Доцент кафедры "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" Андижанского машиностроительного института, к.т.н., под рецензией Астана Исмаилова

Мамаджанов Баходир Джураханович
Кандидат технических наук
Андижанский машиностроительный институт,Узбекистан
Email: bm02717272@gmail.com
ORCID ID: 0009-0005-9833-124X
93 411 85 27

СИЛЫ ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА МЕЛКОДИСПЕГИРОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

АННОТАЦИЯ:Создание основ методики определения пондеромоторной силы в неоднородном электрическом поле.

Ключевые слова: пондеромоторная сила, неоднородное электрическое поле, градиент от модуля напряжённости, сортирование частиц.

ВВЕДЕНИЕ:

Целью работы является создание некоторых основ методики определения пондеромоторной силы в векторной форме для сложного неоднородного электрического доля, что даёт возможность знать модуль и направление пондеромоторной силы в любой точке поля.

Под мелкодиспергированными частицами следует понимать мелкие частицы, электрическое поле которых может аппроксимировано полем элементарного диполя. При внесении частицы в рассматриваемое поле она не изменяет исходной формы его. Подобные частицы присутствуют в семенных смесях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ:

теория электромагнитного поля, методы математического анализа, метод математичнского моделирования и решения дифференциальных уравнений, теория разделения сыпучих смесей на цилиндрической поверхности.

В неоднородном электрическом поле на любую с точки зрения проводимости частицу воздействует электрическая сила /1/

$$F_{эл} = \mathrm{grad}(\vec{P}\vec{E}). \qquad (1)$$

Здесь $\vec{P}$-дипольный момент частицы;

$\vec{E}$-напряженность электрического поля.

В неоднородном электрическом поле диполь стремится расположиться вдоль силовых линий электрического поля. Для этого случая выражение (1) будет иметь вид:

$$F_{at} = |P| \cdot \mathrm{grad}|E| \qquad (2)$$

где $|P|$-модуль дипольного момента,

$\mathrm{grad}|E|$ - градиент от модуля напряженности электрического поля.

Градиент от модуля напряжённости электрического поля характеризует его неоднородность; является векторной функцией, а сам модуль - величина скалярная.

Модуль дипольного момента частицы, пропорционален модулю напряжённости внешнего поля.

$$|P| = К_{ф}|E| \qquad (3)$$

В формуле (3) $К_{ф}$ - коэффициент, учитывающий влияние формы частицы и её диэлектрической проницаемости.

Подставив (3) в (2), получим

$$F_{эл} = К_{ф}|E|\mathrm{grad}|E| \quad (4)$$

Для градиента модуля напряжённости имеет

$$\mathrm{grad}|E| = \frac{\partial|E|}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial|E|}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial|E|}{\partial y}\vec{k} \qquad (5)$$

Сравним выражение (4) с выражением для определения силы, действующей на электрический заряд q в потенциальном поле:

$$\overrightarrow{F_{el}} = q \cdot \mathrm{grad}\varphi \qquad (6)$$

Где $\varphi = f(x, y, z)$- функция потенциалов поля

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ:

Получены математические выражения, силовое потенциальное поле электрических зарядов. Получены математические выражения для определения пондеромоторной силы через модуль напряженности. Предложены выражения для различных коэффициентов формы.

Сравнение выражений (4) и (6) указывает на их формальную математическую аналогичность: функция потенциалов поля и её градиент описывают силовое потенциальное поле для электрических зарядов, модуль напряжённости электрического поля и его градиент описывают силовое потенциальное поле для элементарных диэлектрических тел (диполей).

Здесь можно утверждать, что происходит преобразование одного потенциального поля в другое. Это - другое поле в свою очередь также можно представить в виде поверхностей одинакового уровня $|E| = \mathrm{const}$ и силовых линий, касательные к которым определяют направление пондеромоторной силы.

Поле пондеромоторных сил описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx}{\partial|E|/\partial x} = \frac{dy}{\partial|E|/\partial y} = \frac{dz}{\partial|E|/\partial z} \qquad (7)$$

поле должно удовлетворять уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2|E|}{\partial x^2} + \frac{\partial^2|E|}{\partial y^2} + \frac{\partial^2|E|}{\partial z^2} = 0 \qquad (8)$$

Дальнейшие преобразования выражения (4) проводятся в следующей последовательности: вектор $\mathrm{grad}|E|$ умножается на скаляр $|E|$; с учетом (5), определяется окончательная функция пондеромоторной силы в любой точке электрического трёхмерного поля, выраженная через функцию модуля напряжённости:

$$\overrightarrow{F_{el}} = k_{\phi}(|E|\frac{\partial|E|}{\partial x}\vec{i} + |E|\frac{\partial|E|}{\partial y}\vec{j} + |E|\frac{\partial|E|}{\partial z}\vec{k} \qquad (9)$$

или

$$\overrightarrow{F_{el}} = \frac{1}{2}k_{\phi}(\frac{\partial|E|^2}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial|E|^2}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial|E|^2}{\partial z}\vec{k} \qquad (10)$$

Пользуясь выражением (9), можно определить модуль (абсолютную величину) пондеромоторной силы в любой точке $M(x, y, z)$ поля:

$$\overrightarrow{F_{el}} = k_{\phi}|E|\sqrt{\left(\frac{\partial|E|}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial|E|}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial|E|}{\partial z}\right)^2} \qquad (11)$$

а также её направление

$$n_{(M)} = \frac{\frac{\partial|E|}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial|E|}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial|E|}{\partial z}\vec{k}}{\sqrt{\left(\frac{\partial|E|}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial|E|}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial|E|}{\partial z}\right)^2}} \qquad (12)$$

или

$$n_{(M)} = \cos\alpha\vec{i} + \cos\beta\vec{j} + \cos\gamma\vec{k}$$

Таким образом, выражения (9) и (10) являются основополагающими при определении функции пондеромоторной силы через модуль напряжённости поля.

По осям x,y,z модуль напряжённости поля будет иметь вид

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Значение функции напряжённости электрического поля можно найти путём интегрирования уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0$$

или путём дифференцирования функции потенциала поля:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right), \qquad (13)$$

откуда

$$|E| = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2}, \qquad (14)$$

Подставив (14) в выражение (10), можно получить функцию пондеромоторной силы, выраженную через функцию потенциалов поля (её частных производных):

$$\overrightarrow{F_{el}} = \frac{1}{2}\kappa_\phi\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2\right]\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2\right]\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)^2\right]\vec{k}\right\}$$
(15)

Таким образом, чтобы определить значение пондеромоторной силы и её направление, надо в каждом конкретном случае определить функцию этой силы из выражений (9), (10) или (15) через, параметры поля.

Коэффициент κ_ϕ для некоторых конкретных случаев может быть определён из выражения для дипольного момента частицы. В частности, для шара

$$\kappa_\phi = 4\pi R^3\frac{\varepsilon_0(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}{(\varepsilon_2+2\varepsilon_1)}, \qquad (16)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}$ электрическая постоянная Ф/м;

ε_1- относительная диэлектрическая проницаемость среды,

ε_2 - относительная диэлектрическая проницаемость частицы;

R- радиус частицы, м.

Для эллипсоида

$$\kappa_\phi = 4\pi abc\frac{\varepsilon_0(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}{(\varepsilon_1+N(\varepsilon_2-\varepsilon_1)} \qquad (17)$$

где N - коэффициент деполяризации;

a, b, c - оси эллипсоида, м.

После подстановки значений K_ϕ (16) или (17) в выражение (9), (10) или (15) можно определить окончательное значение пондеромоторной силы, действующей на шар или эллипсоид в неоднородном поле. Коэффициент κ_ϕ для эллипсоида зависит от коэффициента деполяризации N, который определяется положением осей a, b, c в пространстве, то есть ориентации эллипсоида.

Следовательно, величина пондеромоторной силы для эллипсоида зависит не только от его координат (положения) в пространстве, но и от его ориентации.

Чтобы определить значения пондеромоторной силы, а также её направление, надо в каждом конкретном случае определить функцию этой силы. Коэффициент формы для эллипсоида зависит от коэффициента деполяризации N.

Величина пондеромоторной силы для частицы с эллипсоидной формой зависит не только от его координат в пространстве, но и от его ориентации в электрическом поле.

На мелкодиспериированные частицы в неоднородном электрическом поле действуют пондеромоторные силы. Вопросы расчета их были рассмотрены в работах [1,2].

В них были изложены пути расчета применительно к узкому кругу задач.

ВЫВОДЫ:

Предложенная методика может быть применена для решения конкретной задачи расчёта пондеромоторных сил в поле решётки знакопеременных цилиндрических проводников. Это поле является достаточно близкой физической моделью поля бифилярной обмотки диэлектрических сепараторов семян [3,4,5]. Это позволяет оценить как качественную, так и количественную стороны вопросов, связанных с применением знакопеременных полей в технологических процессах диэлектрической сепарации семенных смесей.

Поскольку поле решётки знакопеременных проводников плоскопараллельное, то можно ограничиться двухмерным пространством и записать функцию пондеромоторной силы для двухмерного поля, а затем определить частные производные от функции модуля напряжённости поля. И далее получить функцию пондеромоторной силы для поля решётки знакопеременных проводников.

Итак. функция пондеромоторной силы для двухмерного пространства

$$\overrightarrow{F_{el}} = k_{\phi}\left(|E|\frac{\partial|E|}{\partial x}\vec{i} + |E|\frac{\partial|E|}{\partial y}\vec{j}\right) \qquad (18)$$

Для решётки знакопеременных проводников модуль напряжённости [3,5]:

$$F_{el} = -\frac{k_{\phi}\pi\tau^2}{L}\left[\frac{\sin 2\pi x/a}{(ch^2\frac{\pi y}{a} - \cos^2\frac{\pi}{a}x)^2}\vec{i} + \frac{ch 2\pi y/a}{(ch^2\frac{\pi y}{a} - \cos^2\frac{\pi}{a}x)^2}\vec{j}\right] \qquad (19)$$

В последующем можно определить зону действия пондеромоторной силы в поле решётки знакопеременных цилиндрических проводников, то есть как далеко от плоскости решётки эта сила может себя проявлять. Так же представить рельеф пондеромоторных сил и установить в каком месте пондеромоторная сила может достигать максимального значения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Волкова З.В. Диэлектрическая сепарация различных поликонцентратов и материалов. М., Издательство «Недра», 1975.
2. Мамаджанов Б.Д. Диэлектрическая калибровочно - сортировальная машина для оголённых семян хлопчатника. Дисс.канд. техн.наук. - М. 1992. – 200 с.
3. Мамаджанов Б.Д., Шукуралиев А.Ш. Анализ процесса разделения семян хлопчатника на унификационной сортировочной машине. Бюллетень науки и практики, Т-7, №4, С. 236-242.
4. Электрическая сила в системе электродов. Б.Д.Мамаджанов, Ш.Маннοббоев. Xalqaro ilmiy-amaliy materiallar to’plami. Andijon-2022 y., 25-27 may.

5. Исследование электрической силы в поле разноимённо заряженных пластин.- Б.Д. Мамаджанов. Xalqaro ilmiy-amaliy materiallar to'plam. Andijon-2022 y.,
6. Mamadzhanov, B. D., & ugli Mannobboev, S. S. (2022). CONTROL OF THE ELECTRIC FIELD OF DIELECTRIC SEPARATING DEVICES BY THE SUPERIMPOSITION METHOD. INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH IN COMMERCE, IT, ENGINEERING AND SOCIAL SCIENCES ISSN: 2349-7793 Impact Factor: 6.876, 16(07), 37-41.
7. Мамаджанов, Б. Д., Шукуралиев, А. Ш., & Манноббоев, Ш. С. (2023). МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОРТИРОВОЧНОЙ МАШИНЫ. Educational Research in Universal Sciences, 2(15), 581-589.
8. Mamadzhanov, B., Shukuraliev, A., Mannobboev, S., Turaev, S., Patidinov, A., & Mavlyanova, S. (2024). Dielectric separation. In E3S Web of Conferences (Vol. 471, p. 02017). EDP Sciences.