

## МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В САДОВОДСТВЕ

Косулина Н. Г., Черенков А. Д.

Решена электродинамическая задача по определению параметров импульсных сигналов для уничтожения вредителей корневой системы саженцев плодовых культур.

**Постановка проблемы.** Применение ядохимикатов для уничтожения почвенных вредителей корневой системы растений является не всегда эффективным и, кроме того, ядохимикаты наносят вред окружающей среде и уничтожают полезные насекомые. Многолетние исследования, связанные с воздействием электромагнитного поля (ЭМП) на вредные микроорганизмы, дают основание по их применению для уничтожения вредителей корневой системы саженцев плодовых культур [1].

**Анализ предшествующих исследований.** Литературный анализ показывает, что электромагнитные излучения разной интенсивности находят применение для уничтожения патогенных микроорганизмов, лечения животных и людей [1]. Также установлено, что наиболее эффективным для уничтожения вредителей растений является импульсное излучение [1].

**Цель статьи.** Целью статьи является проведение теоретических исследований по определению оптимальных биотропных параметров импульсного электромагнитного излучения для уничтожения вредителей корневой системы саженцев плодовых культур.

**Основной материал исследования.** Применение импульсного электромагнитного поля для уничтожения биологических вредителей (личинки майского жука и др.), находящихся в почве, сопровождается нагревом тканей организма вредителей или разрушением мембран биологических клеток. С точки зрения электродинамики все задачи подобного типа сводятся к задаче дифракции ЭМ волн на области, содержащей биологические вредители, которые моделируются изотропной средой с комплексной диэлектрической проницаемостью (ДП). В качестве модели почвы рассматривается среда с относительной ДП, описываемой выражением [2]:

$$\varepsilon = a \sum_{n=1}^N V_n \varepsilon_n + \frac{1-a}{\sum_{n=1}^N V_n \varepsilon_n}, \quad (1)$$

где  $V_n$ ,  $\varepsilon_n$  – объемная доля и ДП компонент смеси (связанная и свободная вода, воздух, твердые частицы и т.п.);  $a$  – свободный параметр. Будем для определенности предполагать, что почва состоит из четырех компонент ( $N = 4$ ).

Для решения задачи введем декартовую систему координат  $XYZ$  таким образом, что граница раздела воздух – почва совпадает с плоскостью  $XY$ , а полупространство  $Z < 0$  заполнено почвой. Также считаем – на плоском раскрытии антенны задан ток с плотностью  $\vec{j}(t)$ , зависящий от времени следующим образом:

$$\vec{j}(t) = F(t) \vec{e}_x. \quad (2)$$

Здесь  $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$ ,  $\vec{e}_z$  – орты декартовой системы координат, а функция  $F(t, T, \tau, I)$  равна нулю при  $t < 0$ , а при  $t \geq 0$  является периодическим прямоугольным импульсом;  $I$  – амплитуда импульса тока;  $\tau$  – длительность импульса;  $T$  – период повторения импульсов. Возбужденное источником (2) ЭМП должно удовлетворять системе нестационарных уравнений Максвелла [3]:

$$\begin{aligned} \text{при } z > 0: \operatorname{rot} \vec{H}_1 &= \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial t} + \vec{j}; \\ \operatorname{rot} \vec{E}_1 &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_1}{\partial t}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{при } z < 0: \operatorname{rot} \vec{H}_2 &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_2}{\partial t} + \sigma \vec{E}_2; \\ \operatorname{rot} \vec{E}_2 &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_2}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума (предполагается, что относительная диэлектрическая ДП – соответственно относительная ДП и удельная проводимость почвы).

Пусть область  $D$ , находящаяся в почве, содержит биологические вредители. Тогда электромагнитное поле в этой области должно удовлетворять уравнениям Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_3 &= \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_3}{\partial t} + \sigma_1 \vec{E}_3; \\ \operatorname{rot} \vec{E}_3 &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_3}{\partial t}. \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\sigma_1$  – эффективные ДП и удельная проницаемость области  $D$ .

Величины  $\varepsilon_1$  и  $\sigma_1$  выражаются через ДП  $\varepsilon$  и проводимость  $\sigma$  почвы, и ДП  $\tilde{\varepsilon}$  и проводимость  $\tilde{\sigma}$  биологического вредителя по следующей формуле:

$$\varepsilon_1 = (1-b)\varepsilon + b\tilde{\varepsilon}, \sigma_1 = (1-b)\sigma + b\tilde{\sigma}, \quad (6)$$

где  $b = V_1/V$ ;  $V$  – объем области  $D$ ;  $V_1$  – объем области, занимаемой биологическими объектами.

На границе раздела сред ЭМП должно удовлетворять условию сопряжения и начальным условиям, которые при выбранной зависимости плотности тока от времени имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1|_{t<0} = \bar{H}_1|_{t<0} = 0, \quad \bar{E}_2|_{t<0} = \bar{H}_2|_{t<0} = 0, \\ \bar{E}_3|_{t<0} = \bar{H}_3|_{t<0} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение данной задачи проводилось в два этапа. На первом этапе решается задача о прохождении ЭМП, возбуждаемого плотностью тока (2) в почву. Далее, решается задача о взаимодействии прошедшего в почву поля с областью  $D$ , в которой находятся биологические вредители.

В результате решения задачи первого этапа было получено выражение для напряженности ЭП в почве на границе области с биологическими вредителями:

$$E_{x2}(z,t) = -\frac{\sqrt{\mu_0} I}{\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{(1-e^{-p\tau}) e^{pt+\gamma_2 z - \gamma_1 h}}{\sqrt{p}(1-e^{-pT}) \left( \sqrt{p} + \sqrt{ep + \frac{\sigma}{\varepsilon_0}} \right)} dp, \quad (8)$$

где  $h$  – расстояние от раскрыва антенны до почвы;  $a > 0$ .

Поле (9), прошедшее почву, дифрагирует на области  $D$ . В результате возникает вторичное ЭМ поле  $\bar{H}_3, \bar{E}_3$ , преобразование Лапласа которого должно удовлетворять системе уравнений Максвелла (6). Решение задачи второго этапа для напряженности ЭП в области, содержащей биологических вредителей, было получено в виде:

$$E_x = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \bar{E}_x e^{ipt} dp, \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{E}_x = B \left[ e^{\gamma_1 z_0} - k_0^2 (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1) G \right]; \quad G = G_1 + G_2.$$

$$G_1 = -\frac{1}{4\pi k^2} \int_{-h_1-d_1}^{-h_1} e^{\gamma_1 z} dz \int_{-d/2}^{d/2} \left[ \frac{e^{-ikR_+} (d/2 - x_0) (1 + ikR_+)}{R_+^3} - \frac{e^{-ikR_-} (d/2 + x_0) (1 + ikR_-)}{R_-^3} \right] dy;$$

$$G_2 = \frac{1}{4\pi} \int_{-h_1-d_1}^{-h_1} dz \int_{-d/2}^{d/2} dx \int_{-d/2}^{d/2} \frac{e^{-ikR}}{R} dy;$$

$$B = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} I \frac{(1 - e^{-p\tau}) e^{-\gamma_1 h}}{(1 - e^{-pT}) p};$$

$$R_{\pm} = \sqrt{(\pm d/2 - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2};$$

$$\gamma_1 = -ik_0 \sqrt{\varepsilon + i \frac{\sigma}{p \varepsilon_0}}; \quad k = k_0 \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0};$$

$$k_0 = p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0};$$

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 p}; \quad \bar{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 + \frac{\sigma_1}{p \varepsilon_0}.$$

$h$  – расстояние от антенны до границы раздела воздух-почва;  $h_1$  – глубина, на которой расположены биологические вредители.

В дальнейшем вместо величины  $E_x$  введем усредненную характеристику напряженности ЭП, а именно:

$$E_x^{cp} = \frac{1}{\tau V} \int_{t_0}^{t_0+\tau} dt \int_D E_x dV, \quad (10)$$

где  $t_0 = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} h + \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0} h_1$  – время, за которое импульс доходит до области  $D$ , содержащей биологических вредителей;  $\tau$  – длительность импульса;  $V$  – объем области  $D$ .

С помощью (10) были проведены численные расчеты по определению оптимальных параметров ЭМИ сигнала, при которых среднее значение напряженности ЭП достигает максимального значения. Исследовалась зависимость  $E_x^{cp}$  от скважности импульса  $Q = T/\tau$ .

**Выводы.** Как следует из анализа результатов оптимальное значение скважности ЭМИ соответствует значению  $Q = 200$ ,  $\tau = 100$  нс. При этом значении скважности реализуется максимум среднего значения напряженности ЭП в области, содержащей биологические вредители. Нормированное значение напряженности ЭП, в зависимости от вида почвы, лежит в пределах 0,5...0,7.

#### Список использованных источников

1. Исмаилов Э. Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений / Э. Ш. Исмаилов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
2. Подковко Н. Ф. Модель комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в диапазоне СВЧ / Н. Ф. Подковко // Вопросы радиоэлектроники. – 1990. – Вып. 1. – С. 73 – 80.
3. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн / А. А. Семенов. – М.: Изд. Моск. университета, 1968. – 317 с.

#### Анотація

#### МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНОЛОГІЯ В САДІВНИЦТВІ

Косуліна Н. Г., Черенков А. Д.

Вирішено електродинамічне завдання за визначенням параметрів імпульсних сигналів для знищення шкідників кореневої системи саджанців плодкових культур.

#### Abstract

#### MICROWAVE TECHNOLOGY IS IN GARDENING

N. Kosulina, A. Cherenkov

An electrodynamic task on determination of parameters of impulsive signals for elimination of wreckers of rootage of nursery transplants of fruit cultures is decided.