкг}/\text{м}^3 \cdot \text{мин}$; $[O_3]$ - концентрация оставшегося в воздухе озона после определенного времени его прореагирования с загрязнителями, $\text{мкг}/\text{м}^3$.

Опосредовано озонный индекс отражает суммарную концентрацию в исследуемом воздухе всех загрязнителей, реагирующих с озоном.

Экспериментальные измерения

Настоящие эксперименты были проведены с целью выявления ограничений, которые надо учитывать, если применять для оценки загрязненности воздуха озонный индекс.

Эксперименты проводили в закрытой практически пустой стеклянной аэрозольной камере с металлическим оцинкованным

полом объемом 25 м^3 и в лабораторном помещении, густо обставленном лабораторной мебелью, письменными столами, полками и приборами объемом 130 м^3 . Для получения озона в аэрозольной камере использовали коронный озонатор, разработанный в ТГУ, и фотохимический источник получения озона (УФ лампа типа ДРЛ). В лабораторном помещении использовали фотохимический источник получения озона (УФ лампа типа ДРТ). Концентрацию озона измеряли йодометрически с последующим спектрофотометрическим определением выделившегося йода в пересчете на озон на спектрометре типа Hitachi /2/. Для уменьшения побочных влияний в качестве абсорбента применяли 1 %-ный нейтральный буферный раствор йодистого калия.

Отбор проб озона начали после 10 минут работы озонатора на расстоянии 1 м от них практически на одном уровне с озонатором. Длительность отбора проб составляла 10 мин. Параллельно во время отбора проб на озон при помощи фотоэлектрического счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 измеряли численные концентрации аэрозольных частиц и при помощи счетчика аэроионов типа САИ-ТГУ - полярные плотности заряда легких и тяжелых аэроионов. По истечении 10 минут эти же измерения повторяли вторично. По полученным данным и уравнению (I) находили озонный индекс для различных по химическому составу воздушных сред в аэрозольной камере и в лабораторном помещении. В последнем дополнительно определяли скорость разложения озона.

Результаты экспериментальных измерений в различных условиях воздушной среды в аэрозольной камере приведены в таблице I.

Аэрозольную камеру проветривали 15 мин при открытых дверях камеры через открытое окно напротив дверей. Полярную плотность заряда легких и тяжелых аэроионов измеряли соответственно при предельных подвижностях $0,1$ и $0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Озонатор включали непосредственно после выключения фактора, воздействующего на воздух в камере. Исходная концентрация озона после выключения озонатора была порядка 100 мкг/м^3 .

В лабораторном помещении, тесно обставленном мебелью и оборудованием, озонный индекс измеряли аналогичным образом, но при различных исходных концентрациях, созданных озонатором озона. Данные этих измерений, а также уменьшение концентрации озона во времени, показаны в табл. 2 и табл. 3.

Одновременно с измерением озонного индекса измеряли полярную плотность заряда легких и тяжелых аэроионов. Различ-

Таблица I

Средние показатели суммарных физико-химических параметров оценки состояния воздуха в аэрозольной камере

Состояние среды	Озонный индекс, мг/м ³	Концентрация частиц $\geq 0,5$ мкм, частиц/л	Средняя полярная плотность заряда аэроионов эл.зар./см ³	
			легкие	тяжелые
Проветренный воздух	5,1	18000	190	2900
Непроветренный воздух	17,7	34000	150	3000
Проветренный воздух; 7 стульев	14,3	21500	190	2300
Непроветренный, 2 ч УФ облученный воздух (2 бактерицидных облучателя по 30 Вт)	9,0	2700	350	4300
Непроветренный воздух; 35 цыплят	59	175000	50	3300
Проветренный воздух; 35 цыплят	19,4	72000	280	3000
Проветренный, 2 ч УФ облученный воздух (2 эритерных облучателя по 30 Вт); 35 цыплят	44,7	58500	300	3600
Проветренный, 2 ч УФ облученный воздух (2 бактерицидных облучателя по 30 Вт); 35 цыплят	31	35000	370	4400
Выкурено 2 сигареты	Невозможно определить	224000	10	12500
Непроветренный воздух, электроаэрозоль дист. воды, 10 мин	3,4	14500	830	2500
Непроветренный воздух, аэрозоль дист. воды, 10 мин	7,0	20000	310	2700

Таблица 2

Озонный индекс в лабораторном помещении при различных исходных концентрациях озона

Состояние среды	Озонный индекс, мг/м ³ при исходных концентрациях озона, мкг/м ³			
	100	230	370	440
Проветренный воздух	10,2	8,4	6,9	4,3
Непроветренный воздух	22,0	16,2	12,0	9,5

Таблица 3

Снижение концентрации озона через определенные интервалы времени

Интервалы времени, мин	Концентрация озона, мкг/м ³			
А Воздух в проветренном лабораторном помещении				
0	100	230	370	440
10	60	140	180	210
20	20	70	90	110
30	ниже 10	20	30	50
40	"-"	ниже 10	10	20
Б Воздух в непроветренном лабораторном помещении				
0	110	200	340	390
10	40	80	100	140
20	ниже 10	30	40	60
30		10	10	10

ные концентрации озона, созданные с помощью озонных источников, в исследованных пределах его концентрации не оказывали существенного влияния на уровень ионизации воздуха, и поэтому эти величины отдельно в таблице не отражены. Средние полярные плотности заряда (эл.зар./см³) легких и тяжелых аэроионов были соответственно при проветренном воздухе 340 и 2000, а при непроветренном воздухе 120 и 2300. Фоновая концентрация озона в непроветренном лабораторном помещении была

ниже 10 мкг/м^3 , а в проветренном — 37 мкг/м^3 . Точность определения озона составляла 10 мкг/м^3 .

Обсуждение результатов

Обобщенные результаты, приведенные в табл. I-3, позволяют дать прямую оценку применимости озонного индекса.

1. Озонный индекс по данным табл. I-2 варьирует в значимых пределах в зависимости не только от загрязнения воздуха, но и от исходной, искусственно создаваемой концентрации озона и обставленности помещения. Например, в проветренной, обставленной стульями камере озонный индекс на $9,2 \text{ мкг/м}^3$ больше, чем в пустой. Это связано с адсорбированием реакционно-способных молекул озона на различных поверхностях и, следовательно, с уменьшением его концентрации в воздухе, за счет чего озонный индекс повышается.

При меньших исходных концентрациях озона озонный индекс заметно выше, чем при больших (см. табл. 2). Это может быть обусловлено несколькими причинами: зависимостью скоростей реакции озона с примесями и адсорбции от исходных концентраций озона, относительно большей погрешностью химического определения озона при его малых концентрациях, погрешностью, связанной с фотохимическим получением озона и пр. Каждая из этих причин нуждается в самостоятельном количественном исследовании.

2. При высокой аэрозольной загрязненности воздуха озонный индекс в несколько раз повышается, как за счет адсорбции озона на частицах аэрозоля, так и за счет химических реакций озона с аэрозольными частицами, нередко приводящими к увеличению аэрозольной загрязненности воздуха. В воздухе, загрязненном табачным дымом, озон в относительно малых (до ПДК в рабочей зоне) концентрациях не успевает накапливаться в количестве, достаточном для определения озонного индекса по классической методике определения озона (см. табл. I). Это свидетельствует о чрезмерно высоком озонном индексе в прокуренных помещениях.

3. Ультрафиолетовое облучение воздуха уменьшает озонный индекс тем больше, чем более оно коротковолновое. Например, двухчасовое бактерицидное облучение уменьшает озонный индекс почти в два раза. В то же время несколько увеличивается аэрозольная загрязненность воздуха и почти в два раза увеличиваются плотности заряда легких, а также тяжелых аэроионов.

4. Определяемые параметры состояния воздуха в камере в присутствии цыплат, приближенные из-за постоянного передвижения цыплат. Однако в практике при измерениях бывают именно такие условия. Видно, что не полностью оправдано измерение в этих условиях концентрации аэрозольных частиц, изменчивость которых чрезмерно высока.

5. Подача в воздух пустой камеры электрически заряженного или незаряженного распыла уменьшает озонный индекс в несколько раз. Этого и следовало ожидать, так как большинство загрязнителей адсорбируется в циркулирующей струе аэрозоля воды при инжектировании воздуха через воздухоочиститель-распылитель; при заряженном распыле этот процесс протекает интенсивнее. (Адсорбции озона на распыле практически не происходит, так как при работе озонатора распылитель-воздухоочиститель выключен.)

6. Скорость снижения концентрации озона зависит от наличия примесей в воздухе, а также от исходной концентрации озона (см. табл. 2). Так как в воздухе могут содержаться различные по химическому составу и характеру действия примеси, то в данной работе нет смысла проводить какие-либо математические закономерности разложения озона. Укажем, что по данным наших экспериментов в пределах ПДК для рабочей зоны озон разлагается до уровня фоновой концентрации (ок. 10 мкг-м^3) практически за 20-30 мин.

На основе проведенных экспериментов можно заключить, что если суммарное загрязнение воздуха придется оценивать по озонному индексу, то надо учитывать следующее:

1. Необходимо определить т.н. фоновый озонный индекс помещения, который учитывал бы потери концентрации озона за счет его адсорбции и его реакций на различных объектах в помещении.

2. В качестве озонатора нельзя использовать фотохимический источник озона, дающий искажение озонного индекса за счет остаточного окисления озоном окиси азота (образовавшегося вместе с озоном) в двуокись.

3. Для конкретного случая (до отсутствия соответствующих исследований) необходимо определить озонный индекс по крайней мере при трех исходных концентрациях озона с определением фонового озонного индекса для каждой концентрации отдельно.

4. Классический химический метод определения озона из-за своей длительности отбора пробы малопригоден. При применении этой методики можно получить лишь сравнительные результаты. Озонный индекс следует определять каким-либо из оперативных автоматических методов.

Автор выражает благодарность Э.Э. Пярнасте за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Дмитриев М.Т. Перспективные изыскания в области разработки прецизионных физико-химических и радиологических методов определения токсических веществ в окружающей среде. - В кн.: Физико-химические методы исследования окружающей среды. М.: Изд-во Мин. здравоохран. СССР, АМН СССР, 1980, с. 1-23.
2. Попов В.А., Печенников Е.В. Определение озона и перекисных соединений. - В кн.: Методы определения газообразных загрязнений в атмосфере. М.: Наука, 1979, с. 39-61.
3. Белов М.Н., Виснапуу Л.Ю., Прийман Р.Э. Аэрозольное устройство для очистки воздуха. - В кн.: Методы и приборы контроля параметров биосферы. Л.: Ленингр. ин-т авиац. приборостроения, 1984, с. 78-81.

ON THE POSSIBILITY OF USING THE OZONE INDEX

R. Priiman

S u m m a r y

This paper presents a physicochemical interpretation of the ozone index. This index is treated as a summary indicator of air pollution, which is basically equivalent to the sum total of the concentration of substances found in the air and chemically reacting with ozone, conditionally converted into hexene-1. The ozone index is found by means of formula (1), where F is prearranged to the concentration of the hexene-1, mg/m^3 . S is the rate of decomposition of ozone introduced into the system to be measured, $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ and $[\text{O}_3]$ is the concentration of ozone in the air, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the moment of measuring its index.

A number of experiments have been conducted under different environmental conditions where in addition to the measurement of the ozone index as well as the concentration of aerosol particles and the charge density of air ions have been measured.

The experiments carried out allow us to infer that the ozone index can be used for the estimation of the pollution of the air only under certain conditions, taking into account a number of restrictions. The index under discussion is a rather labile quantity and depends not only on the amount of the trace admixtures but also on the factors characterizing the environment in which the ozone index is measured, on the methods of the determination of ozone, on the type of the source of ozone, on the initial concentration of the ozone etc. To avoid major errors, it is also necessary to determine the ozone index of the background.

К ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ОТ ЕЕ СОСТОЯНИЯ

Л.Ю. Виснапу

Распыление воды находит широкое применение при различных технологических процессах, в частности при очистке и кондиционировании воздуха. Поскольку распыление жидкостей сопровождается образованием электрических зарядов в воздухе, влияющих как на технологию, так и на чувство комфорта присутствующих, то данные о полярности и плотности этих зарядов представляют особый интерес. Актуальным является изучение различных механизмов зарядки капель воды /1, 2/. Электрические заряды капель влияют на взаимодействие их друг с другом и с окружающей средой, обеспечивают их упорядоченное движение в электрическом поле, более равномерное и интенсивное осаждение на поверхности близлежащих тел.

В настоящей работе изучали заряды, появляющиеся в воздухе при пневматическом распылении воды, обработанной различными способами. Целью исследования было оценить зависимости полярных объемных плотностей заряда распыленной воды от ее исходных физико-химических свойств.

В качестве обработанной воды в экспериментах использовали дистиллированную, снеговую, анодную и катодную воду. Дистиллированная вода была получена с помощью электрического дистиллятора, снеговая вода – растоплением снега, а анодная и катодная вода – посредством диафрагменного электролизера. Последний представляет собой устройство, состоящее из цилиндрического стеклянного сосуда, коаксиальных трубчатых титанового катода, анода из нержавеющей стали, диафрагмы из плотной ткани, крышки из оргстекла и выпрямителя сетевого напряжения. Катод, диафрагма с закрытым дном и анод имеют диаметры соответственно 150, 110 и 40 мм и осесимметрично прикреплены к крышке. Эта система электродов опущена в сосуд, имеющий такой диаметр, что катод прилегает к его внутренней стенке. Высота электродов и сосуда 200 мм. Катод и анод электрически соединены с выходными клеммами выпрямителя 220 В. Крышка имеет отверстия в зоны катода и анода.

Обработке подвергали водопроводную воду, которую наливали в зоны катода и анода по 1,5 л. Ток силой 5 А пропускали через воду в течение 5 мин. Уровень электрохимической обработки воды оценивали водородным показателем pH. Катодная вода, полученная в зоне катода, имела pH 10, а анодная вода, полученная в зоне анода, имела pH 4.

Плотности заряда распыленной воды измеряли в боксе 4БП-0С с внутренним объемом 0,5 м³ счетчиком аэроионов УТ-8401 при объемной скорости аспирации, равной 450 см³/с. Исследуемую воду распыливали при помощи пневматического генератора аэрозолей /3/, изготовленного из оргстекла. Генератор аэрозолей располагался в средней части бокса, а счетчик аэроионов - в стороне от него так, что расстояние между осями распылительной камеры генератора и измерительного конденсатора счетчика составляло 0,3 м, причем выходное отверстие распылительной камеры было на 0,1 м ниже входного отверстия измерительного конденсатора. Генератор аэрозолей питали сжатым воздухом с избыточным давлением 150 кПа. При этом массовый расход воздуха - 70 мг/с, воды - 4,5 мг/с, массовый медианный диаметр капель, измеренный автоматическим фотоэлектрическим анализатором аэрозольных частиц, при выходе из распылительной камеры генератора - 1,3 мкм, геометрическое стандартное отклонение - 2,6. Полярную объемную плотность заряда распыленной воды измеряли в стационарном состоянии образующегося аэрозоля при двух предельных подвижностях счетчика: 10⁻¹ и 10⁻³ см²/(В·с). Перед каждой серией измерений заряда аэрозоля воды определенной обработки бокс проветривали до установления фонового состояния. При этом температура и относительная влажность воздуха составляли 18°С и 50%. Усредненные значения измеренных плотностей заряда сведены в таблицу. Отклонения результатов отдельных измерений от усредненных значений - в пределах ±10%.

Данные, приведенные в таблице, получены без дополнительных потоков воздуха в боксе. Если же генератор аэрозолей обдувать воздухом, например, от вентилятора, то значения Р при $\kappa_0 = 10^{-1}$ см²/(В·с) (сокращенно Р(10⁻¹)) выше, а Р(10⁻³) ниже, чем в таблице.

Как видно из таблицы, распыление любой воды повышает Р в воздухе в десятки и сотни раз относительно фоновых значений. Обработанная вода дает при распылении в несколько раз большие значения Р, чем обычная водопроводная вода. Р(10⁻¹) достигает порядка 10⁴ э.з./см³ и Р(10⁻³) 10⁵ э.з./см³. При этом

Таблица

Полярные объемные плотности заряда P распыленной воды различной обработки при разных предельных подвижностях k_0

Дисперсная фаза	$k_0 = 10^{-1} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$k_0 = 10^{-3} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	
	$P_{-, \text{э.з.}}/\text{см}^3$	$P_{+, \text{э.з.}}/\text{см}^3$	$P_{-, \text{э.з.}}/\text{см}^3$	$P_{+, \text{э.з.}}/\text{см}^3$
Фоновый воздух	20	100	2000	4000
Водопроводная вода	2000	4000	100000	180000
Дистиллированная вода	10000	10000	100000	80000
Снеговая вода	30000	30000	160000	140000
Анодная вода	8000	9000	250000	260000
Катодная вода	4000	5000	200000	250000

наибольшее значение $P(10^{-1})$ имеет место при снеговой воде, а наибольшее значение $P(10^{-3})$ - при анодной и катодной водах. $P_+(10^{-1})/P_-(10^{-1}) > 1$ и $P_+(10^{-3})/P_-(10^{-3}) > 1$ наряду с водопроводной водой наблюдается у анодной и катодной вод. Отклонения в этом отношении - у дистиллированной и снеговой вод. К тому же $P_+(10^{-3})/P_-(10^{-1})$ для водопроводной, анодной и катодной вод составляет 30 ... 50, а для дистиллированной и снеговой вод - всего лишь 5 ... 10. Показанные различия в плотностях заряда распыленных вод обусловлены различными их физико-химическими свойствами, наличием в них разных примесей. Обработка воды вызывает заметное увеличение плотности заряда в ее распыле.

При условиях проведенных экспериментов отношения $P_+(10^{-1})/P_-(10^{-1}) > 1$ и $P_+(10^{-3})/P_-(10^{-1}) > 30$ указывают на наличие в воде примесей в большей концентрации, чем в дистиллированной или снеговой воде.

Рассмотренные зависимости получены при ограниченных условиях эксперимента. Они требуют уточнения при более общих условиях, в частности, при загрязнении распыленной чистой воды в воздухе.

Л и т е р а т у р а

1. Саранчук В.И., Рекун В.В., Поздняков Г.А. Электрические поля в потоке аэрозолей. - Киев: Наукова думка, 1981.
2. Контущ С.М. Контактно-баллоэлектрический механизм разделения зарядов при столкновении капель воды.-Письма в Журнал технической физики. Изд. Наука, 1983, с. 513-516.
3. Виснапуу Л.Ю. Пневматический генератор аэрозолей. Авт. св. СССР № 915858.-Бюл. изобр., 1982, № 12, с. 8.

ABOUT THE DEPENDENCE OF THE ELECTRIFICATION OF DISPERSED WATER ON ITS INITIAL STATE

L. Visnapuu

S u m m a r y

The polar charge densities (P_{\pm}^{\pm}) of small and large water ions (charged aerosol particles of water) were measured in a special pneumatically closed chamber. The generated water ions were the products of variously treated and then atomized water (see the Table). Each water sample contained different amounts of impurities.

The analysis of the results of measurements allows us to conclude the following:

1. The aerosol of treated water yields several times more P_{\pm}^{\pm} than the usual water of a waterpipe.
2. For the aerosol of water treated with impurities (tap water, anodic and cathodic water) $P_{+} / P_{-} (10^{-1}) > 1$ and $P_{\pm}^{\pm} (10^{-3}) / P_{\pm}^{\pm} (10^{-1}) > 30$, where the numbers in the brackets are the limiting mobilities of $\text{cm}^2 / (\text{V}\cdot\text{s})$.
3. For the aerosol of the water treated with small amounts of impurities (snow water, distilled water) the above formulas are not valid.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ

М.Н. Белов, Л.Ю. Виснапуу

В данной работе описан усовершенствованный генератор электроаэрозолей, предназначенный для дезинфекции животноводческих помещений, и приведены основные результаты его испытания в полупроизводственных условиях.

Пневматический распылитель с индуцирующим электродом является основным элементом генератора электроаэрозолей, определяющим его технические характеристики и надежность работы.

В ходе испытаний генератора электроаэрозолей, описанного в /1/, было замечено, что при его длительной работе в распылителях возможно намокание внутренней изоляции индуцирующего электрода и прекращение из-за этого процесса электризации. Кроме того, регулировка соосности индуцирующего электрода и жидкостного сопла распылителя в производственных условиях оказалась сравнительно трудоемкой.

С учетом сказанного была разработана новая конструкция распылителя. В усовершенствованном распылителе, изображенном в разрезе на рис. 1, снижен расход сжатого воздуха, повышена надежность изоляции индуцирующего электрода и устранена регулировка его соосности. Расход сжатого воздуха в новом распылителе по сравнению с расходом в предыдущих вариантах распылителей /2/ снижен за счет отказа от обдува индуцирующего электрода 4 кольцевым потоком сжатого воздуха. Для предотвращения электрического замыкания индуцирующего электрода по наружной поверхности изолятора 3 на последнем смонтирована кольцевая насадка 2, образующая с ним два кольцевых канала, соосных между собой осевыми каналами.

При работе генератора вентилятор создает воздушный поток, направленный вдоль оси распылителя. Часть потока попадает в кольцевой канал насадки 2 и по осевым каналам направляется к выходной ее части - во второй кольцевой канал. Двойной кольцевой обдув наружной поверхности изолятора 3 эффективно способствует повышению надежности изоляции индуцирующего электрода 4. Надежность изоляции индуцирующего

электрода 4 повышена также за счет применения жидкостного сопла 5 с фланцем трубки II подачи жидкости из диэлектрических материалов.

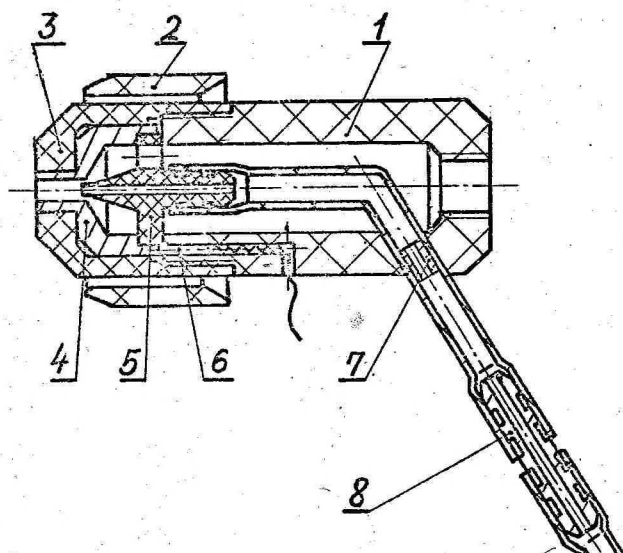


Рис. 1. Усовершенствованный распылитель: I - корпус; 2 - кольцевая насадка; 3 - изолятор индуцирующего электрода; 4 - индуцирующий электрод; 5 - жидкостное сопло с фланцем; 6 - штифт; 7 - распорная втулка; 8 - соединительный штуцер; 9 - пружина; 10 - провод питания; II - трубка подачи жидкости.

Устранение регулировки соосности и снижение трудоемкости при обслуживании обеспечены следующими конструктивными решениями. Соосность индуцирующего электрода 4 и жидкостного сопла 5 с фланцем обеспечивается уже при их изготовлении. При сборке распылителя жидкостное сопло 5 с фланцем вкладывается в кольцевую проточку индуцирующего электрода 4 и затем фиксируется изолятором 3 электрода, навинчиваемым на корпус I распылителя. В случае разборки распылителя, связанной с его очисткой, индуцирующий электрод 4 легко отъединя-

ется от провода 10 электропитания, поскольку в отличие от прежних конструкций распылителей электрический контакт между ними осуществляется за счет подпружиненного штифта 6, электрически связанного через пружину 9 с проводом 10 питания.

Основные технические характеристики распылителя следующие:

- диаметры жидкостного сопла, внутренний и наружный, мм	- 2,0 и 2,5,
- диаметр выходного сопла индуцирующего электрода, мм	- 4,0
- избыточное давление сжатого воздуха, МПа	- 0,2,
- расход сжатого воздуха, г/с	- 4,
- расход распыливаемой жидкости, г/с	- 2 ... 5,
- индуцирующее напряжение, кВ	- 1,
- ток конвекции, мкА	- до 4,
- массовый медианный диаметр первоначальных капель, мкм	- 25 ... 60.

Генератор электроаэрозолей такой же конструкции, как генератор, представленный в работе /1/. Он снабжен шестью распылителями, описанными выше. Полупроизводственные испытания генератора электроаэрозолей были проведены в Тартуском районном объединении Этсельхозтехники, в помещении размерами 18x8x6 м. Источником сжатого воздуха служила стационарная компрессорная установка.

Технические характеристики генератора электроаэрозолей, включающего шесть распылителей, следующие:

- максимальная производительность распыливаемой жидкости, г/с	- 30,
- ток конвекции (на расстоянии 3 м от генератора), мкА	- 20,
- расход сжатого воздуха (при избыточном давлении 0,2 МПа), г/с	- 24,
- объемный расход воздуха вентилятора, м ³ /с	- 2,0
- дальнобойность струи распыла, м	- 15,
- масса генератора, кг	- 120.

Целью испытаний генератора было выявление общих закономерностей осаждения распыленной жидкости и электрических зарядов на разные участки пола и стен помещения при разных режимах работы генератора.

Методика испытаний. При испытаниях генератор электроаэрозолей был соориентирован по продольной оси помещения и находился на расстоянии 4 м от тыльной стены. При всех измерениях положение генератора в помещении не менялось.

Расход распыливаемой жидкости определяли протарированным ротаметром, установленным непосредственно на генераторе. Измерения проводили при трех расходах жидкости - 10; 20; 28 г/с.

Счетную концентрацию аэрозольных частиц измеряли счетчиком АЗ-5 на диапазонах 2; 4; 10 мкм после 10 мин работы генератора электроаэрозолей. Измерения проводили на оси струи на расстоянии 8 м от генератора.

Ток конвекции частиц аэрозоля, осаждающихся на выносном зонде, измеряли в струе аэрозоля на высоте 2,0 м, а также у поверхности стен и пола на расстоянии 0,1 м. Зонд представляет собой металлический диск площадью 1 дм², заземленный через вольтметр универсальный В7-21, работающий в режиме микроамперметра.

Плотность осаждения аэрозольных частиц на стены и пол помещения оценивали определением массы каустической соды, осевшей на чашках Петри при 10-минутном распылении 7 %-ного водного раствора каустической соды. Масса соды на чашках была определена титрометрическим методом нейтрализации соляной кислотой в присутствии индикатора метилового оранжевого. Применение этого метода было предложено к.х.н. Р.Э. Прийман.

Результаты испытаний генератора электроаэрозолей получены при следующих начальных условиях: температура и относительная влажность воздуха - 18°C и 90%, атмосферное давление - 770 мм рт.ст. По окончании опытов в зависимости от режима работы генератора температура воздуха снижалась на 1-3°C, а относительная влажность повышалась до 100%.

Измерения счетной концентрации аэрозольных частиц счетчиком АЗ-5 проводили непосредственно после 10 мин работы генератора. Результаты измерений представлены на рис. 2. Характер кривых показывает, что в целях получения наибольшей концентрации частиц в объеме дезинфекционной обработки желательно поддерживать расход распыляемой жидкости около 20 г/с. При этом замечено, что в режиме электрической зарядки (1 кВ) в области меньших частиц (2 мкм) концентрация больше, а в области больших частиц (10 мкм) концентрация меньше, чем в режиме без зарядки жидкости. Это говорит о более высокой

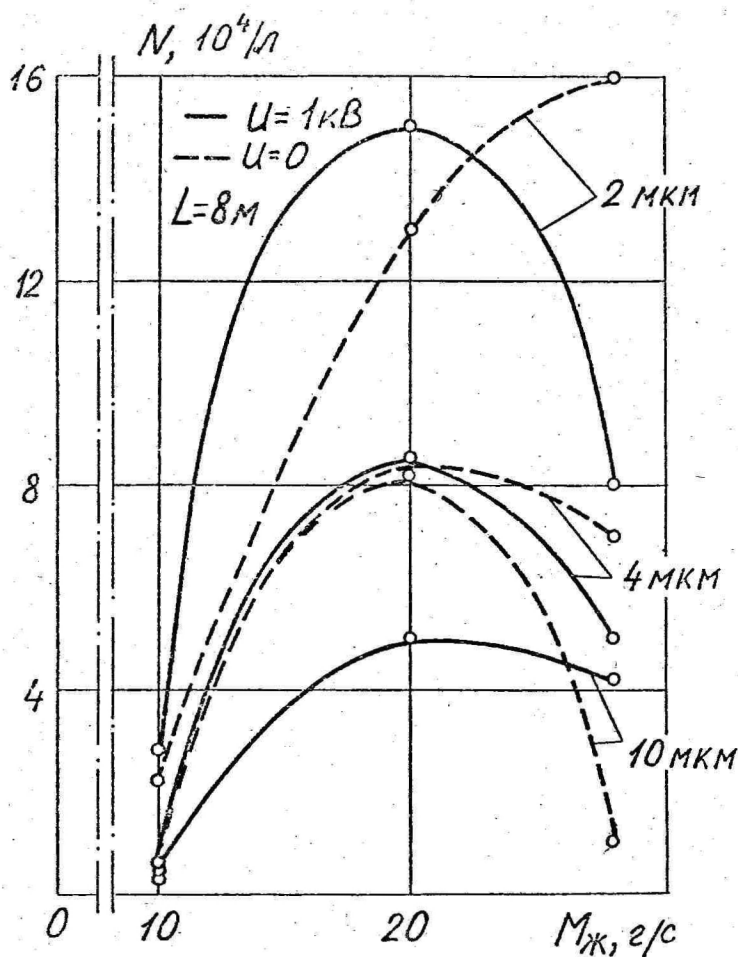


Рис. 2. Зависимость концентрации аэрозольных частиц от расхода распыляемой жидкости.

дисперсности электрически заряженных частиц.

На рис. 3-5 показаны зависимости тока конвекции заряженных частиц на измерительный зонд, а также массовой плотности осаждения частиц от расстояния до генератора и расхода распыляемой жидкости. Зависимости тока конвекции получены при подаче на электроды индуцирующего напряжения 1 кВ. При отсутствии напряжения ток конвекции не превышал 2-3 нА, т.е. был более, чем на два порядка ниже минимального значения тока при подаче индуцирующего напряжения.

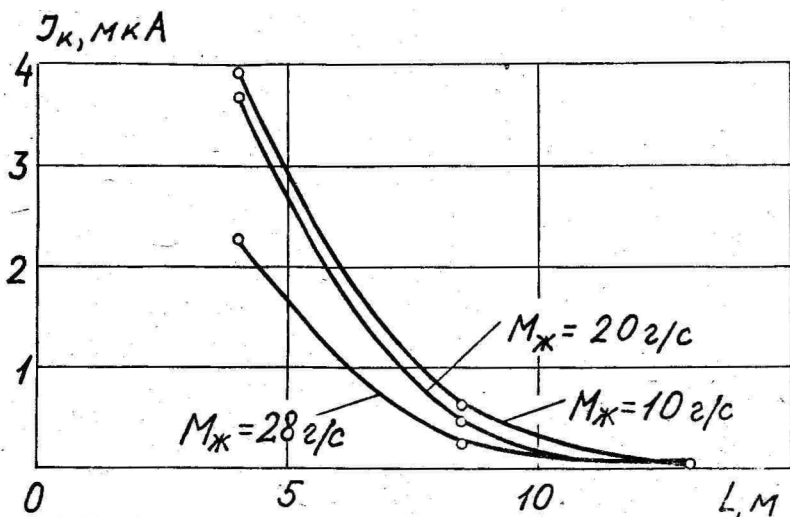


Рис. 3. Зависимость тока конвекции на зонд от расстояния до генератора (замеры по оси струи).

Из рис. 3 видно, что удаление от генератора электроаэрозолей сильно сказывается на величине тока конвекции. Так, при увеличении расстояния от 4 до 8 м (в 2 раза) ток конвекции падает в 6 раз, а на расстоянии 13 м он составляет лишь 0,7 мкА. Из рис. 3 также видно, что увеличение расхода жидкости от 10 до 20 г/с мало влияет на ток конвекции. Дальнейшее увеличение расхода жидкости до 28 г/с снижает ток конвекции в 1,6–1,8 раза. Эту закономерность можно объяснить наличием двух тенденций: с повышением расхода жидкости увеличивается число заряженных капель, но вместе с тем снижается степень электризованности возникающих капель.

Приведенные на рис. 4 зависимости тока конвекции на зонд и массовой плотности осаждения частиц от расстояния до генератора в направлении проекции оси струи на пол получены при высоте точек замера 0,1 м. Как видно, характер уменьшения тока конвекции с увеличением расстояния аналогичен тому, что на рис. 3, причем ток конвекции на периферии струи на порядок меньше, чем на оси струи. И здесь увеличение расхода жидкости более 20 г/с уже не способствует увеличению тока конвекции.

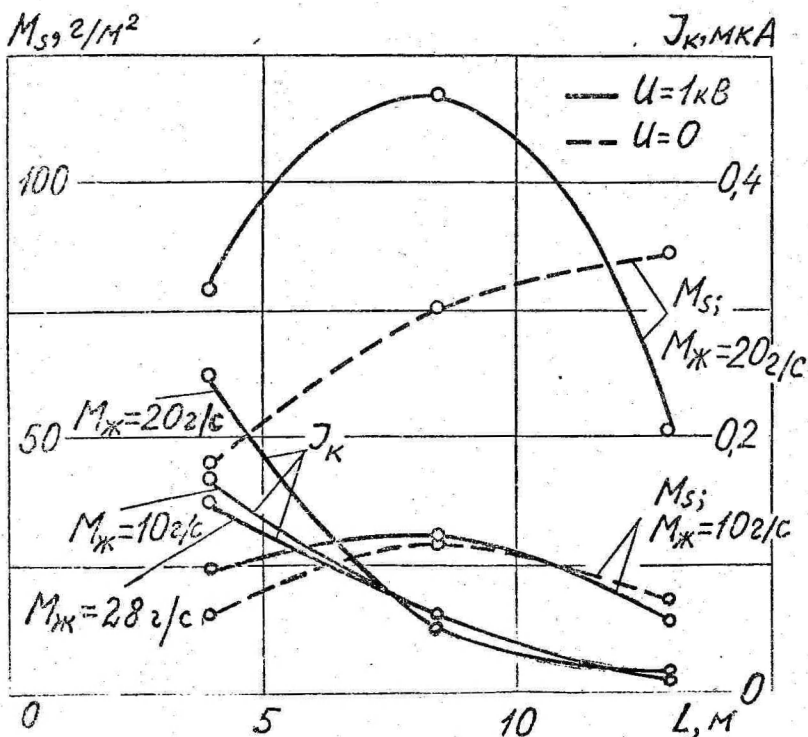


Рис. 4. Зависимости тока конвекции на зонд и массовой плотности осаждения частиц от расстояния до генератора в направлении проекции оси струи на пол.

Показанные на рис. 5 зависимости тока конвекции на зонд и массовой плотности осаждения частиц от расстояния до генератора вдоль стены помещения получены при высоте точек замера 2,0 м.

Сравнивая рис. 4 и 5 видим, что порядок величины тока конвекции в обоих случаях один и тот же. Увеличение расхода жидкости от 20 до 28 г/с снижает ток конвекции в среднем в 2,7 раза.

Анализируя зависимости массовой плотности осаждения частиц на рис. 4, видим, что повышение расхода жидкости от 10 до 20 г/с увеличивает плотность осаждения частиц аэрозоля в среднем в 3,3 раза. При этом можно заметить, что максимум плотности в случае электрически заряженного аэрозоля распо-

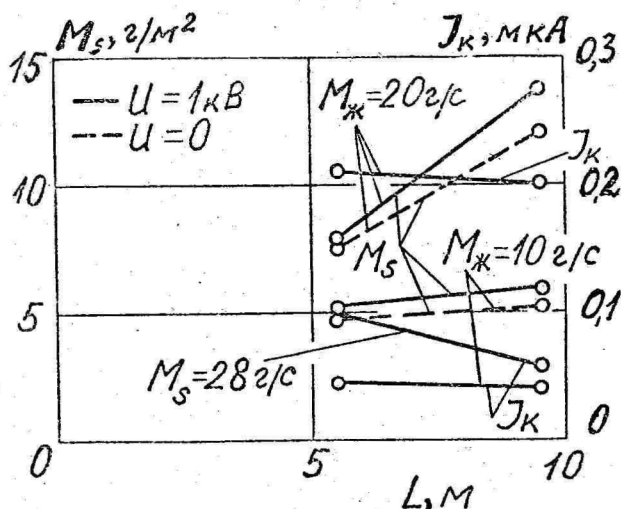


Рис. 5. Зависимости тока конвекции на зонд и массовой плотности осаждения частиц от расстояния до генератора вдоль стены помещения.

ложен на меньшем расстоянии от генератора, чем при незаряженном аэрозоле. Иначе говоря, электризация аэрозоля способствует осаждению частиц аэрозоля на более близком расстоянии от генератора. Повышенная плотность осаждения незаряженного аэрозоля на расстоянии 13 м от генератора свидетельствует о наличии застойной зоны в потоке аэрозоля около фронтальной стены помещения.

Как видно из рис. 5, электризация повышает плотность осаждения частиц аэрозоля на стенах. При этом с увеличением расстояния от генератора в пределах от 5 до 10 м повышение плотности увеличивается. Так, на расстоянии 5,5 м электризация аэрозоля повышает плотность осаждения на 7-11%, а на расстоянии 9,5 м - на 13%.

В ходе испытаний генератора электроаэрозолей было замечено, что при длительной его работе в закрытом помещении вентилятор с электродвигателем, блок распылителей и трубчатый кожух покрываются заметным слоем дезинфектанта. Это происходит из-за циркуляции воздуха, насыщенного аэрозолем дезинфектанта, через трубчатый кожух генератора. Во избежание сказанного забор воздуха для вентилятора целесообразно осуществлять за пределами обрабатываемого помещения.

Заключение. Усовершенствование конструкции пневматических распылителей генератора электроаэрозолей /I/ позволило снизить расход сжатого воздуха, повысить надежность его работы. Испытания генератора электроаэрозолей, установленного в помещении размерами 18x8x6 м по его продольной оси, показали, что в струе счетная концентрация частиц аэрозоля в режиме зарядки в области 2 мкм больше и в области 10 мкм меньше, чем в режиме без зарядки (рис. 2). На расстоянии 5-10 м от генератора массовая плотность осаждения частиц аэрозоля на пол и стены в режиме зарядки на 10-60% больше, чем в режиме без зарядки (рис. 4 и 5). При этом плотность осаждения на пол в 5-10 раз больше, чем на стены. Для обеспечения эффективной обработки помещения электрически заряженным аэрозолем целесообразен расход распыливаемой жидкости 10-20 г/с.

Авторы признательны руководству Тартуского районного объединения Эстсельхозтехники за любезное предоставление помещения и создание условий для проведения испытаний генератора электроаэрозолей и с.н.с. Р.Э. Прийман за помощь в определении закономерностей осаждения распыленной жидкости на поверхности.

Л и т е р а т у р а

1. Белов М.Н., Виснапу Л.Ю., Пярнасте Э.Э. О результатах испытания генератора электроаэрозолей для дезинфекции помещений. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 115-122.
2. Белов М.Н., Виснапу Л.Ю. Об исследовании генератора электроаэрозолей с несколькими распылителями. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1979, вып. 479, с. 115-127.

IMPROVED ELECTROAEROSOL GENERATOR FOR THE DISINFECTION OF ROOMS

M. Belov and L. Visnapuu

S u m m a r y

Improvement of the design of pneumatic atomizers of the electroaerosol generator enabled us to lower the consumption of compressed air, and to raise the responsibility of the generator in service. Tests of the electroaerosol generator installed in the room with dimensions 18 x 8 x 6 m along its longitudinal axis showed that the numerical concentration of aerosol particles in the regime of charging in the range of 2 μm is more and in the range of 10 μm is less than in the case of uncharging. At a distance of 5-10 m from the generator mass density of the settled aerosol particles on the floor and on the walls in the regime of charging is 10-60 % higher than without charging. At this the density of deposition on the floor is higher than that on the walls. For efficient treatment of the room with electroaerosol consumption of the liquid is 10-20 g/s.

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УНИПОЛЯРНОГО АЭРОЗОЛЯ

В.Ю. Незгада, А.К. Сабутис, Я.Ю. Рейнет

Применяемые в текстильной промышленности местные нейтрализаторы электростатических зарядов (например, высоковольтные или радиоизотопные) малоэффективны из-за ограниченности зоны их действия. Кроме того, в отдельных технологических зонах, например, в таких зонах движения рабочих деталей оборудования, как берда и ремиза ткацкого станка, установка нейтрализаторов подобного типа не представляется возможной, а сравнительно сухой воздух способствует высушиванию волокон в процессе их переработки или хранения, что увеличивает их хрупкость (усиливается пылеобразование), повышается обрывность полуфабрикатов.

Применение высоковольтных нейтрализаторов, основанных на коронном разряде, опасно, т.к. они загрязняют воздух производственных помещений ядовитыми газами (озон, соединения азота). Учитывая требования техники безопасности, нужно отказаться от использования радиоактивных нейтрализаторов /1, 2/.

На многих текстильных предприятиях для нейтрализации статического электричества используют распыление воды, что увеличивает относительную влажность в производственных помещениях до 80% и более. Несмотря на это, при обработке искусственных волокон не удается достичь удовлетворительных результатов. Кроме того, такая высокая влажность вредно отражается на здоровье работающих и вызывает коррозию деталей машин. Поэтому необходимо искать новые методы и средства для нейтрализации электрических зарядов.

Одним из таких методов нейтрализации является применение униполярно заряженного аэрозоля, который создается при распылении воды в электрическом поле. Однако наиболее приемлемым и эффективным методом нейтрализации статических электрических зарядов в текстильной промышленности является ионизация воздуха при одновременном его увлажнении униполярным

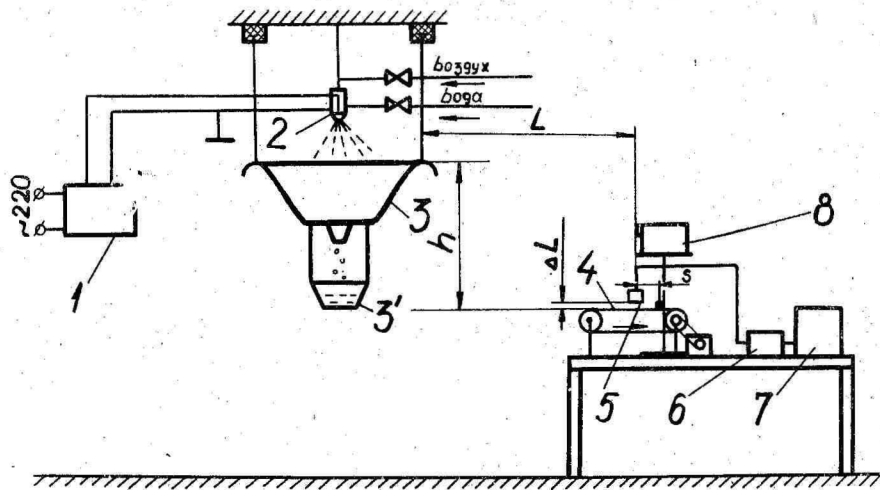


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: I - выпрямитель, 2 - распылитель, 3 - коллектор, 3' - сосуд для сбора воды, 4 - бесконечная лента, 5 - датчик, 6 - динамический электрометр, 7 - самописец.

аэрозолем (со сверхтонким распылом).

Основной целью настоящей работы было определение эффективности нейтрализации электростатических зарядов нейтрализатором конструкции Тартуского государственного университета /3/. Исследования проводились в помещении с постоянными параметрами воздуха (относительная влажность $\varphi_{в} = 60\%$, температура $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$). Опыты проводились на экспериментальном стенде (рис. 1), который работает следующим образом. При подаче тока постоянного напряжения (порядка 500 В) с выпрямителя 1 на распылитель 2 последний дает капли, на которых индуцируется заряд, противоположный знаку заряда индуцирующего электрода. Этот распыл жидкости, в котором преобладают частицы (капли) с зарядом, противоположным заряду индуцирующего электрода, попадая на коллектор 3, заряжает его до высокого потенциала - 15-20 кВ. Если поблизости имеется какое-либо тело, заряженное противоположным знаком, то униполярный распыленный факел движется в направлении заряженного тела противоположного знака и нейтрализует его. Этим телом в наших исследованиях явилась бесконечная лента диацетатной ткани артикула 32467 "Леся", заряд на которой создавался методом трения /4/. После некоторого числа оборотов при трении ленты о металлический прутик на ней создавалась постоянная величина электростатического заряда и наблюдался его спад при работе нейтрализатора и без нейтрализатора. Также наблюдался процесс зарядки ленты при тех же условиях. Изменение величины зарядов, возникающих на ленте, измерялось с помощью датчика 5 динамического электрометра 6. Датчик располагался на расстоянии $S = 0,08$ м от места трения и от исследуемой ткани - $\Delta L = 0,004$ м. Для удобства снятия показаний использовался самописец 7 типа EZ-II. Плотность заряда (эл. зар./см³) измерялась счетчиком 8, расположенным за 2,0 м от коллектора. На коллекторе поддерживалось напряжение порядка 18-19 кВ, а величина электрического поля на исследуемой ленте составляла 0,1 кВ/м. Расстояние коллектора от места регистрации величины заряда было по вертикали $h = 1,2$ м, по горизонтали $L = 2,0$ м.

Кривые на рис. 2 получены путем обработки диаграмм самописца. Как видно из рисунка, ионизация воздуха униполярным аэрозолем заметно способствует уменьшению зарядки ленты. Если в естественных условиях предельная зарядка составляет 0,104 кВ/м, то при работе нейтрализатора предельная зарядка - 0,07 кВ/м.

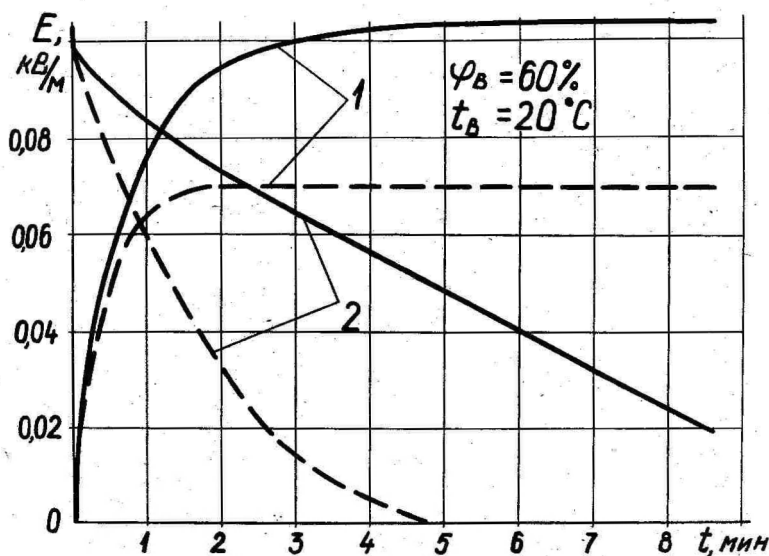


Рис. 2. Зависимости изменения электростатического состояния ткани: 1 - процесс зарядки, 2 - процесс разрядки. Сплошные линии - без ионизации воздуха, пунктирные - при наличии ионизации, $\Pi_{\text{ср}}^+ = 8000 \text{ эл.зар./см}^3$, $\Pi_{\text{ср}}^- = 62000 \text{ эл.зар./см}^3$, $q_{\text{ср}} = 0,129$. Расстояние от коллектора до счетчика $L = 2 \text{ м}$.

Анализируя процесс разрядки ткани, необходимо отметить, что полупериод утечки зарядов при наличии ионизации воздуха с помощью униполярного аэрозоля сокращается примерно в 3,5 раза /5/. Заметно уменьшается и время полной разрядки (примерно в 2,5 раза). Из этого следует, что нейтрализатор может быть применен для нейтрализации зарядов, возникающих на текстильных материалах. Кроме того, коллектор должен быть установлен на определенном расстоянии от заземленных частей машин и стен здания, так чтобы частицы униполярного аэрозоля попадали на детали машин и стен в незначительной степени.

Выводы

В текстильной промышленности нежелательно использовать работающие на коронном разряде (высоковольтные и др.) нейтрализаторы статического электричества. Учитывая требования техники безопасности, нужно отказаться также от использования радиоактивных нейтрализаторов. Необходимо отказаться и от распыления воды в производственных помещениях, поскольку это негигиенично и вызывает быструю коррозию машин. Кроме того, высокая влажность малоэффективна при обработке искусственных волокон.

В текстильной промышленности для нейтрализации зарядов статического электричества наиболее эффективно использование униполярно заряженного аэрозоля (электроаэрозоля), который создается генератором электроаэрозолей (авт. свид. № 371860) и под влиянием электрического поля коллектора этого генератора (20 кВ/м) направляется в помещении в основном на те места, где образуются разноименные вредные статические заряды.

Л и т е р а т у р а

1. Староба И., Шиморда И. Статическое электричество в промышленности. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
2. Полоник П.А. Борьба со статическим электричеством в текстильной и легкой промышленности. - М.: Легкая индустрия, 1966.
3. Рейнет Я.Д. Авторское свидетельство № 371860 "Установка для нейтрализации статического электричества".
4. Статическое электричество при переработке химических волокон / Под ред. Генца И.П. - М.: Легкая индустрия, 1966.
5. Шевурдяев О.Н. Антистатические полимерные материалы. - М.: Химия, 1983.

POSSIBILITIES OF NEUTRALIZING ELECTROSTATIC CHARGES
OF TEXTILE MATERIALS BY MEANS OF UNIPOLAR AEROSOLS

V. Nezgada, A. Sabutis and J. Reinet

S u m m a r y

It is advisable not to use in the textile industry neutralizers of static electric charges which work on corona discharges (high voltage, etc.).

Taking into account safety precautions, one has likewise to desist from using radioactive neutralizers.

One has also to discard atomization of water in industrial rooms, which is unhygienic due to high relative humidity (80 % and over) and causes rapid corrosion of machinery.

In the textile industry, however, one has to use unipolarly charged aerosols (electroaerosols) for the neutralization of harmful static electric charges (USSR Author's Certificate No. 371860). Under the action of the electric field (20 kV/m) of the collector of the generator, the unipolarly charged electroaerosol passes chiefly spontaneously to those parts of the room where there develops a harmful static electric charge of the opposite sign and neutralizes it.

СОДЕРЖАНИЕ

М.Р. Лаан, Я.А. Сузи. Оптическая диагностика развивающегося ВЧ разряда в азоте. Резюме	9
Я.Й. Сальм. Соединение аэроионов при симметричной стационарной ионизации	10
Х.Ф. Таммет, Ф.Г. Миллер, Э.И. Тамм, Т.П. Бернотас, А.А. Мирме, Я.Й. Сальм. Аппаратура и методика спектрометрии подвижностей легких аэроионов	18
Х.Ф. Таммет, Х.Р. Ихер, Я.Й. Сальм. Спектр атмосферных ионов в диапазоне подвижности 0,32-3,2 см ² / / (В·с)	29
У.Э. Хыррак. Статистические сводки результатов измерения атмосферных ионов и аэрозолей на о. Вильсанди летом 1984 года	47
Р.Л. Матизен. Климатические испытания счетчиков аэроионов	58
М.Г. Ноппель, Х.Ф. Таммет. Метод и алгоритм вычисления аппаратной матрицы электрического спектрометра аэрозолей	62
А.А. Мирме. О калибровке электрического спектрометра аэрозолей	71
А.А. Мирме, А.Э. Рейнарт, Ю.Э. Кикас, Э.И. Тамм, М.А. Дубровин, Т.П. Бернотас, И.А. Пейль. Измерение спектров калибровочных аэрозолей. Сравнение анализатора TSI со спектрометром TGU	80
И.А. Пейль, Э.И. Тамм, П.Н. Зубченко, И.К. Холм, Э.К. Мяги. Генерирование узкого биполярного распределения заряда на частицах аэрозоля	89
Э.И. Тамм, Л.Э. Лангус, А.А. Мирме. Проверка работы электрического сепаратора аэрозолей в области больших частиц	98
Ю.Э. Кикас. О качестве калибровочных аэрозолей, полученных электрическим сепарированием	106

В.Б. Тамме, И.В. Коппелмаа. Вибрационный генератор монодисперсных аэрозолей	113
И.А. Пейль. Электростатический разбавитель аэрозоля	120
К.-С.К. Ребане, О.В. Сакс, Е.И. Шуличенко. 25 лет исследований по электрометрии в Тартуском государственном университете	126
Г.В. Посметухова, О.В. Сакс. Нестабильность ионизационных источников тока ИИТ-9 - ИИТ-12	134
О.В. Сакс, В.Г. Шор. Электрометрическая поверочная установка УТ-8304	140
Ю.А. Хяммалов. Исследование влияния поверхностных явлений на дрейф и паразитный ток электрометра .	150
Ю.А. Хяммалов. Определение автокорреляционной функции $1/f$ -флуктуаций	159
Р.Э. Прийман, Х.Ф. Таммет. Оценка допустимой мощности коронного аэроионизатора по критерию химического загрязнения воздуха	166
Р.Э. Прийман. Применимость озонного индекса для оценки загрязнения воздуха	175
Л.Ю. Виснапуу. К зависимости электризации распыленной воды от ее состояния	184
М.Н. Белов, Л.Ю. Виснапуу. Усовершенствованный генератор электроаэрозолей для дезинфекции помещений	188
В.Ю. Незгада, А.К. Сабутис, Я.Ю. Рейнет. Возможности нейтрализации электростатических зарядов текстильных материалов с помощью униполярного аэрозоля	198

CONTENTS

M. Laan, J. Susi. Optical diagnostics of the propagating HF discharge in nitrogen	10
J. Salm. Combination of air ions in the case of symmetrical steady-state ionization	18
H. Tammet, F. Miller, E. Tamm, T. Bernotas, A. Mirme and J. Salm. Apparatus and methods for the spectrometry of small air ions	29
H. Tammet, H. Iher, J. Salm. The spectrum of atmospheric ions in the range of $0.32-32 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	47
U. Hörrak. Statistical results of air ions and aerosol measurements on the Island of Vilsandi in the summer of 1984	58
R. Matisen. Climate tests with air-ion counters	62
M. Noppel, H. Tammet. Method and algorithm for the calculation of the apparatus matrix for the electrical aerosol spectrometer	71
A. Mirme. About the calibration of the electrical aerosol spectrometer	80
A. Mirme, A. Reinart, M. Dubrovin, Ü. Kikas, E. Tamm, T. Bernotas, I. Peil. Measurement of calibration aerosol spectra. Comparison of the electrical aerosol analyzer (TSI) with the aerosol spectrometer of Tartu State University	89
I. Peil, E. Tamm, P. Zubchenko, I. Holm, E. Mägi. Generation of the narrow bipolar charge distribution on aerosol particles	98
E. Tamm, L. Langus, A. Mirme. Checking of the operation of the electric aerosol separator in the range of large particle size	106
Ü. Kikas. About electrically separated calibration aerosols	113
V. Tamme, I. Koppelmaa. Vibrating generator of monodisperse aerosols	120
I. Peil. An electrostatical aerosol diluter	120

K.-S. Rebane, O. Saks, E. Schulichenko. 25 years of electrometrical investigations at Tartu State Uni- versity	I26
G. Posmetukhová, O. Saks. Instability of the ionization current sources <i>ИИТ -9- ИИТ-12</i>	I34
O. Saks, V. Shor. Electrometrical verification apparatus UT-8304	I40
J. Hämmalov. A study of the influence of surface pheno- mena on the zero drift and on the background current of an electrometer	I50
J. Hämmalov. Determination of the autocorrelation func- tion of $1/f$ -fluctuations	I59
R. Priiman, H. Tammet. Assessment of the permissible power of the corona ionizer according to the crite- rion of the chemical pollution of the air	I66
R. Priiman. On the possibility of using the ozone index.	I75
L. Visnapuu. About the dependence of the electrification of dispersed water on its initial state	I81
M. Belov, L. Visnapuu. Improved electroaerosol generator for the disinfection of rooms	I88
V. Nezgada, A. Sabutis, J. Reinet. Possibilities of neutralizing electrostatic charges of textile mate- rials by means unipolar aerosols	I98

УДК 537.523.2:533.9.082.5

OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE PROPAGATING HF
DISCHARGE IN NITROGEN. M. Laan, J. Susi. -
Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с.3-9.

Представлены результаты оптического изучения канала развивающегося разряда на частоте 84 МГц с острового электрода при атмосферном давлении. Поглощение полос 2^+ системы азота измерено методом одного зеркала. Температура газа определяется методом сравнения интенсивностей полос $0 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 2$. Представлена временная зависимость колебательной температуры в канале разряда.

Илл. - 4. Библ. - 5. Рез. рус.

УДК 551.594

СОЕДИНЕНИЕ АЭРОИОНОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ. Я.Й. Сальм. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 10-17.

Рассмотрена и развита теория соединения аэроионов при симметричной стационарной ионизации. Аналитически выведены асимптотические формулы для расчета эквивалентного коэффициента прилипания легких аэроионов к ядрам конденсации. Найден эффективный коэффициент прилипания для среднего распределения тропосферных аэрозольных частиц.

Библ. - 15. Рез. англ.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА СПЕКТРОМЕТРИИ ПОДВИЖНОСТЕЙ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ. Х.Ф. Таммет, Ф.Г. Миллер, Э.И. Тамм, Т.П. Бернотас, А.А. Мирме, Я.Й. Сальм. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 18-28.

Сконструирован автоматический многоканальный аспирационный спектрометр аэроионов, сконфигурованный ЭВМ "Электроника ДЗ-28" и вспомогательными приборами. Спектрометр измеряет спектр подвижности аэроионов в 10 логарифмически расставленных фракциях подвижности в диапазоне от 0,32 до 3,2 см² / (В·с). Среднечасовые спектры вместе с оценками случайных погрешностей записываются на магнитную ленту, а потом проявляются на ЭВМ по алгоритму наименьших квадратов.

Илл. - 4. Библ. - 10. Рез. англ.

СПЕКТР АТМОСФЕРНЫХ ИОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ПОДВИЖНОСТИ 0,32-3,2 см²/(В·с). Х.Ф. Таммет, Х.Р. Ихер, Я.Й. Сальм. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 29-46.

С 04.06.85 по 10.06.85 в г. Тарту и с 10.06.85 по 15.09.85 в деревне Тахкузе ЭССР измерены среднечасовые спектры подвижности аэроионов в 10 фракциях в диапазоне от 0,32 до 3,2 см²/(В·с). Вычислены средние спектры аэроионов обеих полярностей, имеющие глубокий минимум около подвижностей 0,5-0,6 см²/(В·с). Иногда в значительном количестве наблюдались и средние ионы в диапазоне 0,32-0,5 см²/(В·с). Проведена параметризация спектра (по концентрации, средней подвижности и относительной ширине спектра легких ионов, а также по концентрации средних ионов). Вычислены средние значения и стандартные отклонения параметров, распределения среднечасовых подвижностей и коэффициента униполярности, суточный ход параметров, коэффициенты линейной корреляции и др. Обсуждены гипотезы о процессах возникновения средних ионов. Предложена уточненная классификация аэроионов.

Илл. - 3. Табл. - 9. Библ. - 16. Рез. англ.

УДК 551.594.12.551.510:615.847.1

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОДКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНОВ И АЭРОЗОЛЕЙ НА О. ВИЛЬСАНДИ ЛЕТОМ 1984 ГОДА. У.Э. Хыррак. - Уч.зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 47-57.

Приведены результаты статистического анализа данных измерения электропроводностей воздуха, концентраций аэроионов и аэрозолей, полученных за период от 23.07.84 до 12.09.84 на о. Вильсанди, экспедицией, организованной М.У. Арольдом.

Илл. - 1. Табл. - 6. Библ. - 7. Рез. англ.

УДК 551.508.941-142 621.3.019.3

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СЧЕТЧИКОВ АЭРОИОНОВ. Р.Л. Матизен. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 58-61.

Приведены результаты испытаний счетчиков аэроионов в климатической камере в условиях высокой относительной влажности и температуры окружающей среды. Установлено, что поддержание избыточного давления в кожухе прибора, обдув изоляторов измерительного конденсатора осушенным с помощью силикагеля воздухом и подогрев внутреннего объема счетчика аэроионов обеспечивают его эффективную защиту от воздействия высокой относительной влажности и температуры воздуха.

Библ. - 2. Рез. англ.

УДК 541.128.2/3 551.508 621.319.7.001

МЕТОД И АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ АППАРАТНОЙ МАТРИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА АЭРОЗОЛЕЙ.
М.Г. Нопшель, Х.Ф. Таммет. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 62-70.

На основе теоретических знаний предложена модель аппаратной матрицы электрического анализатора аэрозолей, параметры которой допускают физическую интерпретацию. Описан метод вычисления параметров модели по экспериментальным данным измерения тест-аэрозолей и оптического и электронно-микроскопического анализа канальных осадок аэрозольных частиц. Приведен конкретный алгоритм, реализующий описанный метод.

Библ. - 8. Рез. англ.

УДК 541.128.2/3 551.508 621.319.7.001

О КАЛИБРОВКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА АЭРОЗОЛЕЙ. А.А. Мирме. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 71-79.

Рассматривается способ калибровки электрического спектрометра аэрозолей, при котором определение элементов аппаратной матрицы сводится к решению уравнений, очень похожих на аппаратное уравнение спектрометра.

Метод особенно эффективно использует информацию в виде аппаратных записей спектров калибровочных аэрозолей.

Результаты тестирования аппаратной матрицы находятся в полном соответствии с качеством использованной при калибровке информации.

Библ. - 8. Илл. - 1. Рез. англ.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ. СРАВНЕНИЕ АНАЛИЗАТОРА TSI СО СПЕКТРОМЕТРОМ ТГУ. А.А. Мирме, А.Э. Рейнарт, Ю.Э. Кикас, Э.И. Тамм, М.А.Дубровин, Т.П. Бернотас, И.А. Пейль. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 80-88.

Были проведены измерения монодисперсных калибровочных аэрозолей одновременно двумя приборами: электрическим анализатором аэрозолей (ЕАА), модель 3030 фирмы TSI и электрическим спектрометром аэрозолей, разработанным в Тартуском университете. Обои приборами определяли средний диаметр частиц \bar{d} (в диапазоне от 10 до 700 нм), концентрацию частиц N и относительную полуширину спектра размеров Δ .

Средние размеры частиц аэрозолей воспроизводились весьма точно. Для частиц $\bar{d} > 100$ нм ЕАА дал несколько сниженную оценку размера. В оценках концентрации и ширины спектра наблюдались расхождения.

Илл. - 1. Табл. - 3. Библ. - 8. Рез. англ.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ УЗКОГО БИПОЛЯРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА НА ЧАСТИЦАХ АЭРОЗОЛЯ.

И.А. Пейль, Э.И. Тамм, П.Н. Зубченко, И.К. Холм, Э.К. Мяги. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 89-97.

Теоретически рассматривается возможность создания в монодисперсном аэрозоле распределения частиц по заряду, более узкого, чем равновесное распределение в заряднике с выключаемым ионизатором. В аэрозоле в начальный момент создают биполярную ионную атмосферу; процессы зарядо-обмена прекращаются после израсходования ионов в процессах рекомбинации. Численным решением системы кинетических уравнений вычислены получаемые распределения заряда для нескольких значений отношения начальных концентраций ионов и аэрозольных частиц (радиуса 0,6 мкм). Проведена экспериментальная проверка теоретических распределений.

Узкое распределение заряда необходимо для электрического сепарирования частиц аэрозоля. Введены критерии для оценки качества распределения заряда с точки зрения электрического сепарирования.

Илл. - 2. Табл. - 2. Библ. - 10. Рез. англ.

ПРОВЕРКА РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА АЭРОЗОЛЕЙ В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ ЧАСТИЦ. Э.И. Тамм, Л.Э. Лангус, А.А. Мирме. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 98-105.

При проверке работы электрического сепаратора как генератора монодисперсных тест-аэрозолей в области больших частиц использовался диоктилфталатовый аэрозоль. Для определения радиуса и заряда частиц, выходящих из сепаратора, их треки фотографировались в ультрамикроскопической кювете траекторного спектрометра. Фото пленки обрабатывались на полуавтоматическом координатометре, работающем на линии с микроЭВМ "Электроника ДЗ-28". Проведен анализ систематических и случайных ошибок измерения и обработки треков, изучено влияние электрического ветра. Было установлено, что модальный линейный размер сепарированных частиц хорошо совпадает с расчетным, а ширина спектра оказывается шире расчетной.

Библ. - 8. Рез. англ.

О КАЧЕСТВЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕПАРИРОВАНИЕМ. Д.Э. Кикас - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 106-112.

Электронно-микроскопическим анализом изучены пробы аэрозолей AgI , $NaCl$ и Hg_2Cl_2 генерируемых в системе конденсационный генератор - нейтрализатор - электрический сепаратор. Конденсационные аэрозоли AgI имели спектры размеров со средней относительной полушириной $\sigma_g = 19\%$. Для конденсационных аэрозолей $NaCl$ соответственно $\sigma_g = 23\%$ и для аэрозолей Hg_2Cl_2 $\sigma_g = 42\%$. Ширина спектра размеров сепарированных аэрозолей была от 9% до 17% , что значительно больше теоретической - 5% , но хорошо совпадает с данными работы [6]. Анализированы причины уширения спектра сепарированного аэрозоля. Этот спектр тем шире, чем шире распределение конденсационного аэрозоля и чем больше в конденсационном аэрозоле скоагулированных несферических частиц.

Методом наименьших квадратов совершена аппроксимация аэрозольных спектров лог-нормальным распределением. Для всех спектров сепарированного аэрозоля, для спектров конденсационного аэрозоля Hg_2Cl_2 и для спектров AgI , если $d_k < 60$ нм, гипотезу о лог-нормальности нельзя отвергать.

Илл. - 2. Табл. - 3. Библ. - 6. Рез. англ.

УДК 621.319.7.001

ВИБРАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР МОНОДИСПЕРСНЫХ
АЭРОЗОЛЕЙ. В.Б. Тамме, И.В.Коппелмаа.
- Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986, вып.755,
с. 113-119.

В данной работе установлено, что режим монодисперсного распыления зависит еще и от скорости диспергирующего воздуха, и область монодисперсного распыления необходимо определить в четырехмерном пространстве параметров $U_{кр}$, λ/d , Re , Z , где λ/d_0 - отношение длины волны пертурбации к начальному диаметру струи жидкости, $U_{кр}$ - напряжение на пьезокристалле, Re - число Рейнольдса для струи жидкости, Z - отношение числа Вебера к числу Рейнольдса. Границы этой области по параметру Z определены для одной рабочей жидкости - дистиллированной воды.

Илл. - 5. Табл. - 1. Библ. - 4. Рез. англ.

УДК 621.319.7.001

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗБАВИТЕЛЬ АЭРОЗОЛЯ.
И.А. Пейль. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986,
вып. 755, с. 120-125.

Описывается новая конструкция разбавителя аэрозоля. Тип разбавителя - абсолютный фильтр с присоединенным к нему параллельно капилляром. В качестве абсолютного фильтра применяется униполярный зарядник и электростатический аспирационный конденсатор. Кратность разбавления зависит от размера выходных отверстий фильтра и капилляра. Разбавитель имеет малое аэродинамическое сопротивление и высокую стабильность.

Илл. - 2. Библ. - 4. Рез. англ.

УДК 621.317.3

25 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В
ТАРТУСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ.
К.-С.К. Ребане, О.В. Сакс, Е.И. Шули-
ченко. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986,
вып. 755, с. 126-133.

Исследования по электрометрии в ТТУ возникли в связи с необходимостью автоматизировать электрометрические измерения атмосферной ионизации. В 1959 г. О.В. Сакс и В.А. Рэббен разработали первый динамический электрометр. Усовершенствование электрометров с динамическим конденсатором является одним из направлений исследований до настоящего времени. К нему прибавились три направления: проблемы динамики и метрологическое обеспечение электрометрических устройств, исследование фотоионизации молекул методами электрометрии.

Библи. - 35. Рез. англ.

УДК 621.311.6.07.024:621.387.422:621.317.723.089.6

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ИОНИЗАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ТОКА ИИТ-9 - ИИТ-12. Г.В. Посметухова,
О.В. Сакс. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986,
вып. 755, 134-139.

Рассматриваются временная нестабильность выходного тока ионизационных источников тока ИИТ-9 - ИИТ-12 и причины, обуславливающие ее. Приводятся графики временной зависимости выходного тока. Среднее годовое изменение выходного тока относительно паспортного значения не превышает $\pm 1\%$ для ИИТ-9, ИИТ-11 и ИИТ-12 и может достигать $+2\%$ у ИИТ-10.

Илл. - 2. Библи. - 3. Рез. англ.

УДК 621.311.6.07.024:621.317.723.089.6

ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОВЕРОЧНАЯ УСТАНОВКА
УТ-8304. О.В. Сакс, В.Г. Шор. - Уч. зап.
Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с.140-149.

Установка предназначена для статической поверки электрометрических устройств по току в диапазоне от 10^{-17} до 10^{-6} А и по напряжению от 10^{-5} до 10,22 В. Самокалибровка установки основана на применении образцового резистора 10^9 Ом класса 0,02 и цифрового вольтметра класса 0,01.

Илл. - 6. Библ. - 10. Рез. англ.

УДК 621.317.3:541.183.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ
НА ДРЕЙФ И ПАРАЗИТНЫЙ ТОК ЭЛЕКТРОМЕТРА.

Ю.А. Хямалов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1986,
вып. 755, с. 150-158.

Представлены результаты исследования роли вакуумирования и последующего впуска воздуха во входное устройство динамического электрометра. В результате вакуумирования и впуска воздуха нарушается установившееся состояние молекул газа на поверхностях входных элементов электрометра. При этом образуется дрейф нулевого уровня и паразитного тока, подчиняющийся закономерности $\sim \ln t$ (t - время).

Илл. - 4. Библ. - 4. Рез. англ.

УДК 621.391.822.3:519.246.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ
 $1/f$ -ФЛУКТУАЦИЙ. Ю. А. Хямалов. - Уч. зап.
Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 159-165.

На основе выражения спектральной плотности $1/f$ -флуктуаций и т.н. концепции широкого набора времени жизни Ван дер Зила-Дю Пре определен аналитический вид автокорреляционной функции этих флуктуаций. Проводится обсуждение результата с точки зрения метода спектрального анализа.

Илл. - 2. Библ. - II. Рез. англ.

УДК 504.054: 661.94 + 661.98

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ КОРОННОГО АЭРОИОНИ-
ЗАТОРА ПО КРИТЕРИЮ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУХА. Р. Э. Прийман, Х. Ф. Таммет. - Уч. зап.
Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 166-174.

Исследуется количественное соотношение образования озона и окислов азота в зависимости от силы тока при работе коронных аэроионизаторов. Результаты эксперимента являются основой для расчетного нахождения такого режима работы коронного аэроионизатора, при котором концентрация озона не превышает установленный ПДК. Приведены практические формулы для разработчика системы аэроионификации.

Илл. - 2. Табл. - I. Библ. - 10. Рез. англ.

О ПРИМЕНЕНИИ ОЗОННОГО ИНДЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА. Р.Э. Приyman. - Уч.
зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с.175-
183.

Дано физико-химическое объяснение озонному индексу как одному из суммарных показателей загрязнения воздуха окисляющимися озоном загрязнителями воздуха. Проведен ряд экспериментов определения озонного индекса в различных условиях среды и состояний воздуха. На основе проделанной работы заключено, что для оценки загрязнения воздуха озонный индекс можно применять только с рядом ограничений и дополнительным определением т.н. фонового озонного индекса отдельно для каждого случая. Выявление корреляционной зависимости между озонным индексом и аэрозольной и аэроионной загрязненностью воздуха на основе проведенных экспериментов невозможно из-за значительной зависимости озонного индекса не только от загрязнения воздуха, но и от различных условий среды, методики анализа определения озона, применяемого источником озона и пр.

Табл. - 3. Библ. - 3. Рез. англ.

К ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ОТ ЕЕ СОСТОЯНИЯ. Л.Ю.Виснапуу. - Уч.зап. Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 184-187.

Измерены полярные объемные плотности заряда P_{\pm} аэрозоля, образующегося в боксе при пневматическом распылении вод, обработанных различными способами.

Анализ результатов измерения показывает, что 1) обработанная вода дает P_{\pm} в несколько раз больше, чем обычная водопроводная вода, 2) для вод, имеющих примеси (водопроводной, анодной и катодной),

$P_{+} \cdot (10^{-1})/P_{-} \cdot (10^{-1}) > 1$ и $P_{\pm} \cdot (10^{-3})/P_{\pm}(10^{-1}) > 30$, (в скобках указана предельная подвижность, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), а для вод со значительно меньшими примесями (дистиллированной и снеговой) эти соотношения не наблюдаются.

Табл. - 1. Библ. - 3. Рез. англ.

УДК 621.319.17.001.6

541.18.053

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ. М.Н. Белов, Л.Ю. Виснапуу. - Уч. зап. Тарт.ун-та, 1986, вып. 755, с. 188-197.

Усовершенствование конструкции пневматических распылителей генератора электроаэрозолей позволило снизить расход сжатого воздуха, повысить надежность его работы. Испытания генератора электроаэрозолей, установленного в помещении размерами 18 x 8 x 6 м по его продольной оси, показали, что в струе счетная концентрация частиц аэрозоля в режиме зарядки в области 2 мкм больше и в области 10 мкм меньше, чем в режиме без зарядки. На расстоянии 5-10 м от генератора массовая плотность осаждения частиц аэрозоля на пол и стены в режиме зарядки на 10-60% больше, чем в режиме без зарядки. При этом плотность осаждения на пол в 5-10 раз больше, чем на стены. Для обеспечения эффективной обработки помещения электрически заряженным аэрозолем целесообразен расход распыливаемой жидкости 10-20 г/с.

Илл. - 5. Библ. - 2. Рез. англ.

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ УНИПОЛЯРНОГО АЭРОЗОЛЯ. В.Д.Незгада, А.К. Сабутис, Я.Ю. Рейнет. - Уч. зап.Тарт. ун-та, 1986, вып. 755, с. 198-203.

Авторы статьи считают нежелательным использовать в промышленности для нейтрализации вредных статических зарядов нейтрализаторы, работающие на принципе коронного разряда, которые создают ядовитые газообразные примеси (озон и соединения азота). Учитывая требования техники безопасности, нужно отказаться также от использования радиоактивных нейтрализаторов.

Рекомендуется применять генераторы униполярного электроаэрозоля, создающие сверхтонкий распыл воды (аэрозоля). Электроаэрозоль можно по желанию заряжать положительно или отрицательно.

Униполярно заряженный аэрозоль направляется с помощью электрического поля конденсатора (20 кВ м^{-1}) этого генератора в основном в те места производственных помещений, где образуются вредные статические заряды противоположного знака. Таким образом предотвращается создание высокой влажности и уменьшается коррозия деталей машин.

Илл. - 2. Библ. - 5. Рез. англ.

Ученые записки Тартуского государственного университета.
Выпуск 755.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЛОЖНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ.
Ионизация, аэрозоли, электрометрия.
На русском и английском языках.
Резюме на английском и русском языках.
Тартуский государственный университет.
ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Оликооли, 13.
Ответственный редактор И. Кикас.
Корректоры Л. Сноприенко, Л. Кивимяги.
Поддано к печати 14.01.1987.
ЛБ 01871.
Формат 60x90/16.
Бумага писчая.
Машинопись. Ротапринт.
Учетно-издательских листов 13,99. Печатных листов 15,0.
Тираж 600.
Заказ № 1097.
Цена 2 руб. 10 коп.
Типография ТГУ, ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Тийги, 78.