

НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНА ЕЛЕКТРОМАГНІТНА АКТИВАЦІЯ НАСІННЯ

**Л. Є. Никифорова, доктор технічних наук
С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова, старші викладачі
Відокремлений підрозділ Національного університету
біоресурсів і природокористування України
“Бережанський агротехнічний інститут”
e-mail: profnikiforova@gmail.com**

Анотація. Досліджено вплив електромагнітного випромінювання на насіння тепличних культур та визначено технологічні параметри низькоенергетичної електромагнітної технології їх активації. Теоретично обґрунтовано механізм інформаційно-резонансної взаємодії низькоенергетичного електромагнітного випромінювання зі структурами рослинної клітини, які відображують інтегральні характеристики та динаміку процесів перетворення поглинутої енергії в окремі насінні.

Ключові слова: *низькоенергетичні електромагнітні технології, інформаційно-резонансний вплив, ефективність опромінення, математичні моделі, біотропні параметри, насіння, тепличні культури*

У вирішенні продовольчої проблеми України значну роль відіграє виробництво овочевої продукції протягом усього року, що можливо лише при використанні технологій захищеного ґрунту.

Середня врожайність огірків та томатів в Україні (найбільш розповсюджених овочів у теплицях) становить 8,5–9,0 кг/м², тоді як їх потенційна врожайність може досягти 30–35 кг/м². Однак, реалізувати такий потенціал у середньому по країні вдається лише на 20–30%.

Головними чинниками такого становища є недотримання технології, використання насіння з низькими посівними якістьми та відхилення від норми кліматичних факторів, що впливають на ріст та продуктивність тепличних рослин. Частка застосування некондиційного насіння останніми роками збільшилася до 90%. Унаслідок цього, знижується врожайність до 30%, що призводить до підвищення трудовитрат, енергозатрат та собівартості продукції. Найбільш ефективним методом вирішення цього питання, є підвищення посівної якості насіння шляхом застосування електромагнітних технологій їх оброблення.

Однак, є певні труднощі, пов'язані з різними поглядами на механізм взаємодії низькоенергетичних електромагнітних полів із насінням і, як наслідок, визначення оптимальних параметрів і режимів роботи засобів керування даними технологіями. Тому дослідження впливу

електромагнітного поля на ці біологічні об'єкти, визначення технологічних параметрів їх передпосівного оброблення та створення ефективних електромагнітних технологій є актуальними.

Мета досліджень – підвищення врожайності тепличних культур шляхом застосування електромагнітних технологій на базі теоретичних положень активації насінневого матеріалу під впливом низькоенергетичних електромагнітних полів.

Матеріали та методика досліджень. Як матеріали дослідження було обрано насіння огірків та томатів. Теоретична складова методики активації насіння базується на застосуванні елементів системного аналізу, методів теоретичної й математичної фізики, теоретичних основ електродинаміки, електроніки й радіоавтоматики, методів розв'язування диференціальних і інтегродиференціальних рівнянь. Достовірність наукових положень встановлювалася на основі відповідності результатів теоретичних досліджень – математичних моделювань та обчислювальних експериментів, результатам експериментальних досліджень та виробничих випробувань.

Експериментальні дослідження передбачали використання математичного методу планування повного факторного експерименту з використанням регресійного та дисперсійного методів аналізу отриманих даних.

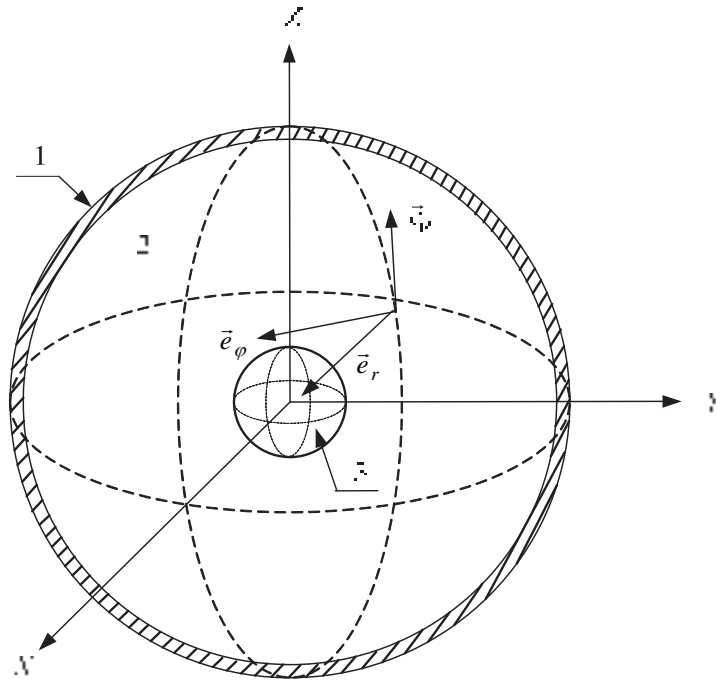
Результати досліджень. Одним із можливих факторів позитивної дії низькоенергетичного електромагнітного випромінювання на розвиток рослин є його вплив на транспортування іонів через мембрану клітини і живильних речовин із ендосперму всередину зернівки. Дослідження цього процесу можливо лише в тому випадку, коли відомо, як розподіляються діючі електромагнітні поля на даних структурах.

Насіння тепличних культур подано у вигляді еліпсоїда, що заповнений ендоспермом, усередині якого знаходиться зернівка. Еліпсоїд оточений тонкою шкіркою. Якщо розглядати дану систему як низькодобротний резонатор, то очевидно, що вона має спектр резонансних частот.

Визначення розподілу електромагнітного поля всередині зернівки зводилося до розв'язання задачі про розсіювання падаючої електромагнітної хвилі на багатошаровій структурі, що має форму вкладених еліпсоїдів.

Для одержання необхідних результатів приймалося, що центр насіння збігається із центром прямокутної декартової системи координат, а плоска хвиля поширюється нормально до поверхні насіння та її електричний вектор спрямований по дотичній до поверхні (див. рисунок). Крім того, для спрощення припускалося, що центр зернівки збігається з центром насіння, а саме: насіння та зернівка мають сферичну форму.

Вважалося, що кожний із шарів насіння є однорідним, тобто має постійну діелектричну проникність. Діелектричну проникність середовища, що оточує насіння, позначено ϵ_0 , так само позначено й проникність шкірки; проникність ендосперму позначено ϵ_1 , а зернівки – ϵ_2 .



Падіння плоскої електромагнітної хвилі на насіння: 1 – шкірка насіння;
2 – ендосперм; 3 – зернівка; \vec{e}_r , \vec{e}_φ , \vec{e}_θ – координатні орти

Для розв'язання задачі падаюче поле розкладалося за двома векторними сферичними хвильовими функціями \vec{M} і \vec{N} .

У цьому випадку електрична $\vec{E}^{пад}$ і магнітна $\vec{H}^{пад}$ компоненти падаючого поля у сферичній системі координат подано у вигляді:

$$\vec{E}^{пад} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{no}^+ - i\vec{N}_{ne}^+);$$

$$\vec{H}^{пад} = -\frac{k_1 E_0}{\mu_0 \omega} \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{ne}^+ + i\vec{N}_{no}^+), \quad (1)$$

де n – номер гармоніки падаючого поля;
 E_0 – амплітуда електричної складової падаючого поля;
 $i = \sqrt{-1}$.

$$\vec{M}_{n_e^o}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \left[\pm \vec{e}_\theta \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} - \right. \\ \left. - \vec{e}_\varphi \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \right]; \quad (2)$$

$$\vec{N}_{n_e^o}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k_1 r} \left\{ \vec{e}_r \frac{n(n+1)}{\sqrt{k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) P_n^{(1)}(\cos \theta) \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} + \right. \\ \left. + \vec{e}_\theta \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \pm \right. \\ \left. \pm \vec{e}_\varphi \frac{1}{\sin \theta} \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta) \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right\}; \quad (3)$$

де $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ – приєднані функції Лежандра;

$J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ – функції Бесселя першого роду напівцілого порядку;

$\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_\theta$ – координатні орти;

похідна береться за змінною $(k_1 r)$;

$k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_0}$ – хвильове число в навколишньому середовищі зернівки;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота падаючої хвилі;

індекси o або e означають вибір верхнього або нижнього варіанта тригонометричної функції й знака.

Компоненти розсіяної хвилі – $\vec{E}^{\text{роз.}}$, $\vec{H}^{\text{роз.}}$, у цьому випадку, мають вигляд:

$$\begin{cases} \vec{E}^{\text{роз.}} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n^{\text{роз.}} \vec{M}_{no}^- - i b_n^{\text{роз.}} \vec{N}_{ne}^-), \\ \vec{H}^{\text{роз.}} = -\frac{k_1}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n^{\text{роз.}} \vec{M}_{ne}^- + i a_n^{\text{роз.}} \vec{N}_{no}^-), \end{cases} \quad (4)$$

де $a_n^{\text{роз.}}$ й $b_n^{\text{роз.}}$ – коефіцієнти відбиття для електричної й магнітної складової падаючого електромагнітного поля.

Функції $\vec{M}_{n_e}^-$ й $\vec{N}_{n_e}^-$ отримувалися з $\vec{M}_{n_e}^+$ і $\vec{N}_{n_e}^+$ за допомогою заміни $J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ на функцію Ханкеля другого роду напівцілого порядку $H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r)$. При цьому слід зазначити, що знак плюс ставився до падаючих полів, а мінус – до розсіяних.

Нарешті, внутрішнє поле визначалося за допомогою виразів:

$$\begin{cases} \vec{E} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \vec{M}_{n_o} - i b_n \vec{N}_{n_e}); \\ \vec{H} = -\frac{k}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \vec{M}_{n_e} + i a_n \vec{N}_{n_o}). \end{cases} \quad (5)$$

де: a_n й b_n – коефіцієнти проходження електричної й магнітної складової падаючого електромагнітного поля усередину зернівки.

З урахуванням деформації зернівки, було отримано розв'язок для електричної й магнітної складової внутрішнього поля зернівки:

$$E_r = \frac{3E_0 b_1}{k_2^2 r^2} \sin \theta \cos \varphi \left\{ \frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \\ \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + 3 \cos k_2 r \right] \right\}; \quad (6)$$

$$E_\varphi = i \frac{3E_0}{2kr} \left\{ a_1 \sin \varphi \cos \theta \left[\cos kr - \frac{\sin kr}{kr} + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin kr \left(\frac{2}{kr} - kr \right) - 2 \cos kr \right] \right] + \right. \\ \left. + i b_1 \sin \varphi \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
E_{\theta} = & i \frac{3E_0}{2k_2 r} \left\{ a_1 \cos \varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] \left. \right] - \\
& - i b_1 \cos \varphi \cos \theta \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\};
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
H_r = & \frac{3E_0 a_1}{\omega \mu_0 k_2 r^2} \sin \theta \sin \varphi \left\{ \frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \\
& \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + 3 \cos k_2 r \right] \right\};
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
H_{\varphi} = & i \frac{3E_0}{2\omega \mu_0 r} \left\{ b_1 \cos \theta \cos \varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] \left. \right] - \\
& - i a_1 \frac{\cos \varphi}{2} \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l \varphi + \sin m \theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\};
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
H_{\theta} = & i \frac{3E_0}{2\omega\mu_0 r} \left\{ b_1 \sin\varphi \left[\frac{\sin k_2 r}{k_2 r} - \cos k_2 r + \right. \right. \\
& + \alpha (\sin l\varphi + \sin m\theta) \left[\sin k_2 r \left(k_2 r - \frac{2}{k_2 r} \right) + 2 \cos k_2 r \right] - \\
& - i a_1 \frac{\sin\varphi \cos\theta}{2} \left[\sin k_2 r \left(1 - \frac{1}{k_2^2 r^2} \right) + \frac{\cos k_2 r}{k_2 r} + \right. \\
& \left. \left. + \alpha (\sin l\varphi + \sin m\theta) \left[\cos k_2 r \left(k_2 r - \frac{3}{k_2 r} \right) + \sin k_2 r \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} - 2 \right) \right] \right] \right\}. \quad (11)
\end{aligned}$$

З виразів (6–11) випливає, що ступінь викривлення розподілу, що розглядається, буде залежати від ступеня деформації зернівки, тобто від величини параметра α .

Вирази (6–11) було використано для теоретичного визначення технологічних параметрів електромагнітного поля.

Таким чином, на основі математичної моделі отримано закономірності резонансного поглинання електромагнітного поля в насінні тепличних культур, які дозволяють визначити його частотний діапазон, що забезпечує активацію насіння. Для тепличних культур він становить 37–38 ГГц.

Для визначення густини потоку потужності й експозиції електромагнітного поля, що впливає на насіння тепличних культур, було проведено теоретичне дослідження дії даного поля на мембранний транспорт речовин.

У результаті теоретичних досліджень було отримано вираз для іонного струму, зумовленого дією надвисокочастотного поля:

$$\begin{aligned}
I_{\text{ЕМП}}^r \quad \Pi = & -4\pi R^2 \left[\frac{z_i^2 F^2 \varphi P_i l}{RT} \times \right. \\
& \times \frac{n_i^{\text{int}} e^{\frac{2z_i F \varphi}{RT}} + e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}} \left[\frac{z_i^2 F \varphi}{RT} (n_i^{\text{ext}} - n_i^{\text{int}}) - n_i^{\text{ext}} - n_i^{\text{int}} \right] + n_i^{\text{ext}}}{\left(\frac{z_i^2 F^2 \varphi}{e^{\frac{z_i F \varphi}{RT}} - 1} \right)^2} E + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{dt} \left. \right], \quad (12)
\end{aligned}$$

де z_i – зарядове число іона i ;

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}} \text{ – постійна Фарадея;}$$

φ – електричний потенціал;

P_i – коефіцієнт проникності іона;

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \text{ – газова постійна;}$$

n^{ext} і n^{int} – концентрації іонів поза та усередині мембрани, відповідно.

Чисельний аналіз виразу (12) дає змогу визначати щільності потоку потужності й експозицію ЕМП для оброблення насіння.

На підставі теоретичних досліджень із впливу низькоенергетичних електромагнітних полів на мембранний транспорт речовин, отримані залежності зміни іонного струму в клітинах насіння, що дали змогу визначити щільність потоку потужності та експозицію діючого електромагнітного поля. Для тепличних культур щільність потоку потужності становить 10–15 мкВт/см², експозиція – 10–15 хвилин, діапазон хвиль 36–39 ГГц. Для передпосівного оброблення насіння у лабораторних умовах (за результатами теоретичних і експериментальних досліджень) було розроблено ГППД, що перебудовується за частотою з параметрами: частотний діапазон 36–39 ГГц, короткочасна нестабільність частоти ($\tau_u = 10^{-2} - 10^{-6} \text{ c}$), вихідна потужність 5000 мВт, ККД 13%. Застосування розробленої методики обробки насіння дозволило підвищити їх проростання на 16–20 %; енергію росту – на 13–15 %; врожайність – на 25–30 %.

Висновки

Вплив електромагнітного поля на насіння з метою його активації є не до кінця визначеним. На основі розробленої математичної моделі отримано закономірності резонансного поглинання електромагнітного поля в насінні тепличних культур, що забезпечило отримання оптимальних параметрів резонансної дії та пристрій для її реалізації. Розроблена система дала змогу підвищити врожайність овочів на 25–30%.

Список літератури

1. Никифорова Л. Є. Системний аналіз при дослідженні електротехнологічних процесів низькоенергетичної високочастотної обробки насіння / Л. Є. Никифорова, Л. С. Червінський // Зб. наук. пр. : Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха, 2008. – Вип. 92. – С. 340–350.
2. Никифорова Л. Є. Моделювання взаємодії електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону з насінням тепличних культур // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. "Проблеми енергозбереження в АПК України". – Х. : ХДТУ, 2009. – Вип. 86. – С. 127–130.

3. Bloockman C.F. Biological response from AC electromagnetic fields coupled to geomagnetic fields// Prog. 9th Annul Conf. IEEE on Eng. Med. And Soc – Boston: Mass (USA). – 2014. – Vol. 1. – P. 83–84.

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ АКТИВАЦИЯ СЕМЯН

Л. Е. Никифорова, С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова

Аннотация. *Исследовано влияние электромагнитного излучения на семена тепличных культур и определены технологические параметры низкоэнергетической электромагнитной технологии их активации. Теоретически обоснован механизм информационно-резонансного взаимодействия низкоэнергетического электромагнитного излучения со структурами растительной клетки, которые отображают интегральные характеристики и динамику процессов преобразования поглощенной энергии в отдельном семени.*

Ключевые слова: *низкоэнергетические электромагнитные технологии, информационно-резонансное влияние, эффективность облучения, математические модели, биотропные параметры, семена, тепличные культуры*

LOW-ENERGY ELECTROMAGNETIC ACTIVATION OF SEEDS

L. Nikiforova, S. Gaydukevich, N. Semenova

Annotation. *Effect activating of seed glass-cultures by low energy of the electromagnetic fields was investigated. Technological parameters electromagnetic of activation seeds was identification. Mechanism of informatively-resonance co-operating of low-energy electromagnetic radiation with the structures of vegetable cage, which represent integral descriptions and dynamics of processes of transformation of eaten up energy in a separate seed was theoretical ground.*

Key words: *low-energy electromagnetic technologies, informatively is resonance influence, efficiency of irradiation, mathematical models, biottrope parameters, seed, glass-cultures*