

УДК: 621.791; 533.9

**Вишняков В. И., Киро С. А., Опря М. В., Эннан А. А.**

Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса,  
E-mail: serkiro@mail.ru

### **Униполярная зарядка частиц сварочного аэрозоля и их распределение по зарядам.**

*Измерительный комплекс, содержащий анализатор электрической подвижности частиц и лазерный аэрозольный спектрометр, предложен для определения распределения по зарядам аэрозольных частиц, униполярно заряженных в коронном разряде. Предложена процедура обработки экспериментальных данных, которая не требует использования теории зарядки частиц. Продемонстрированы распределения по размерам и зарядам заряженных в ионизаторе малогабаритного электрофильтра частиц сварочного аэрозоля.*

**Введение.** Коронный разряд является одним из самых распространенных методов получения высоких концентраций ионов, и наиболее часто используется для зарядки аэрозольных частиц. Коронный разряд нашел широкое применение в различных промышленных технологиях [1], таких как очистка пылегазовых выбросов, сепарация частиц, нанесение покрытий. Частицы пыли в промышленных выбросах обычно либо не имеют заряда, либо слабо биполярно заряжены. Поэтому, для эффективной очистки выбросов в электрофильтре необходимо произвести зарядку частиц униполярными ионами в коронном разряде. Униполярная зарядка имеет преимущества перед биполярной (биполярные ионы генерируются с помощью радиоактивных источников или УФ излучения), поскольку не достигается равновесного распределения зарядов и возможно обеспечить более высокую эффективность электрофильтра. Способность частиц пыли приобретать заряд, распределение частиц по зарядам и размерам определяет конструкцию электрофильтра и электростатические параметры их сепарации и осаждения.

Другим практическим применением униполярной зарядки частиц в коронном разряде является определение распределения частиц аэрозоля по размерам методом дифференциальной электрической подвижности частиц. При этом используются дифференциальный анализатор подвижности и конденсационный или оптический счетчик концентрации частиц. Высокая эффективность зарядки аэрозольных частиц в коронном разряде приводит к высокой чувствительности измерений их размера [2]. Вычисление размера частиц по их подвижности требует знания заряда для каждого размера частицы. Прогнозирование заряда для конкретного зарядного устройства производится на основании теории диффузионной зарядки частиц [3, 4].

Морфология и химический состав частиц оказывают сильное влияние на эффективность их зарядки [5]. Кроме того, для полидисперсного аэрозоля распределение заряда на частицах различного размера будет зависеть от особенно-

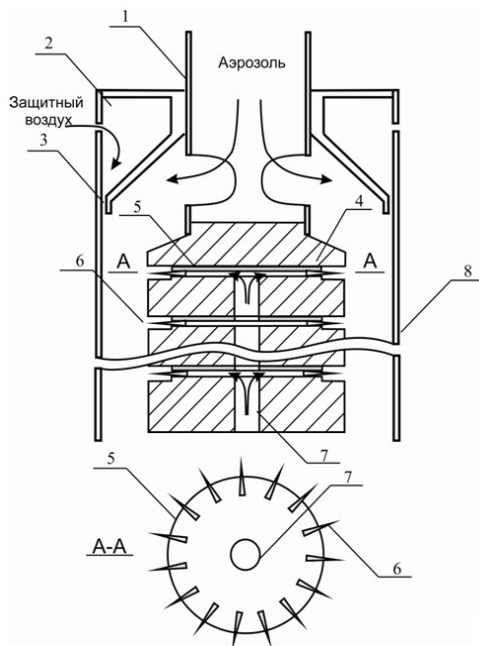


Рис.1 Схема конструкции ионизатора [7].

стей распределения по размерам [6]. Недостатком традиционного метода дифференциальной электрической подвижности частиц при анализе промышленных аэрозолей является необходимость полагаться на теоретические расчеты процесса зарядки модельных частиц без возможности проверить корректность этих расчетов. Таким образом, существует потребность в новом аппаратном обеспечении метода дифференциальной электрической подвижности, способном измерять заряд частицы промышленных аэрозолей в широком диапазоне размеров. В представленной работе совместно используются анализатор подвижности и лазерный аэрозольный спектрометр, который непосредственно измеряет распределение выделяемых анализатором частиц по размеру. Это позволяет построить распределение частиц по зарядам без использования какой-либо теории зарядки частиц.

**Ионизатор.** Для зарядки частиц сварочного аэрозоля использовался ионизатор, в котором ионы образуются за счет ионизации воздуха в коронном разряде. Схема ионизатора представлена на рис.1.

Ионизатор состоит из коаксиальных внутреннего многоиглового коронирующего электрода и заземленного корпуса с внутренним радиусом 53 мм (8). Коронирующий электрод имеет шесть стальных дисков (5) радиусом 32 мм и толщиной 2 мм, на которых радиально установлены по 15 игл из нержавеющей

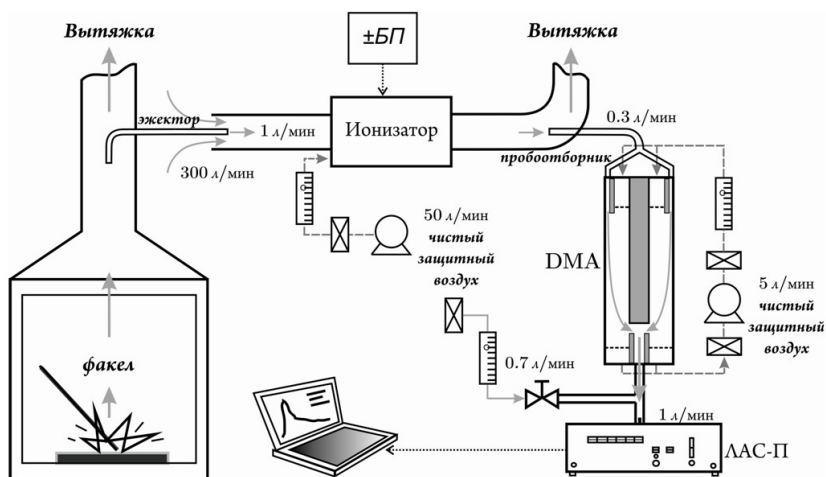


Рис.2 Схема экспериментальной установки [7].

щей стали (6), подключенные к источнику высокого напряжения. Острия игл с радиусом кривизны  $\sim 25$  мкм равномерно расположены на окружности радиусом 38 мм. Расстояние от острия иглы до заземленного корпуса (8) радиусом 53 мм составляло 15 мм. Между дисками с иглами установлены тефлоновые изоляторы специальной формы (4) так, что иглы находятся в кольцевом канале шириной 8 мм и высотой 6 мм, в который через осевое отверстие (7) поступает защитный воздух. Защитный воздух препятствует попаданию частиц аэрозоля в область высокой ионизации (внутреннюю зону коронного разряда). Расстояние между дисками с иглами - 17 мм. Диски смещены относительно друг друга на  $4^\circ$ , т.е. частицы аэрозоля обязательно проходят через осевые области коронного разряда иглы, где концентрация ионов максимальна. Такая конструкция многоиглового коронирующего электрода позволяет получить низкие начальные напряжения короны ( $\sim 3,2$  кВ) и обеспечить наибольшую мощность, потребляемую коронным разрядом.

Поток аэрозоля с объемным расходом  $Q_f \sim 300$  л/мин поступает в зарядное устройство по осевому каналу (1), и в межэлектродное пространство через четыре тангенциальных отверстия. Сечение зарядной области  $S_f = 38$  см<sup>2</sup>, длина  $L_f = 120$  мм, а время пребывания частиц  $t_f \cong 80$  мс. Для минимизации потерь частиц на внутренней поверхности заземленного электрода в межэлектродное пространство через два диаметрально противоположных отверстия входной камеры (2) и узкий кольцевой канал (3) подавался защитный воздух.

**Экспериментальная установка.** На рис.2 показана принципиальная схема экспериментальной установки, которая используется при измерении распре-

ления частиц сварочного аэрозоля по зарядам и размерам. Она состоит из четырех частей: генератора сварочного аэрозоля, ионизатора, анализатора подвижности частиц (differential mobility analyzer – DMA) и лазерного аэрозольного спектрометра (ЛАС-П).

Сварка электродами диаметром 3 мм с карбонатно-флюоритовым покрытием УОНИ 13/55 проводилась в сварочной камере постоянным током обратной полярности (ток  $I = 140$  А и напряжение  $U = 33$  В). Проба сварочного аэрозоля с объемным расходом 1 л/мин инжестировалась в поток воздуха-носителя (объемный расход потока 300 л/мин). В результате разбавления концентрация частиц сварочного аэрозоля снижалась до  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Сформированный таким образом поток сварочного аэрозоля поступал в ионизатор, где происходила униполярная зарядка частиц в отрицательном или положительном коронном разряде при токе 0,2 мА. Поток заряженных частиц сварочного аэрозоля направлялся в горизонтально расположенную трубу диаметром 190 мм (профиль скоростей потока в трубе был измерен с помощью анемометра).

Изокинетический отбор проб заряженных частиц для DMA проводился заземленной пробоотборной трубкой с расходом 0,3 л/мин. В DMA конструкции [8] с рециркуляцией ограждающего потока чистого воздуха заряженные частицы классифицировались по их электрической подвижности при разных напряжениях. Постоянное напряжение (положительной или отрицательной полярности), подаваемое на внутренний цилиндр анализатора, изменялось с шагом 10 В. DMA выделяет из потока заряженных частиц сварочного аэрозоля частицы с электрической подвижностью  $B = B_0$ . Зависимость между значением  $B_0$  и параметрами цилиндрического DMA описывается уравнением [8]:

$$B_0 = \frac{Q_s}{2\pi UL} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – наружный радиус внутреннего цилиндра анализатора;  $R_2$  – внутренний радиус наружного цилиндра анализатора,  $R_2 / R_1 = 2$ ;  $U$  – напряжение постоянного тока, создающее электрическое поле;  $L = 400$  мм – эффективная длина между входом и выходом потока аэрозоля в анализаторе;  $Q_s = 5$  л/мин – скорость ограждающего потока чистого воздуха.

Для сферических частиц зависимость между электрической подвижностью, их радиусом  $a$  и зарядом  $ez$  описывается уравнением:

$$B = \frac{ezS_C}{6\pi\mu a}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха;  $e$  – элементарный заряд;  $S_C$  – поправка скольжения [9]:

$$S_C = 1 + \frac{\lambda}{a} \left( 1.142 + 0.558 \exp \left( -\frac{0.999a}{\lambda} \right) \right), \quad (3)$$

где длина свободного пробега  $\lambda = 67,3$  нм.

**Табл. 1** Параметры трех-модального распределения частиц по размерам.

| Номер моды | Средний диаметр (нм) | Стандартное отклонение | Модальная доля |
|------------|----------------------|------------------------|----------------|
| 1          | 225                  | 1.2                    | 0.755          |
| 2          | 335                  | 1.25                   | 0.242          |
| 3          | 1000                 | 2                      | 0.003          |

После смешения выходного потока (0,3 л/мин) анализатора с потоком чистого воздуха (0,7 л/мин), проба частиц с подвижностью  $B_0$  поступала в лазерный аэрозольный спектрометр ЛАС-П [10]. Многоканальный спектрометр ЛАС-П с каналами (мкм): 0,15-0,2; 0,2-0,25; 0,25-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,7; 0,7-1,0; 1,0-1,5; >1,5 позволяет определить распределение частиц с подвижностью  $B_0$  по размеру при их концентрации в потоке пробы (1л/мин) до  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Максимальные относительные ошибки в определении объема пробы, размера и концентрации частиц составляли  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$  соответственно. Для очистки ограждающего потока воздуха использовались фильтры Петрянова с эффективностью улавливания не менее 99,99% для частиц с размером 0,15 – 0,2 мкм.

**Экспериментальные результаты.** Сварочный аэрозоль, образующийся при сварке металлов электродами УОНИ 13/55, имеет трех-модальное распределение частиц по размерам [11], где первые две моды представляют собой агломераты первичных частиц разной морфологии, и третья мода – частицы дезинтеграции. Каждая мода описывается логнормальной функцией плотности вероятности,

$$f_d = \frac{1}{d\sqrt{2\pi} \ln \sigma_d} \exp \frac{-(\ln d - \ln d_m)^2}{2 \ln^2 \sigma_d}, \quad (4)$$

где  $\sigma_d$  – стандартное отклонение;  $d_m = \bar{d} \exp(-\ln^2 \sigma_d / 2)$  – медиана распределения;  $\bar{d}$  – средний диаметр частиц.

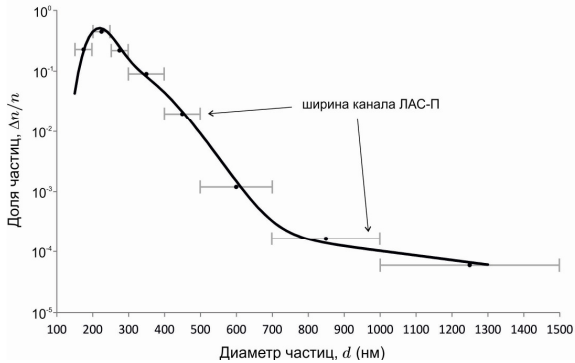
Начальное распределение частиц (без зарядки и классификации в DMA) описывается суммой функций (4) с соответствующими модальными долями:

$$f_d^{Total} = N_1^{In} f_{d1} + N_2^{In} f_{d2} + N_3^{In} f_{d3}, \quad N_1^{In} + N_2^{In} + N_3^{In} = 1. \quad (5)$$

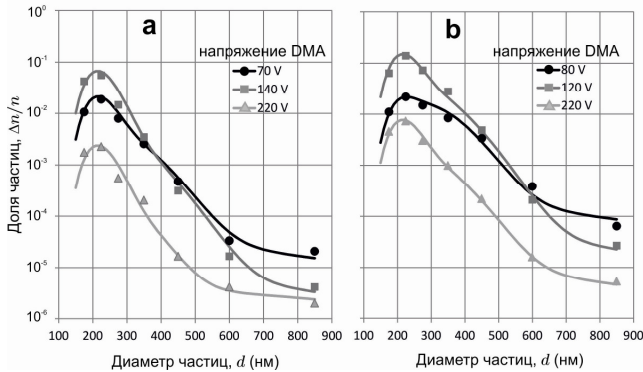
Параметры мод рассматриваемого сварочного аэрозоля представлены в табл.1. На рис.3 представлено распределение (5) с этими параметрами [7].

Зарядка частиц в ионизаторе не влияет на это распределение. Общее распределение, полученное суммированием числа частиц в каждом канале ЛАС-П для всех напряжений DMA, совпадает с начальным распределением, т.е. потери частиц на осаждение в ионизаторе и DMA находятся в пределах ошибки измерения.

При каждом значении напряжения между электродами DMA в его выходном потоке содержатся частицы с подвижностью (1), которая соответствует приложенному напряжению. Частицы сварочного аэрозоля разных размеров



**Рис.3** Распределение частиц сварочного аэрозоля электродов УОНИ 13/35 по размерам: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация уравнением (5).



**Рис.4** Распределения частиц по размерам для отрицательной (а) и положительной (б) короны: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация уравнением (5) с модальными долями  $N_i(U_j)$ .

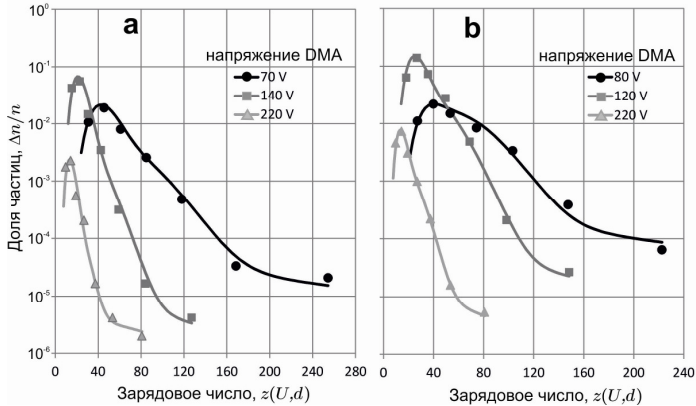
могут иметь одинаковую электрическую подвижность, так как могут нести разные заряды. Распределение этих частиц по размеру также описывается функцией (5), но с собственными модальными долями для каждого напряжения DMA  $N_i(U_j)$ . Такие распределения для трех значений напряжения DMA представлены на рис.4 для отрицательной и положительной короны. Аппроксимация экспериментальных данных на рис.4 получена путем подбора модальных долей в распределении (5) при условии,

$$\sum_j N_1(U_j) = N_1^{in}, \quad \sum_j N_2(U_j) = N_2^{in}, \quad \sum_j N_3(U_j) = N_3^{in}; \quad (6)$$

где  $N_i^{in}$  – модальные доли из табл.1,  $U_j$  – напряжение DMA.

**Табл.2** Модальные заряды для отрицательной короны и 2 напряжений DMA.

| Напряжение DMA: |                 | 70 В                |                 | 140 В               |                 |
|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Номер моды      | Средний диаметр | Модальная доля      | Зарядовое число | Модальная доля      | Зарядовое число |
| 1               | 225 нм          | $3,8 \cdot 10^{-2}$ | 46              | $1,1 \cdot 10^{-1}$ | 23              |
| 2               | 335 нм          | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | 80              | $6,4 \cdot 10^{-2}$ | 40              |
| 3               | 1000 нм         | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | 306             | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 153             |



**Рис.5.** Распределения частиц по зарядам для отрицательной (а) и положительной (б) короны: точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация уравнением (5) с модальными долями  $N_i(U_j)$ .

Каждому каналу ЛАС-П со средним диаметром частиц  $d$  и каждому напряжению DMA  $U$  соответствует заряд частиц, который можно получить из уравнений (1) и (2):

$$z(U, d) = \frac{3\mu Q_s d}{2eS_c L U} \ln \frac{R_2}{R_1}. \tag{7}$$

Поэтому, значения заряда (7) для каждого напряжения DMA могут быть отложено на оси абсцисс рис.4 вместо диаметра частиц. Таким образом, распределение частиц по размерам можно заменить распределением частиц по зарядам. Такие распределения представлены на рис.5.

Аппроксимация полученных с помощью ЛАС-П данных с применением условия (6) позволяет построить зависимость модальных долей от напряжения DMA  $N_i(U_j)$ . Результаты такой аппроксимации могут быть представлены как распределение модальных долей по зарядам, т.к. каждому среднему размеру моды  $\bar{d}_i$  и каждому напряжению DMA  $U_j$  соответствует определенный заряд (7). Например, в табл.2 приведены модальные доли и соответствующие значе-

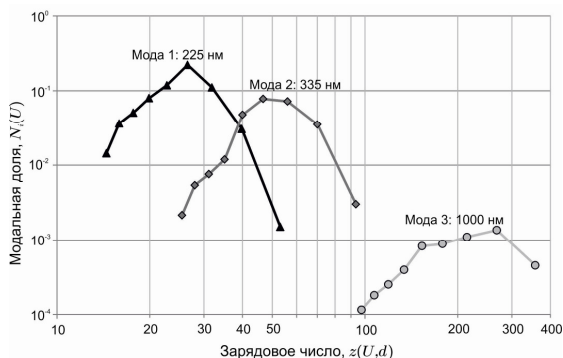


Рис.6 Зависимость модальных долей от заряда частиц для положительной короны.

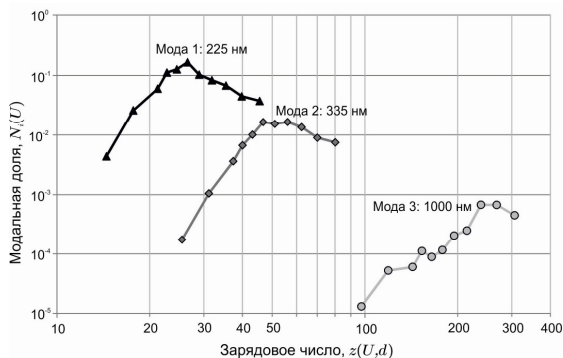


Рис.7 Зависимость модальных долей от заряда частиц для отрицательной короны.

ния заряда, которые описывают кривые рис.4(а) и рис.5(а), соответствующие напряжению DMA 70 В и 140 В.

В результате подбора модальных долей, согласно указанной методике, для всех измерений можно построить распределения по зарядам для каждой моды исходного распределения частиц сварочного аэрозоля по размерам, которые представлены на рис.6 для положительной короны и на рис.7 для отрицательной короны.

Таким образом, предложенный метод измерения и обработки данных позволяет построить распределения частиц по зарядам без использования какой-либо теории зарядки частиц.

**Заключение.** Совмещение анализатора подвижности и лазерного аэрозольного спектрометра в единый измерительный комплекс позволяет расширить возможности метода дифференциальной электрической подвижности аэрозольных частиц и построить распределение частиц по зарядам, не привлекая для этого теории зарядки частиц. Необходимая для этого методика обработки



экспериментальных данных довольно трудоемка, но дает однозначный результат.

Предложенная методика измерений позволяет провести анализ эффективности зарядки частиц сварочного аэрозоля в электрическом поле коронного разряда и обосновать оптимизацию конструктивных параметров малогабаритных электрофильтров. Это крайне важно для обеспечения нормированных условий труда сварщиков, поскольку малогабаритные электрофильтры идеально подходят для улавливания токсичного сварочного аэрозоля, если воздух должен быть возвращен в рабочую зону.

### Литература:

1. *Lawless P.A., Sparks L.E.* Modeling particulate charging in ESPs // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – V. 24. – P.922-925.
2. *Intra P., Tippayawong N.* An overview of unipolar charger developments for nanoparticle charging. // Aerosol and Air Quality Research. – 2011. – V. 11. – P.187-209.
3. *Baron P.A., Willeke K.,* Eds. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications (2nd ed). – NY: Wiley-Interscience. – 2001.
4. *Hinds W.C.* Aerosol Technology. – NY: John Wiley & Sons. – 1999.
5. *Oh H., Park H., Kim S.* Effects of particle shape on the unipolar diffusion charging of nonspherical particles. // Aerosol Science and Technology. – 2004. – V. 38. – P.1045–1053.
6. *Hoppel W.A., Frick G.M.* Ion-aerosol attachment coefficients and the steady-state charge distribution on aerosols in a bipolar ion environment. // Aerosol Science and Technology. – 1986. – V. 5. – P.1-21.
7. *Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A.* Charge distribution of welding fume particles after charging by the corona ionizer // Journal of Aerosol Science. – 2015.
8. *Knutson E.O., Whitby K.T.* Aerosol classification by electric mobility: apparatus, theory, and applications. // Journal of Aerosol Science. – 1975. – V. 6. – P.443-451.
9. *Allen M.D., Raabe O.G.* Slip correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved Millikan apparatus // Aerosol Science and Technology. – 1985. – V. 4. – P.269-286.
10. Лазерный аэрозольный спектрометр (ЛАС-П) модель 9814.290.000. – Москва: Институт физической химии им. Карпова. – 2010.
11. *Ennan A.A., Kiro S.A., Oprya M.V., Vishnyakov V.I.* (2013). Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding // Journal of Aerosol Science. – 2013. – V. 64. – P.103-110.

**Вишняков В.І., Кіро С.А., Опря М.В., Еннан А.А.**

**Уніполярна зарядка частинок зварювального аерозолю і їх розподіл по зарядам.**

АНОТАЦІЯ

*Вимірювальний комплекс, що містить аналізатор електричної рухливості частинок і лазерний аерозольний спектрометр, запропонований для визначення розподілу по зарядах аерозольних частинок, уніполярно заряджених в коронному розряді. Запропонована процедура обробки експериментальних даних, яка не вимагає використання теорії зарядки частинок. Продемонстровані розподіли по розмірах і зарядах заряджених в іонізаторі малогабаритного електрофільтру частинок зварювального аерозоля.*

**Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A.**

**Unipolar charging of welding fume particles and their charge distribution.**

SUMMARY

*The experimental technique including the differential mobility analyzer and laser aerosol spectrometer is proposed for determining the charge distribution of aerosol particles charging by the corona discharge. The procedure of the experimental data processing, which does not require any theory of particle charging, also proposed. The welding fume particle size and charge distributions based only on the experimental data are demonstrated.*