

ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ГЕТЕРОГЕННОЙ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЕ

Куценко Ю.Н., к.т.н.

Таврический государственный агротехнологический университет

г. Мелитополь, Украина

Тел. 0619-42-31-59,

email: kucenkoua@mail.ru

Аннотация. Изучено воздействие статических магнитных полей на корневую систему растений в почве. Получены аналитические зависимости, характеризующие параметры электрической и магнитной составляющей поля вокруг частицы, что является основой для проектирования электротехнических и магнитных систем.

Ключевые слова: аналитические зависимости, магнитные, электрические поля, растения, грунт.

Постановка проблемы. Анализ научных работ указывает на разнообразность результатов воздействия магнитных полей на процессы эффективности роста растений в гетерогенной среде. Одним из факторов, характеризующих развитие растений, являются параметры магнитной и электрической составляющей частиц поля.

С целью дальнейших исследований необходимо получить аналитические зависимости, характеризующие параметры поля, воздействующего на ферромагнитные частицы.

Анализ последних исследований и публикаций. Следует, однако, отметить, что наличие постоянного или переменного магнитного поля может оказывать существенное влияние на движение питательных веществ в корневой системе растений, поскольку этот процесс связан с движением положительно или отрицательно заряженных ионов. Как известно, внешнее магнитное поле изменяет траектории движения заряженных частиц и в результате может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на жизненные процессы в растениях [2].

Цель исследования. Определение аналитических зависимостей, характеризующих параметры электрической и магнитной составляющей полей ферромагнитных частиц при воздействии на них магнитостатическими полями.

Основная часть. Изучить влияние магнитостатического поля на корневую систему растений можно посредством погружения в среду развития корневой системы почвы намагниченных частиц. Рассмотрение данного вопроса без моделирования распределения в грунте статических магнитных полей, созданных такими частицами. Для анализа примем допущения, что все частицы находятся на одинаковой глубине в почве, в общем случае имеют форму эллипсоида и расположены в узлах сетки (рис.1).

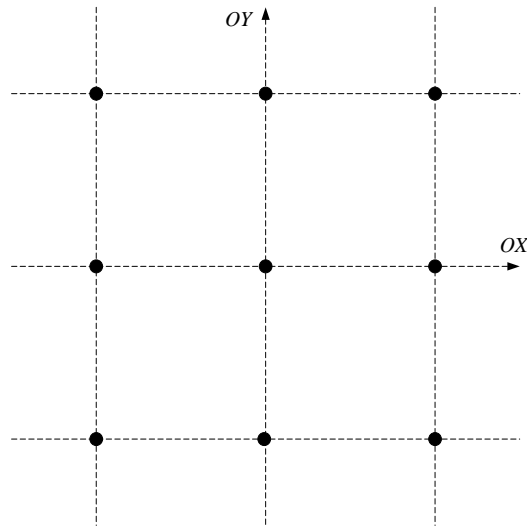


Рисунок 1 - Расположение системы намагниченных частиц в плоскости, параллельной поверхности почвы

Решение данной задачи необходимо начать с исследования поля созданного одиночным намагниченным телом. В качестве объекта исследования будем использовать однородно намагниченный эллипсоид, размеры полуосей которого – a , b и c , которые коллинеарны осям координат OX , OY и OZ , соответственно. Поскольку намагниченную частицу окружает гетерогенная – почва, то не имеет принципиального значения, составляющая вектора намагничивания, принятая для исследования.

Рассмотрим случай, когда вектор намагничивания \vec{M}_0 постоянен и коллинеарен оси a (оси OX). Поскольку рассматривается однородное намагничивание эллипсоида, то внутри него плотность магнитного заряда $\rho^M = -\text{div} \vec{M}_0 = 0$, поэтому потенциал, создаваемый данным эллипсоидом, определяется лишь поверхностными зарядами, плотность которых равна $\sigma^M = \vec{n} \cdot \vec{M}_0$, где \vec{n} – единичная нормаль к поверхности эллипсоида. Данная задача полностью эквивалентна задаче о поле, создаваемым поляризованным диэлектрическим эллипсоидом [4].

Необходимо помнить, что физическая структура поля, создаваемого намагниченными частицами, принципиально отличается от строения поля любой конфигурации электрических зарядов. Изучение воздействия статических магнитных полей на корневую систему растений по заданному полю является одной из новых задач электромагнитной биологии. Так как экспериментальное исследование распределения внутренних полей провести практически невозможно, встает вопрос о решении этой задачи теоретическими методами.

С точки зрения магнитостатики все задачи подобного типа сводятся к задачам взаимодействия магнитных полей намагниченных тел, с потерями или без них, сферической, эллипсоидальной и цилиндрической формы.

При этом частные задачи ставят дополнительные требования к соотношению линейных размеров и форме намагниченных частиц, к внутренней структуре, связанной с неоднородностью.

Прикладная сторона магнитного воздействия на корневую систему растений, связанная с конкретными техническими разработками специальных систем, требует как простых подходов, так и простых решений поставленных задач.

Одним из подходов может служить использование в качестве математической модели исследование распространения низкочастотных электромагнитных излучений. В этом случае магнитные статические поля можно получить как предельный случай при

стремлении частоты колебаний ω к нулю (или длины волны λ к бесконечности). Данный подход удобен и тем, что позволит в дальнейшем при необходимости изучать воздействие переменных магнитных полей на растения, находящиеся в почве. Такое решение можно получить для тел, линейные размеры которых малы по сравнению с длиной падающей волны. В этом случае поля внутри и вне рассеивающего тела можно разложить по малому параметру $\frac{a}{\lambda}$, где a - линейные размеры тела, λ - длина рассеиваемой волны. Получение необходимых нам формул магнитостатики будет произведено при вычислении предела $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{a}{\lambda}$.

В работах [1, 3] предложен метод решения для однородных малых тел, который позволяет получить довольно простые выражения для внутренних и внешних полей. Будем исследовать поле, создаваемое одиночным намагниченным телом, на основе интегральных уравнений, эквивалентных уравнениям Максвелла совместно с граничными условиями на границе тела с окружающей средой [6]. Грунт, в котором находится намагниченное тело, характеризуется однородностью и диэлектрической и магнитной проницаемостями ε_c и $\mu_c = \mu_0$, где μ_0 - магнитная проницаемость свободного пространства. Электромагнитное поле \vec{E} и \vec{H} во всех точках этого пространства будет описываться уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \\ \text{rot } \vec{H} = \varepsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \end{cases} \quad (1)$$

Учитывая зависимость полей от времени как $e^{i\omega t}$, где ω - круговая частота, получаем:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} + i\omega \mu_0 \vec{H} = 0; \\ \text{rot } \vec{H} - i\omega \varepsilon_c \vec{E} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Если намагниченный объект характеризуется проницаемостями ε и μ , то в его внутренних точках поле будет описываться уравнениями:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} + i\omega \mu_0 \vec{H} = \vec{g}^M; \\ \text{rot } \vec{H} - i\omega \varepsilon_c \vec{E} = \vec{g}^3, \end{cases} \quad (3)$$

где $\vec{g}^3 = i\omega \varepsilon - \varepsilon_c \vec{E}$;

$\vec{g}^M = i\omega \mu_0 - \mu \vec{H}$.

Диэлектрическая проницаемость ε и магнитная - μ рассматриваются как функции координат и меняются скачкообразно при переходе от тела к окружающей среде. В связи с этим уравнение (3) можно рассматривать как описывающие не только намагниченный объект, но и все пространство. Выполнив преобразования получаем:

$$\begin{cases} \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} - k^2 \vec{E} = \text{rot } \vec{g}^M - i\omega \mu_0 \vec{g}^3; \\ \text{grad div } \vec{H} - \Delta \vec{H} - k^2 \vec{H} = \text{rot } \vec{g}^3 + i\omega \varepsilon_c \vec{g}^M, \end{cases} \quad (4)$$

где $k = \omega \sqrt{\varepsilon_c \mu_0}$ - волновое число в почве.

Используя функцию Грина можно привести уравнения (4) к интегральным уравнениям Максвелла совместно с граничными условиями на границе раздела двух сред (почва-воздух) [5]:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}_0(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{grad div} + k^2 \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' - \\ &\quad - \frac{i\omega \mu_0}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'; \\ \vec{H}(\vec{r}) &= \vec{H}_0(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{grad div} + k^2 \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' + \\ &\quad + \frac{i\omega \varepsilon_c}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}', \end{aligned} \quad (5)$$

$$f(|\vec{r} - \vec{r}'|) = \frac{e^{-ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (6)$$

где $\vec{E}_0(\vec{r})$ и $\vec{H}_0(\vec{r})$ - электрическое и магнитное поля соответственно, которые были бы в точке \vec{r} при отсутствии намагниченного тела.

Интегралы в (5) распространяются на весь объем V , занимаемый намагниченным телом. Смысл полей, стоящих слева в выражениях (5), зависит от положения точки \vec{r} . Если эта точка находится внутри объема V , занимаемого рассматриваемым телом, то поля, стоящие слева, представляют собой поля в этом теле, то есть это те же поля, что и под знаком интеграла справа. В этом случае (5) представляет собой не что иное, как линейные неоднородные интегральные уравнения, определяющие электромагнитное поле внутри тела с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ . Если же точка \vec{r} лежит вне области V , то (5) являются равенствами, определяющими полное поле вне намагниченного тела через невозмущенное поле (первое слагаемое) и возмущенное, связанное с намагниченным объектом (второе слагаемое). Возмущение поля можно выразить через электрический и магнитный потенциалы Герца $\vec{\Pi}^3$ и $\vec{\Pi}^M$ с помощью соотношений.

$$\begin{cases} \vec{E}_{\text{возм}} = \text{grad div} + k^2 \vec{\Pi}^3 - i\omega \mu_0 \text{rot } \vec{\Pi}^M; \\ \vec{H}_{\text{возм}} = \text{grad div} + k^2 \vec{\Pi}^M + i\omega \varepsilon_c \text{rot } \vec{\Pi}^3. \end{cases} \quad (7)$$

Сравнивая (7) с (5), можно прийти к выводу, что

$$\vec{\Pi}^{\text{э}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E} \vec{r}' f |\vec{r} - \vec{r}'| d\vec{r}'; \quad (8)$$

$$\vec{\Pi}^{\text{м}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H} \vec{r}' f |\vec{r} - \vec{r}'| d\vec{r}'.$$

Имея в виду, что $\varepsilon - \varepsilon_c$ $\vec{E} = \vec{P}^{\text{э}}$ - вектор электрической поляризации, а $\mu - \mu_0$ $\vec{H} = \vec{P}^{\text{м}}$ - магнитной, получаем:

$$\vec{\Pi}^{\text{э}} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_c} \int_V \vec{P}^{\text{э}} \vec{r}' f |\vec{r} - \vec{r}'| d\vec{r}'; \quad (9)$$

$$\vec{\Pi}^{\text{м}} = \frac{1}{4\pi \mu_0} \int_V \vec{P}^{\text{м}} \vec{r}' f |\vec{r} - \vec{r}'| d\vec{r}'.$$

Учитывая (8), выражения для индуцированных полей намагниченными частицами (5) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \vec{E} \vec{r} = \vec{E}_0 \vec{r} + \text{grad div} + k^2 \vec{\Pi}^{\text{э}} - i\omega \mu_0 \text{rot } \vec{\Pi}^{\text{м}}; \\ \vec{H} \vec{r} = \vec{H}_0 \vec{r} + \text{grad div} + k^2 \vec{\Pi}^{\text{м}} + i\omega \varepsilon_c \text{rot } \vec{\Pi}^{\text{э}}. \end{cases} \quad (10)$$

Определение решения интегральных уравнений (5), дающее внутренние поля, можно значительно упростить, если учесть, что рассматриваются намагниченные объекты, линейные размеры которых малы по сравнению с длиной падающей волны. В этом случае выражения для полей внутри рассеивателя, а также в ближней зоне можно разложить по степеням малого параметра $\frac{l}{\lambda}$, где l - наибольший линейный размер эллипсоида. Это же можно сделать и с $f |\vec{r} - \vec{r}'|$.

Так как зависимость электрического и магнитного поля от \vec{r} связана с множителем $e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|}$, то, воспользовавшись степенным рядом для этой функции

$$e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} = 1 - ik|\vec{r}-\vec{r}'| + \frac{ik^2|\vec{r}-\vec{r}'|^2}{2!} - \dots,$$

получим

$$\begin{aligned} \vec{E} \vec{r} &= \vec{E}^0 \vec{r} + ik \vec{E}^1 \vec{r} + ik^2 \vec{E}^2 \vec{r} + \dots; \\ \vec{H} \vec{r} &= \vec{H}^0 \vec{r} + ik \vec{H}^1 \vec{r} + ik^2 \vec{H}^2 \vec{r} + \dots. \end{aligned} \quad (11)$$

Кроме того,

$$f |\vec{r} - \vec{r}'| = \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots. \quad (12)$$

Выполнив ряд преобразований, получаем систему уравнений для нулевого, первого и других приближений.

$$\begin{aligned} \vec{E}^0 \vec{r} &= \vec{E}_0^0 \vec{r} + \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}^0 \vec{r}' \cdot \text{grad} \right) \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'; \\ \vec{H}^0 \vec{r} &= \vec{H}_0^0 \vec{r} + \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}^0 \vec{r}' \cdot \text{grad} \right) \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'. \end{aligned} \quad (13)$$

Рассмотрим решение уравнений, определяющих электрические и магнитные поля (13), в нулевом приближении. В качестве характерной формы для тел, удовлетворяющих требованию $\frac{l}{\lambda} \ll 1$, можно считать эллипсоид. В этом случае для решения интегральных уравнений (13) целесообразно ввести вспомогательную функцию W , являющуюся ньютоновским потенциалом однородного эллипсоида

$$W \vec{r} = \int_V \frac{d\vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (14)$$

С учетом преобразований, характер $\vec{E}^0 \vec{r}$ зависит от свободного члена интегрального уравнения. В том случае, если ньютоновский потенциал есть квадратичная функция координат, то нулевое приближение для электрической и магнитной составляющей поля внутри намагниченной частицы будет иметь тот же характер, что и внешнее поле. Если внешнее поле однородно, то и внутреннее также однородно. Этот же вывод касается и приближений более высокого порядка. Известно, что в случаях, когда тело имеет форму эллипсоида, ньютоновский потенциал является именно квадратичной функцией координат внутренних точек эллипсоида

$$W \vec{r} = \xi - \pi abc (I_1 x^2 + I_2 y^2 + I_3 z^3) \quad (15)$$

где a, b, c - размеры полуосей эллипсоида;

Приведенные выше результаты показывают, что внутреннее электрическое и магнитное поле эллипсоида однородно, если таковым является внешнее поле.

Выводы.

1. Полученная математическая модель, позволяет определить параметры электрической и магнитной составляющих поля вокруг частиц гетерогенной почвенной среды при воздействии на нее внешними силовыми полями. Воздействие полей на ферромагнитные частицы гетерогенной почвенной среды даёт возможность в дальнейшем изучать процессы развития растений в почве.

2. Установлено, что нулевое приближение для электрической и магнитной составляющей поля внутри намагниченной частицы будет иметь тот же характер, что и внешнее поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аккерман Ю. Биофизика / Ю. Аккерман; пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 684 с.
2. Куценко Ю.Н. Моделирование стационарного электрического поля, взаимодействующего с семенами и корневой системой сельскохозяйственных культур в грунте / Ю.Н. Куценко, А.Е. Пиротти, Е.Л. Пиротти // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Общегосударственный научно–производственный журнал. – 2011. – №5. – С. 66 – 69.

3. Куценко Ю. М. Модель взаємодії ферромагнітних частинок в магнітному полі / Ю. М. Куценко // Технічна електродинаміка: науково-прикладний журнал. – К: Інститут електродинаміки НАНУ. - 2004. –Ч. 3. – С.8 – 11.
4. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 543 с.
5. Плонси Р. Биоэлектричество (Количественный подход) / Р. Плонси, Р. Барр. – М.: Мир, 1992. – 366 с.
6. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М. – Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.

BIBLIOGRAPHY

1. Akkerman Yu. Biophysics / Yu. Akkerman; tran. from eng. – М.: Mir, 1964. – 684 s.
2. Kutsenko Yu.N. Modeling of stationary electric field correlating with seeds and root system of crops in the soil / Yu.N. Kutsenko, A.E. Pirotti, E.L. Pirotti //Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit. Obshchegosudarstvenny nauchno- proizvodstvenny zhurnal. – 2011. – №5. – S. 66 – 69.
3. Kutsenko Yu.N. Interaction model of ferromagnetic particles in magnetic field / Yu.N. Kutsenko // Tehnichna elektrodynamika: naukovo- prykladny zhurnal. – K: Instytut elektrodynamiky NANU, 2004. –Ch. 3. – S.8 – 11.
4. Nikol'skiy V.V. Electrodynamics and radio-wave propagation / V. V. Nikol'skiy, T. I. Nikol'skaya. – М.: Nauka, 1989. – 543 s.
5. Plonsi R. Bioelectricity (Quantity approach) / R. Plonsi, R. Barr. – М.: Mir, 1992. – 366 s.
6. Stratton J. A. Theory of electromagnetism / J. A. Stratton. – М. – Л.: Gostehizdat, 1948. – 539 s.

PERMANENT MAGNETIC FIELD IMPACT ON FERROMAGNETIC PARTICLES IN HETEROGENEOUS SOIL ENVIRONMENT

Yu. N. Kutsenko

Summary

The impact of static magnetic field on plant root system in soil is studied. The analytical dependencies characterizing parameters of electrical and magnetic field component around the particle that is the base for designing of electrotechnical and magnetic systems are obtained.

Key words: analytical dependencies, magnetic and electric fields, plants, soil.