

УДК 004.9:621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ КОРОННОГО РАЗРЯДА В УСТРОЙСТВАХ СЕПАРАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**Костюкова Т.П., Саубанов В.С.***ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Уфа, e-mail: ktp@ufanet.ru*

В статье представлена концепция использования электростатических полей коронного разряда для сепарации фракций различных сыпучих материалов. Показаны недостатки существующих методов исследования коронного разряда и его применений в электронно-ионных технологиях. Приведена математическая модель зарядки частиц различной физической природы и их движения в двухмерной системе координат в произвольной точке межэлектродного пространства. Данная система решена численным методом конечных элементов в среде MicroCAP. По результатам исследования заряда частиц с различной диэлектрической проницаемостью получены практические зависимости изменения напряжения от расстояния до электрода. Показаны графики соотношения электрических сил и сил тяжести сферической частицы с различной физической природой от относительного размера межэлектродного расстояния. Таким образом, представленная методика позволяет исследовать поведение частиц различной физической природы, формы, и размеров в поле коронного разряда и дает рекомендации на разделение материалов по различным критериям.

Ключевые слова: сепарация, коронный разряд, электростатическое поле, моделирование, материалы различной физической природы, практическая реализация

MODELING ELECTROSTATIC FIELD CORONA IN THE DEVICE OF THE SEPARATION BULK MATERIALS**Kostuykova T.P., Saubanov V.S.***Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: ktp@ufanet.ru*

This article introduces the concept of using electrostatic field of corona discharge for the separation of fractions of different bulk materials. The drawbacks of existing methods for studying the corona and its applications in electro-ion technology. The mathematical model of the charge of the particles of different physical nature and their movements in a two-dimensional coordinate system at an arbitrary point of the interelectrode space. This system is solved by a numerical method of final elements in the environment of MicroCAP. According to a study of the particles of the charge with a different dielectric constant obtained practical depending on voltage changes of the distance to the electrode. Schedules of a ratio of electric forces and gravity of a spherical particle with various physical nature from the relative size of interelectrode distance are shown. Thus, the presented method allows to study the behavior of particles of different physical nature, shapes, and sizes in the corona and makes recommendations on the division of materials on various criteria.

Keywords: separation, corona discharge, electrostatic field, simulation, materials of various physical nature, the practical realization

Электронно-ионные технологии, одной из разновидностью которых является электросепарация диспергированных материалов, – наиболее применяемые виды технологий, основанные на физическом воздействии силовых электрических полей на отдельные частицы практически любого вещества. Такие технологии – сложнейшие явления, и в то же время они обеспечивают множество полезных и перспективных воздействий на частицы с различной физической природой. Важнейшими отличиями таких процессов являются высокое быстродействие, эффективность и технологичность, низкое потребление управляющей энергии, а также отсутствие вредных выбросов в результате производства [2, 6].

При заряде частиц с различной физической природой в межэлектродном пространстве, на них начинает действовать электрическая сила $F = Eq$, приводящая их в движение в заданном направлении. В зависимости от величин зарядов и геометри-

ческих размеров частиц их перемещение носит определенный характер, что определяет принадлежность к той или иной технологической фракции. Специфика применения технологий управляющих движением заряженных частиц в электростатическом поле позволяет получить ряд преимуществ перед другими широко распространенными методами воздействия на материал.

При этом необходимо отметить отсутствие каких-либо дополнительных преобразований энергии и сохранение первичного источника, воздействующего на обрабатываемый материал. Это весьма важно с точки зрения сокращения затрат на разработку источника питания, а также сокращения потерь электроэнергии в результате преобразования ее в другие формы.

Как правило, большинство веществ, с которыми мы имеем дело, обладают частично и проводящими свойствами, и диэлектрическими, соответственно, заряд, передаваемый большинству веществ,

в той или иной степени обязательно будет сохранен на частицах, а значит, и справедлива истина универсальности применяемой технологии.

Полученный эффект разделения частиц на фракции, как известно, достигается на границе раздела сред. Данное обстоятельство не является проблемой, так как разделение частиц и веществ почти всегда производится для ранее размельченных до определенных размеров частиц. При этом технология дробления позволяет без особого труда добиться строго заданных размеров частиц в составе дисперсии. Это обстоятельство никак не снижает степень универсальности и эффективности предлагаемой технологии.

Универсальность управления частицами в электростатическом поле достигается параметрами электрических полей, а соответственно, диапазоном частот и напряжений, обеспечивающих и процесс заряда, и силовое воздействие на заряженные частицы.

В межэлектродном пространстве воздушной среды частицы подвержены действию нескольких различных сил:

1) тяжести $F_{mg} = m \times g$, где g – вектор ускорения свободного падения;

2) воздействия электрического поля на заряженную частицу F ;

3) обусловленной неравномерным распределением напряженности электрического поля. В силу весьма низкого соотношения данной силы по отношению к другим силам, действующим на частицу, этой силой можем пренебречь;

4) сопротивления окружающей среды движению частицы F_c . Возникновение силы сопротивления среды обусловлено появлением в окружающем пространстве встречного движения воздуха, создаваемого самим материалом, а как следствие, затрат энергии вследствие трения о воздух.

Сила сопротивления среды рассчитывается с помощью уравнения Навье – Стокса:

$$\underbrace{\gamma_B \frac{d\bar{u}}{dt}}_{\text{сила инерции}} = \underbrace{\gamma_B \bar{F}}_{\text{внешние силы}} - \underbrace{\text{grad}(p)}_{\text{силы давления}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \bar{u}}_{\text{силы вязкости}}$$

Здесь \bar{u} – вектор скорости течения; γ_B – плотность среды; μ – коэффициент динамической вязкости среды; p – давление.

Электрическая сепарация сыпучих материалов представляет собой процесс выделения частиц, отличающихся между собой по физическим свойствам, размерам или форме.

Коронный разряд относится к газовому разряду как разновидности тлеющего разряда, который возникает при резко выраженной неоднородности электрического поля вблизи одного или нескольких электродов.

Как показывает практика, в настоящее время математические модели рассматривают упрощенные имитации электростатических полей, взаимного расположения систем электродов и их геометрических параметров в межэлектродном пространстве, где учитывается либо начальное напряжение, либо напряженность электрического поля в однородной среде. Однако истинная система электродов, разнородность частиц и другие физические показатели не позволяют определить параметры нагрузочного контура электросепаратора, такие как значения напряженности поля в отдельной точке пространства, емкость системы электродов, электрическое смещение и т.д. [1, 5].

Моделирование электросепарирующей установки является одной из наиболее сложных задач для расчета преобразователей электроэнергии, так как связано с особенностями физических процессов, протекающих в поле коронного разряда. Тем не менее современный уровень систем цифрового схемотехнического и аналитического моделирования позволяет существенно расширить границы исследования сложных полей в разнородной среде и провести анализ данных исследований на базе пакетов прикладных программ [4].

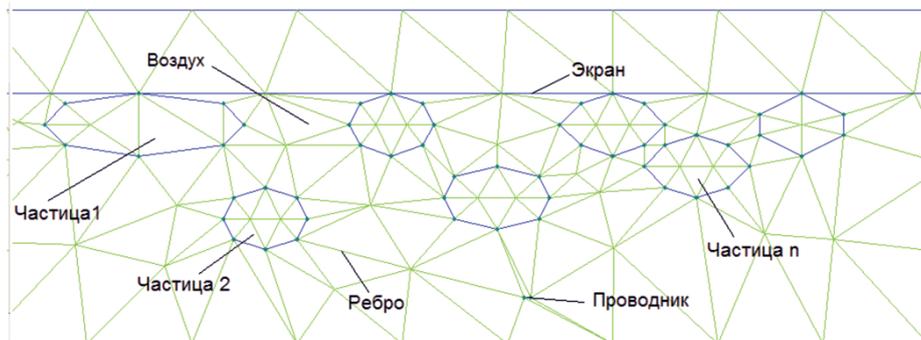


Рис. 1. Геометрическая модель сепаратора в поперечном сечении

Электростатическое поле, процессы заряда частиц и их движение в декартовой системе координат в произвольной точке межэлектродного пространства описывается следующей системой алгебро-дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xi} \frac{\partial U_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yi} \frac{\partial U_i}{\partial y} \right) = -\rho_i, \\ q(t) = q_m \cdot \frac{e \cdot n_0 \cdot k \cdot t}{4 \cdot \varepsilon_0 + e \cdot n_0 \cdot k \cdot t}, \quad q_m = \frac{3 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot a^2 \cdot E_{BH}}{\varepsilon_r + 2}, \quad q_{\text{пред}} = q_m \frac{1 - \sqrt{en_- k_- / en_+ k_+}}{1 + \sqrt{en_- k_- / en_+ k_+}}, \\ q_m = \frac{\pi^2}{6} \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot a^2, \\ q(t) = q_{\infty} \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad q_{\infty} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot b \cdot c \cdot E_{BH} (\varepsilon_1 \cdot \gamma_{v2} - \gamma_{v1})}{\gamma_{v1} \cdot d_a + \gamma_{v2} \cdot (1 - d_a)}, \quad \tau = \varepsilon_0 \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot d_a + 1 + d_a}{\gamma_{v1} \cdot d_a + \gamma_{v1} \cdot (1 + d_a)}, \\ \gamma_B \frac{d\bar{u}}{dt} = \gamma_B \cdot \bar{F} - gradp + \mu \cdot \nabla^2 \bar{u}, \end{array} \right.$$

где ε_{xi} , ε_{yi} – проекции диэлектрической проницаемости в координатах осей абсцисс x и ординат y соответственно;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы;

n_0 – начальная концентрация ионов;

U_i – разность потенциалов;

ρ_i – объемная плотность заряда;

$q(t)$ – заряд в текущий момент времени;

$q_{\text{пред}}$ – предельный заряд, приобретаемый частицей в поле биполярного коронного разряда;

q_m – максимальный заряд частицы;

q_{∞} – предельный заряд, приобретаемый частицей;

$en_+ k_+$, $en_- k_-$ – проводимости, определяемые соответственно положительными и отрицательными зарядами;

k – отношение средней скорости направленного движения ионов к напряженности электрического поля;

E – напряженность электрического поля в месте нахождения частицы, В/м;

E_{BH} – напряженность внешнего поля;

a – радиус сферической частицы;

b, c – размеры полуосей эллипсоида;

γ_{v1} , γ_{v2} – удельная объемная электропроводность;

∇ – дифференциальный оператор;

τ – постоянная времени зарядки частицы.

Приведенная система уравнений не имеет аналитического решения, поэтому решена численным методом, а именно методом конечных элементов в среде *MicroCAP* [3, 4].

Так как задача решается для большого количества однородных кусочно-линейных сред, то исследуемая область (система электродов «провод – плоскость») разбивается на n треугольных кусочно-линейных сред.

Модель описана физическими параметрами: ребрами, блоками и вершинами (рис. 1). Ребрами в данной установке являются коронирующий электрод, экран и грани частиц. В физических свойствах граней указывается напряжение или потенциал ребра. Блок выполняет функцию заполнения межреберного пространства. В данном случае заполнителем является воздух, который определяется диэлектрической проницаемостью. Внутреннее пространство, заряжаемых частиц также имеет заданную диэлектрическую проницаемость. Частицы, показанные на рис. 1, имеют различные размеры и диэлектрическую проницаемость.

Графическая картина, представленная на рис. 2 для электростатического поля, показывает, что в областях с малой диэлектрической проницаемостью изолинии сгущаются и разность потенциалов между двумя точками: ближайшей к коронирующему электроду и наиболее удаленной, что уменьшает остаточный заряд на частицах разделяемого материала

По результатам исследования изменения напряжения внутри частиц с различной диэлектрической проницаемостью при удалении их от коронирующего электрода построены графические зависимости изменения напряжения от расстояния до электрода (рис. 3).

Исследования зависимостей (рис. 2, 3) показывают, что вблизи от электрода напряжения на границе частиц с высокой диэлектрической проницаемостью значительно выше. Наиболее важным фактором при сепарации материалов является соотношение сил: электрических и тяжести. Так как большинство материалов, их примесей имеют существенно различающиеся удельные плотности, то и масса таких материалов

и присутствующих взвесей различается. Следовательно, необходимо сравнивать не только электрические силы, действующие на частицы различной физической природы, но и их отношение к силам тяжести. На рис. 4 показаны графики соотношения сил сферической частицы с различной физической природой от относительного размера межэлектродного расстояния. Из графиков видно, что для трех различных материалов: дерева, мрамора и стекла равенство сил тяжести и электрических сил происходит примерно в одном месте при относительных размерах частиц $d/h = 0,136$.

При относительно крупных частицах сепарируемого материала или меньшем расстоянии между электродами электрическая сила превышает силу тяжести до опре-

деленного значения $d/h = 0,147$. На данной границе происходит разделение частиц на проводящие и непроводящие. Непроводящие частицы, имеющие низкую диэлектрическую проницаемость, приобретают противоположный заряд, тем самым уменьшая кулоновские силы, действующие на частицу электрическим полем.

Представленная методика создания компьютерных моделей, позволяющая исследовать поведение частиц различной физической природы, формы и размеров в поле коронного разряда, состоит из следующих этапов:

1) разделение системы электродов и материалов, находящихся между ними в электростатическом поле коронного разряда на множество треугольных конечных элементов, имеющих однородную физическую природу;

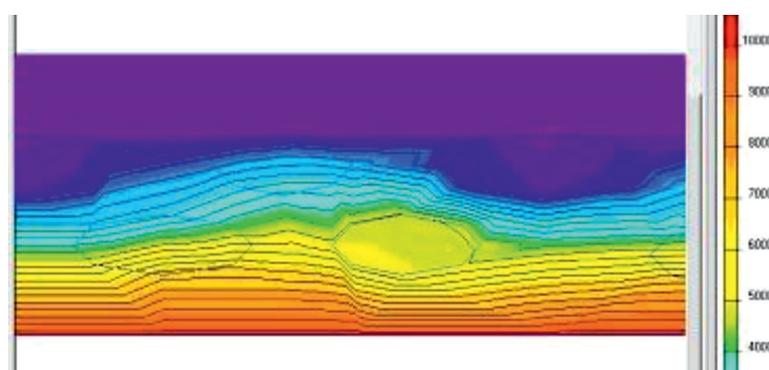


Рис. 2. Изолинии напряженности электрического поля в продольном сечении

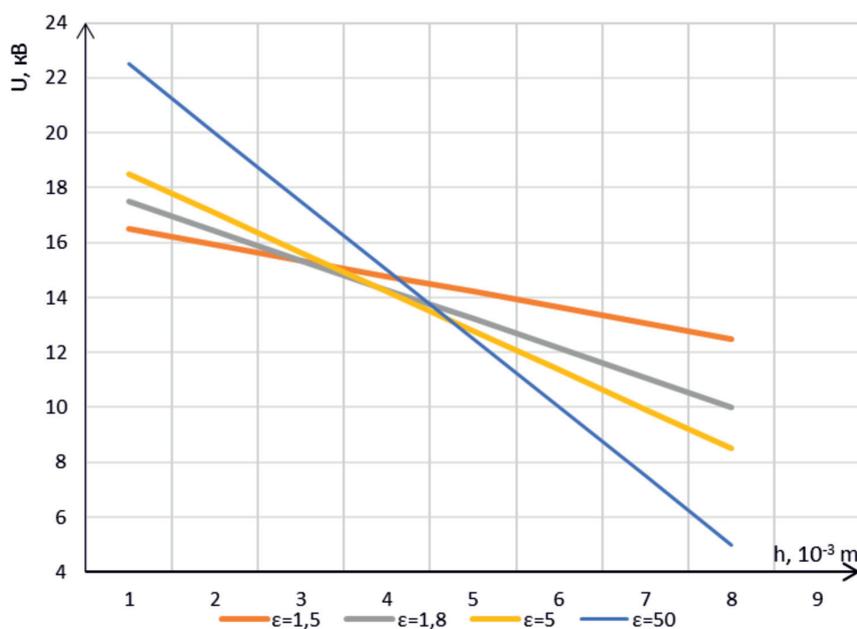


Рис. 3. Графики изменения потенциала внутри частиц с различными диэлектрическими проницаемостями

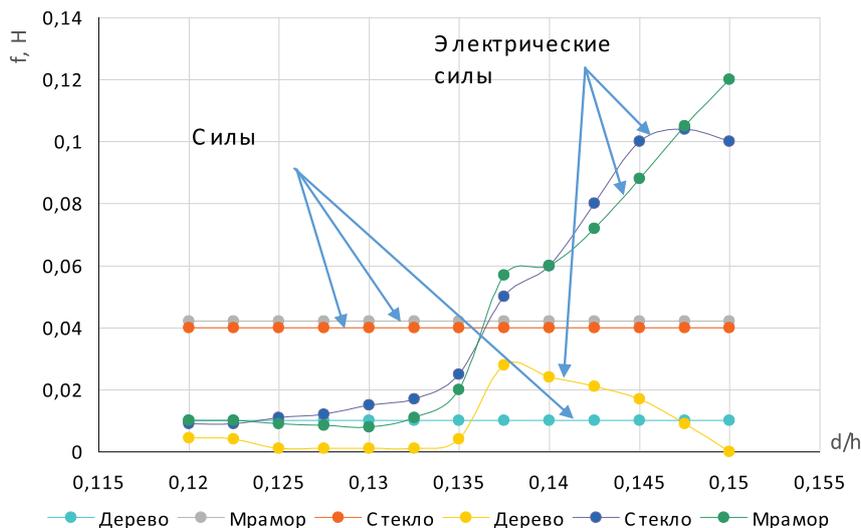


Рис. 4. Соотношение сил сферической частицы с различной физической природой относительно размера межэлектродного расстояния и размера частицы

2) на основании анализа графических зависимостей электрических сил и сил тяжести от относительного размера частиц к межэлектродному промежутку определяем наиболее рациональные соотношения расстояний электродов и конкретной совокупности сепарируемых частиц в поле коронного разряда;

3) определение направления движения выделяемых фракций сепарируемых частиц, т.е. размещение приемников выделяемых фракций.

Список литературы

1. Болтачев Г.Ш., Зубарев Н.М.. Аналитическая модель коронного разряда с конического электрода в режиме насыщения // Журнал технической физики, Институт электрофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 2012. – Т. 82, вып. 11. – С. 28–37.

2. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В.Т. Барченко, Ю.А. Быстров, Е.А. Колгин. Под ред. Ю.А. Быстрова. – СПб.: Энергоатомиздат Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. – 332 с.

3. Костюкова Т.П., Саубанов В.С. Моделирование электронных схем с помощью программы Micro-Cap V. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2000. – 31 с.

4. Костюкова Т.П., Саубанов В.С. Micro-Cap как основа исследования сложных электротехнических систем // Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 2364. Выдано 27.03.2003 Отраслевым фондом алгоритмов и программ.

5. Саубанов В.С., Костюкова Т.П. Исследование разрядно-импульсных электротехнологических систем // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Сборник трудов. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2002. – С. 158–162.

6. Соловьев Л.П. Основные методы и проблемы физических способов сепарации сыпучих мелкодисперсных материалов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 19–22.