

Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздушном потоке

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

Исследована зарядка частиц Al_2O_3 размером от 20 до 40 мкм в воздушном потоке, проходящем через область многоэлектродного коронного разряда. Коронный разряд создавался системой проволочных электродов, расположенных поперек потока. Измерение заряда и массы частиц производилось с помощью линейной электродинамической ловушки. Среднее отношение заряда к массе частиц, прошедших через коронный разряд при напряжении 18 кВ, составило $1,69 \times 10^{13}$ e/g для положительной полярности и $1,35 \times 10^{13}$ e/g для отрицательной.

Ключевые слова: коронный разряд, зарядка частиц, ударная зарядка, электродинамическая ловушка.

Введение

Зарядка микрочастиц широко применяется в электростатических фильтрах [1], используемых для очистки воздуха, в устройствах, служащих для определения дисперсионного состава аэрозолей, таких как дифференциальные анализаторы подвижности [2], в хроматографии [3] и в фотокопировании. Перспективным является использование заряженных частиц в медицинской практике при ингаляции лекарственных средств [4, 5]. В работе [6] отмечается, что наличие заряда существенно влияет на место осаждения аэрозоля в легких.

Для зарядки частиц в воздухе чаще всего применяют коронный разряд [7, 8]. В работе [9] описывается метод детектирования частиц, предварительно заряженных в коронном разряде.

В работе [10] рассматривается применения коронного разряда для создания упорядоченных структур из заряженных микрочастиц в виде т. н. кулоновского кристалла.

В коронном разряде реализуются два вида зарядки: диффузионная зарядка и ударная зарядка [11]. В случае ударной зарядки, которая играет определяющую роль для частиц с размерами больше 1 мкм, существенное влияние на величину заряда оказывает траектория частицы в области коронного разряда, что связано с неоднородностью электрического поля. В некоторых устройствах, таких как плазмохимические реакторы или электрофильтры, пылевые частицы остаются в коронном разряде, и их заряд будет зависеть от параметров разряда в том месте, где они находятся. В ряде устройств зарядка является некоторым предварительным этапом для их дальнейшего использования, поэтому важно знание зарядов частиц, прошедших через зону коронного разряда.

Целью данной работы являлось измерение заряда пылевых частиц микронного размера, прошедших в воздушном потоке через многоэлектродный коронный разряд, в зависимости от параметров разряда.

Схема эксперимента

Экспериментальная установка состояла из блока зарядки микрочастиц и блока измерения заряда на отдельных микрочастицах. Исследования проведены с полидисперсными частицами из Al_2O_3 . Функция распределения частиц по размеру представлена на рис. 1.

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Владимиров Владимир Иванович, старший научный сотрудник.

Депутатова Лидия Викторовна, старший научный сотрудник, к.т.н.

Лапицкий Дмитрий Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Печеркин Владимир Яковлевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Сыроватка Роман Александрович, научный сотрудник.

Филинов Владимир Сергеевич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Тел. +7 (915) 068-81-14. E-mail: syrovatkara@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12 июля 2017 г.

© Василяк Л. М., Владимиров В. И., Депутатова Л. В., Лапицкий Д. С., Печеркин В. Я., Сыроватка Р. А., 2017

Микрочастицы вбрасывались в воздушный поток в диэлектрическом канале квадратного сечения с размерами 6×6 см, в котором был реализован коронный разряд. После прохождения зоны коронного разряда, заряженные микрочастицы извлекались из потока и захватывались электродинамической ловушкой. Затем воздушный поток перекрывался, и измерялся заряд на отдельных частицах в ловушке.

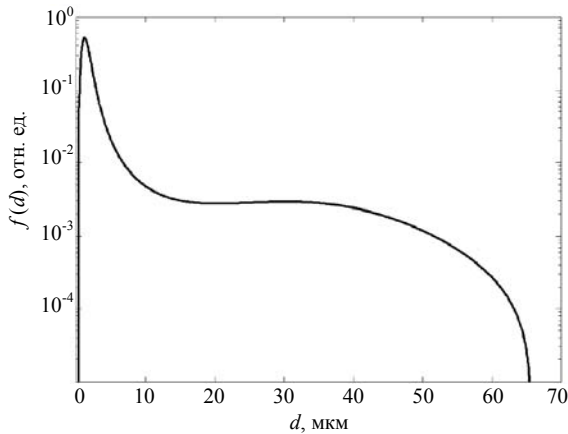


Рис. 1. Функция распределения частиц из Al_2O_3 по размеру.

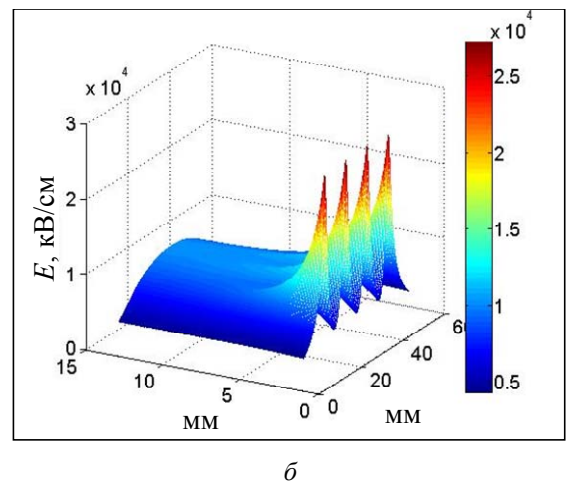
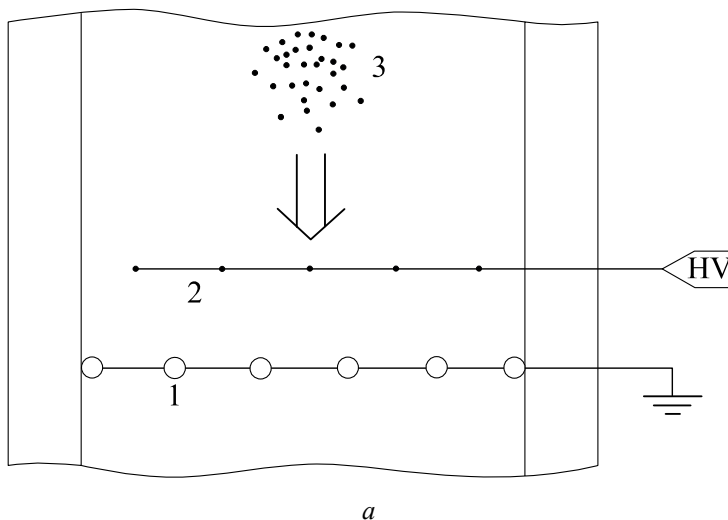


Рис. 2. Создание коронного разряда: а) схема блока зарядки микрочастиц в потоке в диэлектрическом канале: 1 – заземленные электроды, 2 – коронирующие электроды, 3 – пылевые частицы; стрелкой обозначено направление движения потока воздуха; б) распределение напряженности электрического поля E в области коронного разряда при напряжении 10 кВ.

Направленный поток ионов в коронном разряде создает электрический ветер. Скорость воздушного потока на оси канала достигала 1,5 м/с при напряжении на коронирующих электродах $U_c = 18$ кВ. В коронном разряде имеют место два основных механизма зарядки: диффузионная зарядка и ударная зарядка. Диффузионная зарядка преобладает при малых размерах частиц и небольшой напряженности электрического поля. Диффузионную зарядку необходимо принимать во внимание для частиц, размер которых можно оце-

Коронный разряд

Коронный разряд создавался системой проволочных электродов в виде двух решеток, которые размещались в канале квадратного сечения поперек воздушного потока (см. рис. 2, а). Одна решетка была заземлена, а на другую решетку подавалось высокое постоянное напряжение. Расстояние между заземленными и коронирующими электродами составляло 13 мм. Коронирующие электроды из вольфрамовой проволоки диаметром 70 мкм были расположены на расстоянии 10 мм друг от друга. Расстояние между осями заземленных электродов из металлических стержней диаметром 3 мм составляло 10 мм. На коронирующие электроды подавалось высокое постоянное напряжение (до 20 кВ) положительной или отрицательной полярности. Многоэлектродная конструкция использовалась для уменьшения пространственной неоднородности напряженности электрического поля в области коронного разряда во всем поперечном сечении воздушного канала. Расчеты напряженности электрического поля представлены на рис. 2, б.

нить с помощью следующего соотношения [11]: $d \ll 0,025/E_c$, где d – размер частиц, E_c – напряженность электрического поля в коронном разряде. Например, при $E_c = 5$ кВ/см диффузионный механизм является преобладающим для частиц размером $d \ll 50$ нм. В данной работе размер исследуемых частиц превышал 10 мкм, поэтому диффузионную зарядку не будем рассматривать.

Ударная зарядка заключается в бомбардировке поверхности частицы ионами, движущимися вдоль силовых линий электрического поля. Заря-

жаясь, частица своим полем искривляет силовые линии. Зарядка продолжается до тех пор, пока остаются силовые линии электрического поля, пересекающие поверхность частицы. Заряд q , приобретенный частицей при ударной зарядке, можно оценить по формуле, полученной М. Потенье [12]:

$$q = 3\pi\epsilon_0 E_c d^2 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(\frac{\pi k e n_i t}{1 + \pi k e n_i t}\right), \quad (1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная (в системе СИ), E_c – напряженность электрического поля коронного разряда, ϵ – диэлектрическая проницаемость материала частицы, k – подвижность ионов, n_i – концентрация ионов, t – время зарядки. В описанном выше коронном разряде концентрация ионов составляла порядка 10^9 см⁻³, поэтому частица заряжается до 90 % от максимальной величины заряда за время 0,01 с.

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики коронного разряда для положительной и отрицательной полярности напряжения. Сила тока отрицательного коронного разряда несколько выше, чем сила тока положительного коронного разряда. Пробой разрядного промежутка происходил при напряжении на коронирующих электродах 20 кВ при положительной полярности и 18,5 кВ при отрицательной полярности. Минимальное напряжение на коронном разряде составляло $U_c = 9$ кВ.

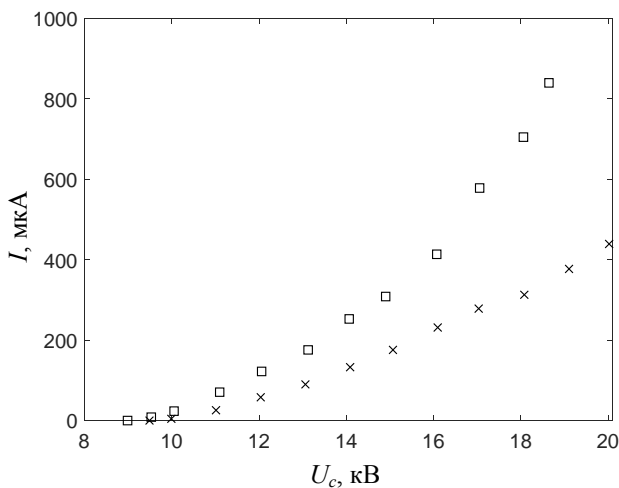


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики коронатора; \square – отрицательная корона, \times – положительная корона.

Измерение заряда и размера частицы

Воздушный поток с заряженными частицами проходил через вертикально ориентированную квадрупольную линейную электродинамическую ловушку, которая была расположена поперек потока. Заряженные частицы захватывались ловуш-

кой [13, 14], после чего воздушный поток прекращался. Для предотвращения падения частиц под действием гравитационной силы в нижнем конце ловушки был установлен дополнительный электрод сферической формы, на который подавался постоянный электрический потенциал. Все частицы, кроме одной, удалялись из ловушки с помощью наэлектризованного стеклянного стержня, и одиночная частица неподвижно висела над сферическим электродом, что видно на рис. 4.

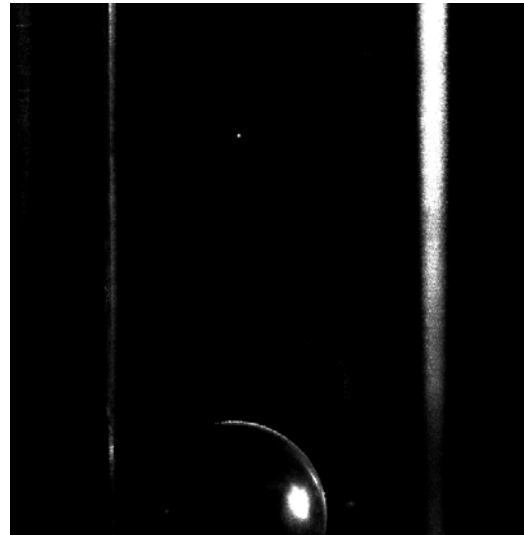


Рис. 4. Одиночная частица в электродинамической ловушке над сферическим электродом.

Размер и масса частицы рассчитывались из измеренной скорости ее падения в воздухе. Для этого шар заземлялся, и частица начинала падать под действием силы тяжести. Траектория падения частицы регистрировалась с помощью видеокамеры. Для определения скорости падения частицы измерялось расстояние от частицы до поверхности шара через равные промежутки времени 15 мс. В случае установившегося равномерного движения сила тяжести равна силе вязкости. Выражение для размера частицы d в предположении, что сила вязкости определяется законом Стокса, имеет вид:

$$d = \sqrt{\frac{9 \eta v}{2 g \rho}},$$

где η – динамическая вязкость воздуха, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность частицы, v – скорость частицы.

Для верификации метода использовались калиброванные микросферы из меламин-формальдегида диаметром 10 мкм. При измерениях вышеописанным методом был получен диаметр $d = 9,8 \pm 0,3$ мкм. Такая точность измерения размеров частиц была достаточной для наших экспериментов.

Заряд частицы q определялся, исходя из ее положения равновесия над сферическим электродом в неоднородном электрическом поле (см. рис. 4). Если частица в вертикально ориентированной электродинамической ловушке левитирует над заряженным шаром, то вес частицы уравновешен электрической силой, т.е. справедливо $mg = qE$.

Для определения заряда каждой частицы проводилась серия измерений расстояния частицы от центра шара при разных значениях потенциала U на шаре. Для определения напряженности электрического поля в точке нахождения частицы необходим численный расчет, несмотря на то, что электрическое поле, удерживающее частицу от падения, создается заряженным шаром. Необходимость в этом возникает из-за влияния заряда, индуцированного на стержнях электродинамической ловушки. Другими словами, расчет напряженности E по известной формуле для уединенного заряженного шара приводит к большой погрешности.

Чтобы убедиться в том, что заряд частицы не изменялся при проведении измерений, одиночная частица удерживалась в ловушке на протяжении трех часов. В течение этого времени расстояние l между частицей и шаром измерялось каждые 30 минут. Потенциал шара был равен 3 кВ. Результат измерений представлен на рис. 5. Изменения расстояния между заряженной частицей и шаром не превышали 0,2 %, что можно объяснить флуктуациями напряжения источника питания.

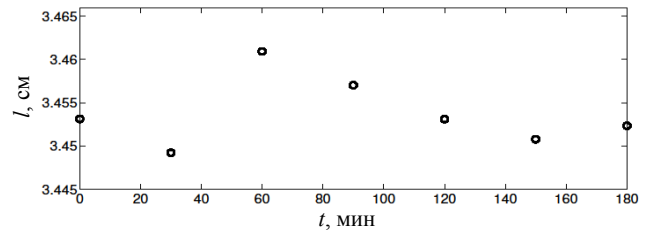


Рис. 5. Расстояние между частицей и шаром в течение длительного времени.

Измерения заряда производились для зарядки частиц в отрицательном и положительном коронном разряде при напряжении коронного разряда 18 кВ. Ток разряда был различным и составлял 380 мкА для положительного коронного разряда и 705 мкА для отрицательного. Результаты измерений заряда и массы частиц для различных полярностей коронного разряда представлены в табл. 1 и 2, где δ_m – относительная погрешность измерения массы, δ_q – относительная погрешность измерения заряда. Рис. 6 иллюстрирует представленные в таблицах данные.

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

Таблица 1

Результаты измерений заряда и массы частиц в случае их 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 |
| Средний заряд | | | | | 1,69 |

Таблица 2

Результаты измерений заряда и массы частиц в случае их 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 |
| Средний заряд | | | | | 1,35 |

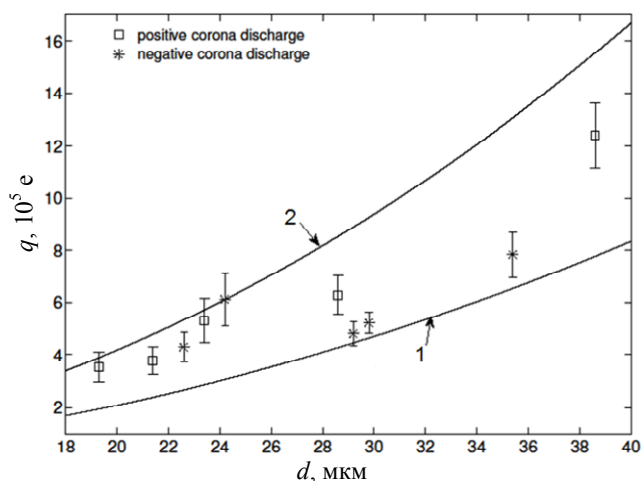


Рис. 6. Результаты измерений заряда и массы частиц. Линии обозначают рассчитанный по формуле (1) максимальный заряд, который частица может получить в поле напряженностью 10 кВ/см (линия 1) и 20 кВ/см (линия 2).

На рис. 6 линиями обозначен максимальный заряд, рассчитанный по формуле (1), до которого частица может зарядиться посредством ударной зарядки в поле напряженностью 10 и 20 кВ/см. Полученные экспериментальные данные о зарядах частиц согласуются с характерными значениями напряженности электрического поля для используемого коронного разряда.

Заключение

В работе проведены измерения заряда и размера частиц Al_2O_3 размером от 20 до 40 мкм после прохождения ими области многоэлектродного коронного разряда. Для верификации метода измерения размера использовались калиброванные сферические частицы меламин-формальдегида диаметром 10 мкм. Измеренный размер оказался равен $9,8 \pm 0,3$ мкм, что позволяет сделать вывод о хорошей точности метода. При напряжении 18 кВ

среднее значение отношения заряда к массе частиц составило $1,69 \times 10^{13}$ е/г для положительной и $1,35 \times 10^{13}$ е/г для отрицательной короны. Эффективность зарядки частиц несколько выше в положительном коронном разряде, ток которого, как следует отметить, почти в два раза меньше тока отрицательного коронного разряда при том же напряжении. При этом частицы заряжались в области коронного разряда с напряженностью электрического поля от 10 до 20 кВ/см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miller A., Frey G., King G., Sunderman C. // Aerosol Sci. Tech. 2010. Vol. 44. No. 6. P. 417.
2. Zhi Ning, Chan K. L., Wong K. C., Westerdahl D., Močnik G., Zhou J. H., Cheung C. S. // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 80. P. 31.
3. Jia S., Li J., Yunusova N., Park J. H., Kwon S. W., Lee J. // Phytochemical Analysis. 2013. Vol. 24. No. 4. P. 374.
4. Golshahi L., Longest W., Holbrook L., Snead J., Hindle M. // Pharm. Res. 2015. Vol. 32. No. 9. P. 3007.
5. Balachandran W., Machowski W., Gaura E., Hudson C. // J. Electrostatics. 1997. Vol. 40. P. 579.
6. Kulon J., Balachandran W. // J. Electrostatics. 2003. Vol. 51. P. 552.
7. Qi C., Kulkarni P. // Aerosol Sci. Tech. 2013. Vol. 47. No. 1. P. 81.
8. Intra P. // J. Electrostatics. 2002. Vol. 70. No. 1. P. 136.
9. Ligor M., Studzińska S., Horna A., Buszewski B. // Crit. Rev. Anal. Chem. 2013. Vol. 43. No. 2. P. 64.
10. Sinkevich O. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Fortov V. E., Naumkin V. N., Vladimirov V. I., Meshakin V. I., Rykov V. A. // High Temp. 2012. Vol. 50. No. 1. P. 1.
11. Верецагин И. П., Левитов В. И., Мирзабекян Г. З., Пашин М. М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974.
12. Pauthenier M., Moreau-Hanot M. // Journal de Physique et le Radium. 1932. Vol. 3. P. 590.
13. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. // NJP. 2013. Vol. 15. P. 043047.
14. Лапицкий Д. С., Сыроватка Р. А., Василяк Л. М., Филинов В. С., Депутатова Л. В., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 88.

PACS: 52.80.Hc

Charging of micro-particles of the air flow in the corona discharge

L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova, D. S. Lapitsky,
V. Ya. Pecherkin, R. A. Syrovatka, and V. S. Filinov

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: syrovatkara@gmail.com

Received July 12, 2017

Charging of the Al_2O_3 microparticles with the sizes from 20 to 40 microns in a gas flow passing through the multi-electrode corona discharge was investigated. The corona discharge was created by

a system of wire electrodes disposed across the gas flow. Measurements of the particles charge and mass were performed using the linear electrodynamic trap. The average charge-to-mass ratio of the particles charged in the positive corona discharge at a voltage of 18 kV was equal to 1.69×10^{13} e/g while in the case of charging in the negative corona discharge the average charge-to-mass ratio was equal to 1.35×10^{13} e/g.

Keywords: corona discharge, particle charging, impact charging, electrodynamic trap.

REFERENCES

1. A. Miller, G. Frey, G. King, and C. Sunderman, *Aerosol Sci. Tech.* **44**, 417 (2010).
2. Zhi Ning, K.L. Chan, K.C. Wong, D. Westerdahl, G. Močnik, J.H. Zhou, and C.S. Cheung, *Atmospheric Environment* **80**, 31 (2013).
3. S Jia, J. Li, N. Yunusova, J.H. Park, S.W. Kwon, and J. Lee, *Phytochemical Analysis* **24**, 374 (2013).
4. L. Golshahi, W. Longest, L. Holbrook, J. Snead, and M. Hindle, *Pharm. Res.* **32**, 3007 (2015).
5. W. Balachandran, W. Machowski, E. Gaura, and C. Hudson, *J. Electrostatics* **40**, 579 (1997).
6. J. Kulon and W. Balachandran, *J. Electrostatics* **51**, 552(2003).
7. C. Qi and P. Kulkarni, *Aerosol Sci. Tech.* **47**, 81 (2013).
8. P. Intra, *J. Electrostatics* **70**, 136 (2002).
9. M. Ligor, S. Studzińska, A. Horna, and B. Buszewski, *Crit. Rev. Anal. Chem.* **43**, 64 (2013).
10. O. A. Sinkevich, L. V. Deputatova, V. S. Filinov, V. E. Fortov, V. N. Naumkin, V. I. Vladimirov, V. I. Meshakin, and V. A. Rykov, *High Temp.* **50**, 1 (2012).
11. I. P. Vereshchagin, V. I. Levitov, G. Z. Mirzabekyan, and M. M. Pashin, *Foundations of Electrogas-dynamics of Disperse Systems* (Energiya, Moscow, 1974) [in Russian].
12. M. Pauthenier and M. Moreau-Hanot, *Journal de Physique et le Radium.* **3**, 590 (1932).
13. L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova, D. S. Lapitsky, V. I. Molotkov, V. Ya. Pecherkin, V. S. Filinov, and V. E. Fortov, *NJP*, **15**, 043047(2013).
14. D. S. Lapitsky, R. A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, V. S. Filinov, L. V. Deputatova, V. I. Vladimirov, and V. Ya Pecherkin, *Prikladnaya Fizika (Applied Physics)*, No. 6, 81 (2015).