Л.В. Депутатова, Л.М. Василяк, В.И. Владимиров, Д.С. Лапицкий, В.Я. Печеркин, Р.А. Сыроватка, В.С. Филинов

Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздухе

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2; syrovatkara@gmail.com

В работе проведено исследование зарядки частиц полидисперсного порошка Al_2O_3 в коронном разряде. Размеры частиц составляли от 4 до 50 мкм. Для частиц такого размера основным механизмом зарядки является ударная зарядка. В этом случае заряд частиц пропорционален напряженности электрического поля и квадрату размера частицы.

Использовалась следующая конфигурация коронного разряда. Высокое напряжение подавалось на решетку из пяти вертикально ориентированных электродов из вольфрамовой проволоки диаметром 70 мкм. Расстояние между электродами составляло 1 см. По обе стороны от коронирующих электродов находились решетки заземленных электродов из стальных стержней диаметром 3 мм. Конструкция была смонтирована в канале квадратного сечения 6х6 см.

Зарядка частиц производилась при напряжении на коронирующих электродах, равном 18,5 кВ. Ток коронного разряда составлял 380 мкА для положительной короны и 705 мкА для отрицательной короны.

С помощью линейной электродинамической ловушки измерялись заряды и массы отдельных частиц. Размеры частиц находились в диапазоне от 19,3 мкм до 35,4 мкм. Заряды частиц находились в диапазоне от $3,53 \cdot 10^5$ е до $12,4 \cdot 10^5$ е. Было выяснено, что частицы заряжались в поле напряженностью от 10 кВ/см до 20 кВ/см. Эффективность зарядки была несколько выше в случае зарядки в положительном коронном разряде. С помощью плоского конденсатора измерялись средние значения размеров и зарядов частиц. Средний размер частиц составил 34 мкм. Средние заряды частиц составляли $4,21 \cdot 10^5$ е, $5,65 \cdot 10^5$ е и $5,84 \cdot 10^5$ е в случае напряжения коронного разряда 13 кВ, 15 кВ и 18,5 кВ соответственно.

Ключевые слова: кулоновские структуры, зарядка частиц, электродинамическая ловушка, коронный разряд.

Методы получения заряда на частицах микронного размера

Наиболее распространены три метода зарядки частиц: в коронном разряде, индукционная зарядка и трибозарядка.

Зарядка в коронном разряде

Заряд, приобретаемый частицей в коронном разряде, зависит от ее размера, относительной диэлектрической проницаемости, напряженности электрического поля и концентрации ионов. Существует два основных механизма зарядки частиц в коронном разряде: ударная зарядка и диффузионная зарядка. Диффузионная зарядка становится пренебрежимо малой для частиц больше 1 мкм [1].

Ударная зарядка представляет собой бомбардировку частицы ионами, движущимися под действием электрического поля. Если незаряженная сферическая частица помещается в однородное электрическое поле напряженностью E , некоторые силовые линии электрического поля пересекают поверхность частицы. Ионы, движущиеся вдоль этих силовых линий, падают на частицу. Таким образом, частица начинает заряжаться. Заряжаясь, частица искажает внешнее электрическое поле и область пространства, из

которой ионы попадают на частицу, уменьшается вплоть до прекращения зарядки (рисунки 1). Максимальный заряд частицы определяется следующим образом [2]:

$$q_{\max} = 3\pi\epsilon_0 E d^2 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right),$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, E – напряженность электрического поля коронного разряда, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы.

Рис. 1. Электрическое поле около незаряженной и частично заряженной частицы
Динамика зарядки частицы выражается следующим образом:

$$q = q_{\max} \frac{\pi k e n_i t}{1 + \pi k e n_i t},$$

где k – коэффициент пропорциональности в законе Кулона, e – элементарный заряд, n_i – концентрация ионов, t – время зарядки. Характерное время зарядки частиц составляет несколько миллисекунд [2].

Реальные пылевые частицы не обязаны иметь гладкую поверхность. Острые грани частицы могут начать коронировать, что приведет к потере заряда. Кроме того, частица может потерять заряд при столкновении с частицами, заряженными противоположным зарядом. Этот случай может реализоваться, например, при зарядке в биполярном коронном разряде [3].

Индукционная зарядка

Если проводящая частица контактирует с проводящей поверхностью, то носители заряда противоположного знака притягиваются к поверхности и стекают на нее. После этого частица, как правило, отталкивается от поверхности, поскольку приобретает заряд того же знака, что и поверхность. Индукционная зарядка частицы описывается выражением [4]:

$$q = C_p V \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{\Omega_p C_p} \right) \right),$$

где C_p – емкость частицы, V – электрический потенциал, t – время зарядки частицы, Ω_p – эквивалентное полное сопротивление частицы.

Трибозарядка

Явление возникновения электрических зарядов при трении носит название трибоэлектричества. Трибоэлектричество наблюдается при взаимном трении двух диэлектриков, полупроводников или металлов различного химического состава или одинакового состава, но разной плотности, при трении металлов о диэлектрики, при трении двух одинаковых диэлектриков, при трении жидких диэлектриков друг о друга или о поверхность твердых тел и др. При этом электризуются оба тела; их заряды одинаковы по величине и противоположны по знаку.

В случае контакта двух проводников заряд перераспределяется до уравнивания уровней Ферми. Величина заряда в этом случае определяется выражением $q = V_0 C_0$, где V_0 – контактная разность потенциалов, C_0 – контактная емкость, зависящая от топографии соприкасающихся поверхностей. Эту емкость можно считать равной емкости двух гладких поверхностей, разнесенных на расстояние, равное средней высоте микровыступов [5].

В случае контакта проводника и диэлектрика зарядка диэлектрика происходит на поверхности. Перенос заряда происходит достаточно быстро [6] (порядка нескольких микросекунд) посредством туннелирования электронов между проводником и поверхностными состояниями в диэлектрике в непосредственной близости от точки контакта. Поверхностные состояния действуют как «ловушки» и обеспечивают накопление электронов [7]. Обратное туннелирование пренебрежимо мало, если поверхность имеет не очень большой заряд [8].

Целью работы являлось исследование зарядки микронных частиц в коронном разряде положительной и отрицательной полярности.

Определение заряда, приобретенного частицами в коронном разряде

Устройство коронатора

В работе применялся коронатор, представляющий собой решетку коронирующих и две решетки заземленных электродов, смонтированных в канале квадратного сечения со сторонами 6 см (рисунок 2). Коронирующие электроды были выполнены из вольфрамовой проволоки диаметром 70 мкм и расположены на расстоянии 1 см друг от друга. Заземленные электроды были выполнены из металлических стержней диаметром 3 мм, расстояние между осями электродов составляло 1 см. Расстояние между сечениями, в которых располагались коронирующие и заземленные электроды, составляло 13 мм.

Рис. 2. Схема коронатора: 1 – решетки заземленных электродов, 2 – решетка коронирующих электродов, $L_e=1$ см, $L_g=1$ см, $R_0=25$ Мом

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика коронатора; ● –отрицательная корона, + – положительная корона

Заряд частиц определялся с помощью линейной электродинамической ловушки [9]. Подробное описание используемого метода измерения заряда дано в работе [10]. В работе использовался полидисперсный порошок Al_2O_3 .

Результаты измерений заряда

Измерения заряда производились для зарядки частиц в отрицательном и положительном коронном разряде. В обоих случаях напряжение коронного разряда было равным 18,5 кВ. Ток составлял 380 мкА для положительного коронного разряда и 705 мкА для отрицательного коронного разряда. Результаты измерений заряда и массы частиц представлены в таблицах 1 и 2, где δ_m – относительная погрешность измерения массы, δ_q – относительная погрешность измерения заряда. Рисунок 4 иллюстрирует представленные в таблицах данные.

Таблица 1. Результаты измерений заряда и массы частиц в случае зарядки в положительном коронном разряде.

d , мкм	m , 10^{-8} г	δ_m , %	q , 10^5 е	δ_q , %	q/m , 10^{13} е/г
19,3	1,50	4,2	3,53	16	2,35
21,4	2,05	4,2	3,76	14	1,83
23,4	2,68	8,0	5,30	16	1,98
28,6	4,93	4,7	6,28	12	1,27
38,6	12,1	5,5	12,4	10	1,02
Среднее отношение заряда к массе					1,69

Таблица 2. Результаты измерений заряда и массы частиц в случае зарядки в отрицательном коронном разряде.

d , мкм	m , 10^{-8} г	δ_m , %	q , 10^5 е	δ_q , %	q/m , 10^{13} е/г
22,6	2,41	6,2	4,29	13	1,78
24,2	2,93	4,1	6,61	15	2,26
29,2	5,15	6,7	4,80	9,5	0,93
29,8	5,50	3,6	5,21	7,9	0,95
35,4	9,19	5,2	7,83	11	0,85
Среднее отношение заряда к массе					1,35

Эффективность зарядки в положительном и отрицательном коронном разряде можно сравнить по среднему отношению заряда к массе частиц, которые равны $1,69 \cdot 10^{13}$ е/г для положительной и $1,35 \cdot 10^{13}$ е/г для отрицательной короны. Можно видеть, что в положительном коронном разряде частицы приобретают больший заряд.

Рис. 4. Результаты измерений заряда и массы частиц; * – зарядка в отрицательной короне, $\square$ – зарядка в положительной короне. Линии обозначают рассчитанный максимальный заряд, который частица получает в поле напряженностью 10 и 20 кВ/см

Метод измерения заряда с помощью конденсатора проиллюстрирован рисунком 5. В секции воздушного тракта на верхней и нижней стенке находились металлические пластины толщиной 0,75 мм и длиной 10 см, которые являлись обкладками конденсатора. Расстояние между пластинами l составляло 6 см. На верхнюю обкладку подавался электрический потенциал, совпадающий по знаку с зарядом пылевых частиц, равный 10 кВ. Нижняя обкладка была заземлена. Траектория частиц фиксировалась с помощью цифровой видеокамеры.

Пролетая через конденсатор, частицы отклонялись вверх. На рисунке 6 представлен один из кадров видеосъемки. Треки соответствуют времени выдержки. Длина трека позволяет оценить вертикальную и горизонтальную скорость микрочастицы. Ускорение частицы a оценивалось через разность конечной скорости v_{end} и начальной скорости частицы v_{start} . Скорость v_{start} определялась первым треком частицы при попадании микрочастицы в область регистрации. Конечная скорость частицы v_{end} определялась предпоследним треком этой же микрочастицы перед ее попаданием на верхнюю пластину конденсатора.

Рис. 5. Схема эксперимента по измерению заряда пылевых частиц в электрическом поле плоского конденсатора: 1 – заряженные частицы, 2 – лазерный луч, 3 – обкладки конденсатора, 4 – предметное стекло

Рис. 6. Треки заряженных микрочастиц в поле конденсатора. Отметками V_{start} и V_{end} отмечены зоны для оценки вертикальных составляющих скоростей частиц в начальный и конечный моменты времени. Напряженность электрического поля конденсатора E_{cap} составляла 1,57 кВ/см

Полученные данные по скоростям и ускорениям использовались для расчета зарядов пылевых частиц. Рассмотрим силы, действующие на частицы: сила тяжести $F_g = mg$; сила взаимодействия с полем конденсатора $F_{el} = qE_{cap}$; сила вязкого трения $F_{fr} = 3\pi\mu dv$, где μ – динамическая вязкость среды, d – размер частицы. Получим выражение для заряда частицы:

$$q = \frac{ma - mg - 3\pi\mu dv}{E_{cap}}.$$

В данном случае измерялся средний размер частиц, попадающих на предметное стекло (рисунок 4). Размеры частиц определялись с помощью микроскопа. Измерялись наибольший $d_{\max}$ и наименьший $d_{\min}$ размеры частиц. Эффективный размер вычислялся следующим образом: $d = (d_{\max} + d_{\min})/2$. Средний размер частиц был равен 34 мкм.

Результаты измерений заряда частиц с помощью конденсатора представлены в таблице 3. Измерения производились при трех значениях напряжения коронного разряда U : 13 кВ, 15 кВ и 18,5 кВ.

Таблица 3

Заряды частиц, измеренные с помощью конденсатора

Измерение №	$q, 10^5 \text{ е},$ $U = 13 \text{ кВ}$	$q, 10^5 \text{ е},$ $U = 15 \text{ кВ}$	$q, 10^5 \text{ е},$ $U = 18,5 \text{ кВ}$
1	4,42	6,29	8,48
2	3,18	4,02	7,94
3	2,33	5,17	3,10
4	5,51	4,84	3,72
5	5,54	10,04	5,28
6	5,15	4,42	6,73
7	4,41	3,49	2,63
8	3,42	5,71	9,06
9	3,83	5,58	10,11
10	5,46	5,70	4,92
11	4,37	5,19	3,49
12	4,00	7,10	5,46
13	4,18	4,73	5,74
14	3,09	6,86	5,13
Средний заряд	4,21	5,65	5,84

Заключение

В работе было проведено исследование зарядки полидисперсного порошка Al_2O_3 в многоэлектродном коронаторе. С помощью линейной электродинамической ловушки измерялись заряды и массы отдельных частиц. Размеры частиц находились в диапазоне от 19,3 мкм до 35,4 мкм. Заряды частиц находились в диапазоне от $3,53 \cdot 10^5 \text{ е}$ до $12,4 \cdot 10^5 \text{ е}$. Было выяснено, что частицы заряжались в поле напряженностью от 10 кВ/см до 20 кВ/см. Эффективность зарядки была несколько выше в случае зарядки в положительном коронном разряде. С помощью плоского конденсатора измерялись средние значения размеров и зарядов частиц. Средний размер частиц составил 34 мкм. Средние заряды частиц составляли $4,21 \cdot 10^5 \text{ е}$, $5,65 \cdot 10^5 \text{ е}$ и $5,84 \cdot 10^5 \text{ е}$ в случае напряжения коронного разряда 13 кВ, 15 кВ и 18,5 кВ соответственно.

Литература

1. Liu B.Y.H., Yeh H. On the Theory of Charging of Aerosol Particles in an Electric Field // J. Appl. Phys. – 1968. – V. 39. – P. 1396–1402.
2. Gaudin A.M. The Principles of Electrostatic Processing with Particular Application to Electrostatic Separation // Miner. Sci. Engng. – 1971. – V. 3. – P. 46–57.
3. Kimoto S., Mizota K., Adachi M. Theoretical and Experimental Evaluation of a Mixing-Type Bipolar Charger Using Corona-Discharge at High Pressure // J. Chem. Eng. Japan. – 2011. – V. 44, № 8. – P. 535–545.
4. Bartelemy R.E. and Mora R.G. Electrical High Tension Minerals Benefication: Principles and Technical Aspects // Paper 36 in Vth Int. Min. Proc. Congress. – 1960. – P. 757–773.

5. Zhang Y.Y., Shao T.M. A method of charge measurement for contact electrification // J. Electrostatics. – 2013. – V. 71, № 4. P. 712–716.
6. Grzybowski B.A., Fialkowski M., Wiles J.A. Kinetics of contact electrification between metals and polymers // J. Phys. Chem. B. – 2005. – V. 109, № 43. – P. 20511–20515.
7. Crowdry A. and Westgate C.R. The Role of Bulk Traps in Metal-Insulator contact Charging // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1974. – V. 7. P. 713–725.
8. Lowell J. Tunneling Between Metals and Insulators and its Role in Contact Electrification // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1979. – V. 12. – P. 1541–1554.
9. Vasilyak L.M., Vladimirov V.I., Deputatova L.V., et al. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air // New J. Phys. – 2013. – V. 15. – P. 043047.
10. Syrovatka R.A., et al. Charge and Mass Measurements of a Dust Particle in the Linear Quadrupole Trap // Contrib. Plasma Phys. – 2015. – V. 56, № 5. – P. 419–424.

Поступила в редакцию 13 октября 2016 г.

UDC 533.9.01

DOI: 10.21779/2542-0321-2016-31-4-41-48

The charging of microparticles in corona discharge in the air

**L.V. Deputatova, L.M. Vasilyak, V.I. Vladimirov, D.S. Lapitsky,
W.J. Peterkin, R.A. Syrovatka, V.S. Filinov**

*Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13;
bd.2; syrovatkara@gmail.com*

The study of a polydisperse Al_2O_3 particles charging in the corona discharge was carried out. Particle sizes were between 4 and 50 microns. For particles of this size the main charging mechanism is the impact charging. In this case the charge of the particles is proportional to an electric field and the square of a particle size.

The following configuration of the corona discharge was used. High voltage was applied to the five vertically oriented electrodes made of tungsten wire with a diameter of 70 microns. The distance between electrodes was 1 cm. On both sides of the discharge electrodes there were placed grounded electrodes made of steel rods with a diameter of 3 mm. The construction was mounted in a channel of square cross section 6x6 cm.

The charging of the particles was carried out at the corona discharge voltage of 18.5 kV. The discharge current was equal to 380 mA for positive corona discharge and 750 mA for negative corona discharge.

The measurements of the individual particles charge and mass were performed using a linear electrodynamic trap. According to the measurements the mass of the particles was in the range of 19.3 microns to 35.4 microns and the charge of the particles was in the range of $3.53 \cdot 10^5$ e to $12.4 \cdot 10^5$ e. Due to these measurements it was found that at the described conditions the particles gained charge in the electric field of 10 to 20 kV/cm. The charging efficiency was slightly higher in the case of positive corona discharge. The measurements of the average particle charge and mass were performed using a plate capacitor. The average particle size was equal to 34 microns. The average particle charges were $4.21 \cdot 10^5$ e, $5.65 \cdot 10^5$ e and $5.84 \cdot 10^5$ e in the case of the corona discharge voltage equal to 13 kV, 15 kV and 18.5 kV, respectively.

Keywords: *Coulomb structures, particle charging, electrodynamic trap, corona discharge.*

Received 13 October, 2016