

Анализ процесса воздействия электромагнитных импульсных сигналов на биологических вредителей, находящихся в почве

Александр Козак, Иван Гордийчук, Ирина Семенишина, Дарья Вильчинская

Подольский государственный аграрно-технический университет
Ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Украина, e-mail: main@pdatu.edu.ua

Аннотация. Научные и практические исследования последних лет показывают, что альтернативой химическому методу защиты растений может быть метод на основе экологически безопасной и эффективной импульсной электромагнитной технологии. Угнетение вредителей в почве импульсным электромагнитным излучением (ЭМИ) связано не только с процессом высокой скорости нарастания температуры в объекте, но и с информационным действием ЭМП на мембраны клеток насекомых.

Мощные импульсы широкополосного излучения находят применение в радиолокации удаленных объектов, исследовании электромагнитной совместимости и стойкости радиоэлектронных систем в условиях воздействия сильных электромагнитных полей (ЭМП). В сельском хозяйстве такие поля могут быть с успехом использованы для борьбы с вредителями, живущих в верхних слоях почвы.

Решается начально-краевая задача для системы уравнений Максвелла, моделирующая процесс воздействия последовательности электромагнитных импульсов на биологические вредители (например, личинки майского жука), находящиеся в почве. С помощью преобразования Лапласа исходная нестационарная задача сводится к задаче дифракции ЭМ волн на области, содержащей биологические вредители, которые моделируются изотропной однородной средой с комплексной ДП. Задача дифракции решается методом объемных интегральных уравнений в борновском приближении. В результате получено выражение для напряженности ЭП усредненного по области, содержащей биологические вредители.

Ключевые слова. Борновское приближение, уравнения Максвелла, преобразование Лапласа, тангенциальные компоненты, проходная волна.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В сельскохозяйственном производстве важное место занимает садоводство, так как фрукты и ягоды содержат необходимые вещества для организма человека: витами-

ны, органические кислоты, микроэлементы и др. Поэтому с развитием интенсивного садоводства возрастают и требования по защите корневой системы плодовых культур от насекомых-вредителей, так как корневая система влияет на качество и количество урожая.

В данной статье решается задача о прохождении импульсного электромагнитного сигнала в почве. Решается начально-краевая задача для системы уравнений Максвелла, моделирует процесс влияния последовательности электромагнитных импульсов на биологические вредители (например, личинки майского жука), находящиеся в почве. С помощью преобразования Лапласа исходная нестационарная задача сводится к задаче дифракции электромагнитных волн на области, содержит биологические вредители, которые моделируются изотропной однородной средой. Задача дифракции решается методом объемных интегральных уравнений в Борновском приближении. Результатом исследований должно быть определение выражения для средней напряженности электромагнитного поля (ЭП) в области (почве), которая содержит биологические объекты.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Многолетние эксперименты в производственных условиях подтверждают эффективность использования электромагнитных импульсов (ЭМИ) для угнетения вредных микроорганизмов. СВЧ метод борьбы с сорняками и болезнями действует на все виды сорняков и большинство вредной микрофлоры эффективнее по сравнению с химическими и биологическими методами. Электромагнитная энергия нашла применение для обеззараживания семян перед посевом вместо химического протравливания. ЭМП практически полностью обеззараживает их от вредных микроорганизмов, а также гриб-

ковых, бактериальных и частично вирусных болезней [6-8]. Электромагнитная энергия является одним из перспективных методов борьбы с вредными насекомыми зерновых запасов: мучным хрущак и мутовчатым шелкопрядом [8, 9].

Для определения диэлектрической проницаемости и толщины шаров неоднородной почвы разработано методу числового решения обратной задачи взаимодействия электромагнитных волн с прослойчатой средой [10].

Исследования показывают, что при СВЧ облучении почвы происходит вредных микроорганизмов на глубине до 10 см и глубже. Основной эффект уничтожения происходит из-за выборочного нагрева микроорганизмов как влажных диэлектриков благодаря нарастанию температуры этих объектов при действии ЭМИ. За одну секунду температура их повышается на несколько градусов, причем нагрев идет изнутри организма. [6, 8].

Но максимальный эффект можно достичь только при оптимальном сочетании биотропного параметров ЭМП (частота, Плотность потока мощности, экспозиция и др.)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение оптимальных параметров ЭМП для взаимодействия с биологическими веществами требует разработки моделей, учитывающих параметры ЭМП, которое влияет на микроорганизмы.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для исследования введем декартовую систему координат таким образом, что граница раздела воздух – почва совпадает с плоскостью, а полупространство заполнено почвой рис. 1.

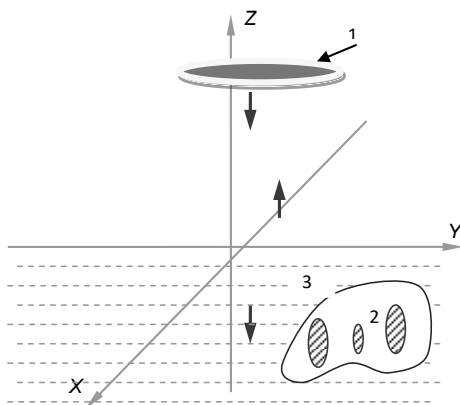


Рис. 1. Геометрическая модель для решения задачи: 1 – источник излучения; 2 – биологический объект; 3 – почва
Fig. 1. The geometric model to solve the problem: 1 – light source; 2 – biological object; 3 – soil

Для решения рассмотрим задачу о ЭМП возбужденным источником $\vec{j}(t)$ и $F(t)$ в свободном пространстве (грунт отсутствует). Поскольку предполагается, что распределение плотности поверхностного тока не зависит

от пространственных переменных x, y , то естественно предположить, что искомое ЭМП так же не зависит от этих переменных. В этом случае векторы напряженности электрического и магнитного полей будут иметь следующие компоненты:

$$\vec{E}_I = E_{xI} \vec{e}_x, \quad \vec{H}_I = H_{yI} \vec{e}_y, \quad (1)$$

где:

$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – орты декартовой системы координат.

Учитывая это, можно определить систему уравнений Максвелла в декартовой системе координат:

$$-\frac{\partial H_{yI}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_{xI}}{\partial t}; \quad \frac{E_{xI}}{z} = -m_0 \frac{H_{yI}}{t}. \quad (2)$$

Компоненты H_{yI}, E_{xI} ЭМП должны удовлетворять следующим условиям:

$$E_{xI}|_{t<0} = H_{yI}|_{t<0} = 0, \quad (3)$$

а при: $z = h$,

$$H_{yI}|_{z=h} = F(t). \quad (4)$$

Условие (4) моделирует возбуждения ЭМП поверхностным током распределенным на плоскости раскрыва антенны, совпадающей с плоскостью $z = h$.

Решение задачи (2) - (4) может быть получено с помощью операционного метода (преобразования Лапласа к временной переменной) [1].

Пусть $\bar{E}_{xI}(z, p)$ и $\bar{H}_{yI}(z, p)$ обозначают преобразования Лапласа функций: $E_{xI}(z, t)$ и $H_{yI}(z, t)$, а именно:

$$\bar{E}_{xI}(z, p) = \int_0^{\infty} E_{xI}(z, t) e^{-pt} dt, \\ \bar{H}_{yI}(z, p) = \int_0^{\infty} H_{yI}(z, t) e^{-pt} dt. \quad (5)$$

Тогда, применяя преобразование Лапласа к уравнениям (2) будем иметь:

$$-\frac{\bar{H}_{yI}}{z} = \varepsilon_0 p \bar{E}_{xI}, \quad \frac{\bar{E}_{xI}}{z} = -m_0 p \bar{H}_{yI}. \quad (6)$$

Граничное условие (4) можно представить в следующем виде:

$$\bar{H}_{yI}(h, p) = \bar{F}(p). \quad (7)$$

Функция $\bar{F}(p)$ является преобразованием Лапласа и имеет вид:

$$\bar{F}(p) = I \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)}, \quad (8)$$

где:

I – амплитуда импульса тока,
 τ – длительность импульса,
 T – период повторения импульсов.

Получим решение задачи (6) - (8) в аналитической форме.

Исключая из (6) функцию \bar{H}_{y1} , получим:

$$\frac{\partial^2 \bar{E}_{x1}}{\partial z^2} - p^2 e_0 m_0 \bar{E}_{x1} = 0. \quad (9)$$

Общее решение уравнения (9) имеет вид:

$$\bar{E}_{x1} = A e^{\gamma_1 z} + B e^{-\gamma_1 z}, \quad (10)$$

где:

$\gamma_1 = p \sqrt{e_0 m_0}$, A и B – произвольные константы независимые от переменной z .

Поскольку функция E_{x1} должна удовлетворять условию (4) (принцип причинности), поэтому в (10) следует. Тогда подставляя (10) в граничное условие (7) получаем:

$$-\frac{\gamma_1}{\mu_0 p} A e^{\gamma_1 h} = \bar{F}(p), \quad (11)$$

имеем:

$$A = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} e^{-\gamma_1 h} \bar{F}(p). \quad (12)$$

Таким образом, преобразование Лапласа компоненты ЭП можно представить в следующем виде:

$$\bar{E}_{x1} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \times \frac{(1 - e^{-p\tau})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)} \times e^{\gamma_1(z-h)}. \quad (13)$$

Если теперь воспользоваться обратным преобразованием Лапласа [5], то легко получить выражение для напряженности ЭП:

$$E_{x1} = -\frac{I}{4\pi i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \times \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{(1 - e^{-pt})(2p^2 + 16\pi^2 f^2)}{p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16\pi^2 f^2)} e^{\gamma_1(z-h)} dp. \quad (14)$$

где:

$a > 0$ – произвольное постоянное число.

Интеграл в (14) можно вычислить с помощью метода отчислений [5]. Легко видеть, что подынтегральная функция в (14) имеет особенности по переменной p в комплексной плоскости типа полюса в точках:

$$p_n = i \frac{2\pi n}{T}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (15)$$

Тогда используя метод вычетов [5], после ряда элементарных преобразований окончательно получаем:

$$E_{x1} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I \times \left[Q^{-1} + \frac{2}{p} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(pnQ^{-1})}{n} \cos\left[\frac{2pn}{T} \left(t - t_0 - \frac{t}{2}\right)\right] \right], \quad (16)$$

где:

$t_0 = \sqrt{e_0 m_0} (h - z)$; $Q = T/t$ – скважность импульса.

Формула (16) справедлива для момента времени $t > t_0$, то есть когда первый импульс приходит в точку наблюдения с координатой z (h – расстояние от начала координат до источника). При временных наблюдениях $t < t_0$ следует:

$$E_{x1} = 0. \quad (17)$$

Рассмотрим теперь задачу о прохождении ЭМП (16) в почву. Пусть предел почвы совпадает с плоскостью XY . В полупространстве $t > 0$, возбуждается поле (16) поверхностной плотностью тока, заданной на плоскости $z = h$. При сделанных выше предположениях, задача состоит в определении поля, которое прошло через границу воздух – почва ($z = 0$). Запишем уравнения Максвелла в декартовой системе координат и применим преобразование Лапласа по временной переменной. Тогда в полупространстве $z > 0$ поле можно представить в виде:

$$E_{x1} = \bar{E}_{x1}^i + R e^{-g_1 z},$$

$$\bar{H}_{y1} = -\frac{I}{m_0 p} \left(\frac{\partial \bar{E}_{x1}^i}{\partial z} - g_1 R e^{-g_1 z} \right), \quad (18)$$

где:

R – амплитуда отраженной волны,

\bar{E}_{x1}^i – преобразование Лапласа поля возбуждаемого

поверхностным током (формула (16)):

$$\bar{E}_{x1}^i = \Phi(p) e^{g_1 z},$$

$$\Phi(p) = -\sqrt{\frac{m_0}{e_0}} \times \frac{(1 - e^{-pT})(2p^2 + 16p^2 f^2)}{2p(1 - e^{-pT})(p^2 + 16p^2 f^2)} \times e^{-g_1 h}. \quad (19)$$

Поле, которое прошло в почву (полупространство $z < 0$) должна удовлетворять следующим уравнением:

$$-\frac{\partial \bar{H}_{y2}}{\partial z} = (e e_0 p + s) \bar{E}_{x2}, \quad \frac{\partial \bar{E}_{x2}}{\partial z} = -p m_0 \bar{H}_{y2}, \quad (20)$$

где:

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость почвы;

σ – удельная проводимость почвы.

На границе раздела сред ($z = 0$) тангенциальные компоненты поля должны быть непрерывными:

$$\bar{E}_{x1} \Big|_{z=0} = \bar{E}_{x2} \Big|_{z=0}, \quad \bar{H}_{y1} \Big|_{z=0} = \bar{H}_{y2} \Big|_{z=0}. \quad (21)$$

С (20) имеем:

$$\bar{E}_{x2} = \bar{T} e^{g_2 z}, \quad \bar{H}_{y2} = -\frac{g_2}{m_0 p} \bar{T} e^{g_2 z}, \quad (22)$$

где:

$$g_2 = \sqrt{p^2 e e_0 m_0 + p s m_0},$$

\bar{T} – амплитуда пройденной волны.

В (22) учтено, что при $z \rightarrow -\infty$ поле должно уменьшаться, поскольку удельная проводимость $\sigma \neq 0$.

Подставляя (18) и (22) в условия сопряженной (21) определяем неизвестную амплитуду \bar{T} проходной волны. После ряда преобразований получаем следующее выражение для прохождения поля:

$$E_{x2} = -\sqrt{\frac{m_0}{e_0}} \times \frac{(1 - e^{-pT})(2p^2 + 16p^2 f^2) e^{g_2 z - g_1 h}}{\sqrt{p}(1 - e^{-pT})(p^2 + 16p^2 f^2) \left(\sqrt{p} + \sqrt{e p + \frac{s}{e_0}} \right)} \times \frac{g_2 I (1 - e^{-pT})(2p^2 + 16p^2 f^2) e^{g_2 z - g_1 h}}{\sqrt{e_0 m_0} p^{3/2} (1 - e^{-pT})(p^2 + 16p^2 f^2) \left(\sqrt{p} + \sqrt{e p + \frac{s}{e_0}} \right)}. \quad (23)$$

Если теперь применить к (23) обратное преобразование Лапласа, то получим выражение для напряженности ЭП в почве:

$$E_{x2}(z,t) = -\sqrt{\frac{m_0}{e_0}} \frac{I}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{(1 - e^{-pT})(2p^2 + 16p^2 f^2)}{\sqrt{p}(1 - e^{-pT})(p^2 + 16p^2 f^2)} \times \frac{e^{g_2 z - g_1 h}}{\left(\sqrt{p} + \sqrt{e p + \frac{s}{e_0}} \right)} dp, \quad (24)$$

где: $a > 0$.

Полученное выражение (24) определяет взаимодействие ЭМП с биологическими объектами, находящимися в почве.

ВЫВОДЫ

Для определения биотропного параметров взаимодействия электромагнитного поля с биологическими объектами необходимо использовать разработанную модель и полученное математическое выражение (24) для описания напряженности электромагнитного поля в почве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Cramer H.N. 1967.** Pflanzenschutz und Welternte / Cramer H. N. // Pflanzenschutz Nachrichten «Bayer» 513-523.
2. **Boyarskii D.A. 2001.** Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing / Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu // Progress in Electromagnetics Reserch. PIER. 251-270.
3. **Семенов А.А. 1968.** Теория электромагнитных волн / Семенов А. А. – М.: Изд. Моск. университет, 317.
4. **Лаврентьев М.А. 1958.** Методы теории функций комплексного переменного / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. – М.: ГИФМЛ, 647.
5. **Дмитриев В.И. 1987.** Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики / Дмитриев В. И., Захаров Е. В. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 167.
6. **Бородин И.Ф. 1987.** Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве / И. Ф. Бородин, Г. А. Шарков, А. Д. Горин. – М.: ВНИИТЭИ Агротром, 138.
7. **Бородин И.Ф. 1989.** Анализ использования СВЧ-энергии в агропромышленном комплексе / И. Ф. Бородин // В сб.: Использование СВЧ-энергии в сельскохозяйственном производстве. – Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 13.
8. **Калинин Л.Г. 1996.** Научно-технические аспекты широкого применения микроволновых технологий. Состояние вопроса, проблемы, решения / Калинин

- Л. Г. // В сб. микроволновые технологии в народном хозяйстве. – Одесса: ОКФН, 62-69.
9. **Калинин Л.Г. 1966.** Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы: [Сб. науч. работ / Ред. Акад. МАИ Калинин Л. Г.]. – Одесса: ОКФА, 108.
 10. **Valeriy Voityuk, Volodymyr Boiko, Roman Yakimov. 2007.** Определение влажности почвы по коэффициентам отражения электромагнитных волн. // MOTROL Motorization and power industry in agriculture. – Lublin, Vol. 9A. 47-55. (Украина).
 11. **Клейман А.С. 1999.** Некоторые вопросы создания и применения, широкодиапазонных КВЧ источников колебаний / [Клейман Л. С., Кравченко П. А., Кучин Л. Ф. и др.] – Харьков: Украинский метеорологический журнал. № 2. – 20-23.
 12. **Черенков А.Д. 1990.** Исследование комплексного влияния СВЧ-поля и биологически активных химических соединений на вредителей сельского хозяйства / Черенков А. Д., Черепнев А. С., Кучин Л. Ф. // Труды науч.-практ. конф. – Ташкент: Ин-т инж. Иригации и механиз. сельского хозяйства. – 12-14.
 13. **Касаткин Л.В. 2001.** Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД / Касаткин Л. В. // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — Том 44, № 3. – 18-25.
 14. **Bayuk F. 1977.** KA-band solid state power amplifier. IEEE Trans on MTT-S / Bayuk F., Raue J. // Intern. Microwaves Symp. 29-31.
 15. **Chang K. 1971.** Millimeter-wave combining techniques. IEEE Trans / Chang K., Sun S. // Proc. of the IEEE.–Vol. 59. –102-103.
 16. **Kurokawa K. 1971.** An X-band 10-Watt multiple Impatt oscillator / Kurokawa K. // Proc. of the IEEE.– Vol. 59. – 102 – 103.
 17. **Губанов В.П. 1994.** Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения / Губанов В. П. [и др.] // Письма в ЖТФ. – Т. 20, № 14. – 89-93.
 18. **Baum C.E. 1993.** Impulse radiating antennas / / Baum C. E., Farr E. G. // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics. – New York: Plenum Press. 139-147.
 19. **Giri D.V. 1997.** Design, Fabrication, and Testing of a Paraboloidal Reflector Antenna and Pulser System for Impulse-Like Waveforms / Giri D. V., Lackner H., Smith I. D., Morton D. W., Baum C. E., Marek J. R., Prather W. D., and Scholfield D. W. // IEEE Trans. Plasma Sci – V. 25. – 318-326.
 20. **Хала А.В. 2010.** Алгоритм расчета сверхширокополосной антенны / Хала А. В., Корольков А. В. // Математическая морфология. Электрон. математический и медико-биологический журнал. – Т. 9. – Вып. 1. – URL: <http://www.smolensk.ru>.
 21. **Исмаилов Э.Ш. 1987.** Биофизическое действие СВЧ-излучений / Исмаилов Э. Ш. – М.: Энергоатомиздат. – 144.
 22. **Козак А.В. 2012.** Применение ЭМП для уничтожения в почве биологических вредителей корневой системы растений / Козак А. В. // Вестник национального технического университета «ХПИ». № 14. – 15.
 23. **Boyarskii D.A. 2001.** Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing / Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu // Progress in Electromagnetics Reserch. PIER. 35 – 251-270.
 24. **Семенов А.А. 1968.** Теория электромагнитных волн / Семенов А. А. – М.: Изд. Моск. университет. – 317.
 25. **Лаврентьев М.А. 1958.** Методы теории функций комплексного переменного / Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. – М.: ГИФМЛ. – 647.
 26. **Дмитриев В.И. 1987.** Интегральные уравнения в крайних задачах электродинамики / Дмитриев В. И., Захаров Е. В. – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 167.
 27. **Верлань А.Ф., Сизиков В.С. 1986.** Интегральные уравнения. Методы. Алгоритмы. Программы. Справочное пособие. / Верлань А. Ф., Сизиков В. С. – Киев: Наукова думка. – 543.
 28. **Пиротти Е.Л. 2000.** Изменение мембранного потенциала клеток биологических объектов, находящихся во внешних электромагнитных полях / Е. Пиротти, А. Черенков // Вестник Харьковского государственного политехнического института. – Харьков: ХПГУ, Вып. 92. – 96-99.
 29. **Аккерман Ю. 1964.** Биофизика / Аккерман Ю. [пер. с англ.]. – М.: Мир. – 684.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF
ELECTROMAGNETIC PULSE SIGNALS
ON BIOLOGICAL PESTS IN THE SOIL

Summary. Scientific and practical researches in recent years show that the alternative chemical method of plant protection method can be based on the environmentally safe and effective pulsed electromagnetic technology. Inhibition of pests in the soil pulsed electromagnetic radiation (EMR) is not only processes high rate of temperature rise in the object, but also information effects of EMF on the cell membrane of insects.

Strong broadband radiation pulses are used in radar remote sites, the study of electromagnetic compatibility and electronic stability systems under the influence of strong electromagnetic fields. In agriculture, these fields can be successfully used to control pests that live in the upper layers of the soil.

Solves an initial-boundary value problem for the system of Maxwell's equations that model the impact of the sequence of electromagnetic pulses on biological pests (e.g., larvae of the may beetle) found in soil. Using Laplace transform the initial non-stationary problem is reduced to the problem of diffraction of EM waves on a region containing biological pests, which are modeled by an isotropic homogeneous medium with a complex DP. The problem of diffraction is solved by the method of volume integral equations in the born approximation. The result is an expression for the tension EP averaged over a region containing biological pests.

Key words: the Born approximation, Maxwell's equations, Laplace transforms, tangential components, checkpoint wave.

