

УДК 577.352.5: 631.53.027.34

Л.І. Леві, О.М. Петровський

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

На основі будови клітин визначені електричні властивості біологічної тканини, з якої складається насіння рослин. Показана зміна складових активного опору в залежності від частоти електромагнітного випромінювання за допомогою якого проводилась стимуляція. Експериментально доведено, що еквівалентну електричну схему неможливо звести до простих випадків з'єднання опорів і ємностей, а саме насіння не можна вважати нейтральним діелектриком. Розроблена методика оцінки інтенсивності обмінних процесів залежно від електричного опору насіння.

Ключові слова: насіння, мембрана, опір, ємність, частота, еквівалентна схема, обмінний процес.

Вступ

Проведення передпосівної обробки насіння різними чинниками впливу позитивно позначається на процесах його проростання, вегетації рослин, і як наслідок, покращується формування колосу, плодів, підвищується врожайність. Існує чимало технологій передпосівної обробки насінневого матеріалу, що включають хімічні, біологічні, фізичні фактори впливу на стан насіння з метою стимуляції фізіологічних процесів проростання і розвитку. Зміна біофізичних властивостей насіння, стимуляція обміну речовин, інтенсифікація проростання, збільшення поглинання води й добрив є вирішальними задачами передпосівної обробки. Результат дії високочастотного електромагнітного поля на насіння залежить від електричних характеристик насіння. Крім того, вивчення зміни електричних характеристик після ВЧ-обробки насіння дає певні відомості що до зміни обмінних процесів у насінні.

Мета досліджень. На основі електрофізичної моделі будови насіння визначити зміну його електричних властивостей під впливом електромагнітної стимуляції обмінних процесів, із позитивним впливом на фізіологічний стан – схожість та енергію росту рослин.

Вдосконалення способу високочастотної електромагнітної стимуляції з забезпеченням оптимальних змін електричних властивостей насіння.

Аналіз літературних джерел. Сформувався два основних уявлення про вплив електромагнітних полів радіочастотного діапазону на матеріали і речовини. Для високочастотної області (міліметровий діапазон) перевага віддається «інформаційному впливу» [7], а для низькочастотної області (сантиметровий, дециметровий, метровий діапазони) зміни пояснюються за рахунок теплового впливу.

Трансформація електромагнітної енергії у матеріалах і речовинах приводить до нагрівання, од-

нак, наслідки цього ефекту можуть бути різними, починаючи з чисто фізичних змін у речовині (плавлення, прискорення розчинення), чи супроводжуватися хімічними реакціями (утворення складних ефірів, розщеплення крохмалів) [3]. У рослинах і біологічних об'єктах електромагнітні поля забезпечують оборотні і необоротні процеси, що використовуються для прискорення проростання насіння і збільшення врожайності рослин, знищення комах та їхніх личинок [1, 4]. Неоднозначність одержуваних результатів після впливу ЕМП обумовлена багатфакторністю систем, а також змінними зовнішніми умовами, найбільш істотними з яких є: вихідна вологість і температура зразка, що опромінюється, відношення рівня потужності до маси, стан зразка (щільність і рухливість).

За особливостями впливу на біологічні об'єкти спектр електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону підрозділяють на п'ять інтервалів [3, 5].

1. Одиниці герц ... 10 кГц – хвильова зона знаходиться на відстанях, де інтенсивність електромагнітного поля втрачає свою біологічну значимість.

2. 10кГц ... 30 МГц – характерне нерівномірне поглинання електромагнітної енергії різними біоструктурами насіння. Поглинання енергії зростає пропорційно квадрату колової частоти ω^2 .

3. 30 МГц ... 10 ГГц – характерно виникнення виражених інтерференційних явищ, що супроводжується складним розподілом поглиненої енергії. Максимальне поглинання має місце у випадку виникнення резонансних явищ за певного співвідношення довжини хвилі і розмірів об'єкта [5, 8]. Виникають області так звані «гарячих плям».

4. 10 ... 200 ГГц – характерне швидке загасання хвилі під час проходження через тканини. Ефективна глибина проникнення близько 0,01 ... 0,1 λ . Характерний ефект локального впливу. На частотах 49 ... 60 ГГц спостерігаються біорезонансні явища.

5. 200 ... 3000 ГГц – характерно поглинання енергії самими поверхневими шарами.

В основі механізму дії ЕМ поля лежить первинна дія на електрично заряджені частинки (іони, електрони, атоми, молекули), з яких складаються тканини біологічного об'єкту. Це дія обумовлена як тепловим, так і нетепловим осциляторним ефектом високочастотних коливань. Під впливом ЕМ поля за рахунок трансформації високочастотної енергії в теплову всередині тканин утворюється тепло, що залежить від електричних властивостей тканин, головним чином, від питомої електропровідності й діелектричної проникності, а також від частоти застосовуваного струму.

За рахунок наявності ємнісної складової, загальний опір біологічних тканин буде залежати від частоти, на якій здійснюється вимір опору. Зі збільшенням частоти загальний опір буде зменшуватися за рахунок зменшення ємнісної складової опору.

На високих частотах опір буде прямувати до нуля, а загальний опір перестане залежати від частоти і визначається паралельно з'єднаними опорами. Таке явище має місце на частотах 10^5 – 10^6 Гц. Найбільший опір біологічна тканина має для постійного струму і струму низької частоти, коли ємнісний опір набагато перевищує значення активного опору. Відношення опору на низькій частоті до опору на високій частоті називається поляризаційним коефіцієнтом. Величина поляризаційного коефіцієнту вказує на інтенсивність обмінних процесів. Чим більша інтенсивність обмінних процесів, тим більший поляризаційний коефіцієнт. Зазначимо, що у разі припинення обмінних процесів і руйнування клітинних мембран поляризаційний коефіцієнт зменшується. Самі мембрани стають провідниками, їхній опір стає малим. Тому загальний опір буде мати найменше значення і не буде залежати від частоти.

За частоти змінного струму близько 10^5 – 10^6 Гц ємнісна складова комплексного опору зменшується. Активний опір не залежить від частоти і лишається весь час сталим.

Коли клітини мембрани повністю зруйновані або їх функції остаточно порушені, ємнісна складова комплексного опору майже відсутня, то загальний опір перестане залежати від частоти і може вважатися чисто активним.

Основні результати теоретичних досліджень

Розроблено спосіб опромінення насіння. Спосіб полягає в опроміненні насіння електромагнітним полем високої частоти, яке виникає між конденсаторними пластинами, з'єднаними з генератором електромагнітних коливань [6].

Використовується синусоїдальна безперервна форма сигналу, що задається генератором сигналів,

забезпечується роботою ключа і блоку управління. Час опромінення обумовлений біофізичними властивостями опромінюваного насіння. Потужність залежить від фізіологічних параметрів оброблюваного матеріалу та умов навколишнього середовища.

Визначення електричних характеристик насипного насіння пшениці озимої проводили за допомогою вимірювача добротності (Q-метра) Е-4-4. Діапазон частот генератора цього приладу знаходиться в межах від 50кГц до 35МГц. Вимірювання проводилися на частотах 3, 6, 9, 12 МГц. Використовувався метод розстроювання ємності.

Вимірювалися характеристики необробленого насіння (контрольна партія) і насіння, оброблене електромагнітним полем ВЧ діапазону. Опромінення ВЧ полем проводили на частоті 27,12МГц за допомогою апарату УВЧ-60 Мед ТеКо. Потужність опромінення становила 60Вт, а тривалість обробки 5хвилин.

Наявність у біологічних тканинах поляризованих мембран приводить до того, що крім активного опору біологічні тканини характеризуються ще й ємнісним опором. Взагалі опір біологічних тканин, внаслідок вищезгаданих причин, буде комплексним. Мембрану клітини можна представити в вигляді паралельно з'єднаних активного опору та ємності (реактивного ємнісного опору). Опори міжклітинного і внутрішньоклітинного середовищ матимуть переважно лише активну складову. Для зручності визначення лінійних розмірів клітин, що необхідно у врахуванні масштабного фактора, представлено клітини в вигляді прямокутних паралелепіпедів. Розміри паралелепіпедів такі ж, як і розміри клітин. Зміна форми клітини істотно не вплине на електричні параметри. Як відомо, на електричні параметри перш за все впливають фізичні властивості тіла (питомий опір, діелектрична проникність, лінійні розміри). Форма тіла має другорядне значення.

У моделі зроблено спрощення і розташовано клітини впорядковано в вигляді прямокутного паралелепіпеда (рис. 1). У цій моделі клітини розглядаються як паралелепіпеди певних розмірів, оточені зовнішніми клітинними мембранами, які, в свою чергу, оточені міжклітинним середовищем.

Еквівалентна електрична схема однієї комірки моделі (клітини) може бути представлена певним поєднанням опорів і ємностей (рис. 2.).

Оскільки можна вважати, що опір міжклітинного середовища набагато менший опору клітини $r_{mc} \ll r_k$, то в подальших розрахунках не враховано r_{mc} . Комплексний опір мембрани \dot{Z}_1 , паралельно з'єднаних r_m і C_m , буде визначатися таким чином [2]:

$$\frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{X_c} = \frac{1}{r_m} + j\omega C_m. \quad (1)$$

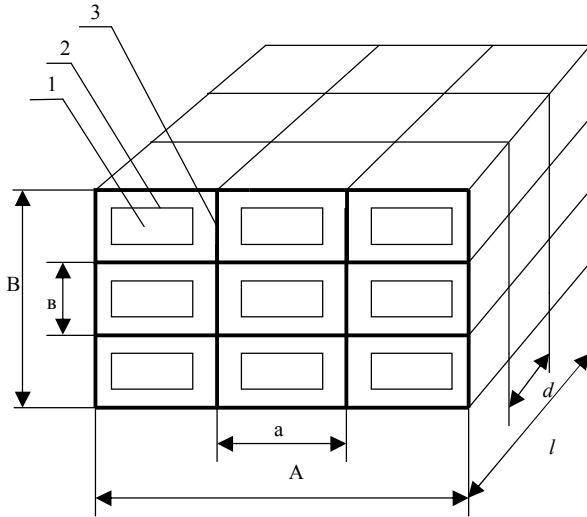


Рис. 1. Модель тіла, що має клітинну будову:
1 – вміст клітини; 2 – клітинна мембрана;
3 – міжклітинне середовище; a, b, d – лінійні розміри клітини; A, B, l – лінійні розміри насіння

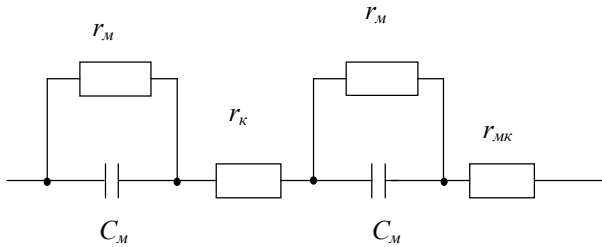


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема клітини:
 r_m – активний опір мембрани, Ом; C_m – ємність мембрани, Ф; r_k – опір вмісту клітини, Ом; r_{mk} – опір міжклітинного середовища, Ом.

Після перетворень з урахуванням масштабного фактора одержано:

$$\dot{Z}_{заг} = (\gamma l / S) \times \frac{R_{КОМ} \rho_{МК}^2 + \gamma \rho_{МК} R_{КОМ}^2 - \gamma X_{КОМ}^2 - j(\rho_{МК} X_{КОМ} + \gamma R_{КОМ} X_{КОМ} \rho_{МК} + \rho_{МК} \gamma R_{КОМ} X_{КОМ})}{(\rho_{МК} + \gamma R_{КОМ})^2 + (\gamma X_{КОМ})^2}, \quad (2)$$

$$\text{де } R_{КОМ} = (r_k + 2r_m + r_k r_m^2 \omega^2 C_m^2) / (1 + \omega^2 C_m^2 r_m^2), \quad (3)$$

$$X_{КОМ} = \omega C_m \cdot 2r_m^2 / (1 + \omega^2 C_m^2 r_m^2). \quad (4)$$

Аналізуючи вираз (2), можна побачити, що простий вигляд він має тільки у деяких окремих випадках, коли здійснюється висока поляризація клітинних мембран (значна інтенсивність обміну речовин), то $\omega^2 C_m^2 r_m^2 \gg 1$. Якщо, крім того, можна знехтувати провідністю міжклітинного середовища, тобто $1/R \rightarrow 0$, і відповідно $\rho_{МК}^2 \rightarrow \infty$, то поділивши чисельник і знаменник виразу (2) на $\rho_{МК}^2$ і враховуючи, що за зробленими припущеннями $\rho_{МК} \rightarrow \infty$, одержимо:

$$\dot{Z}_{заг} = \frac{\gamma l}{S} (R_{КОМ} - jX_{КОМ}). \quad (5)$$

Тобто, за зробленими припущеннями, опір насіння складається з послідовно з'єднаних активного опору $\gamma R_{КОМ} / S$ та ємнісного опору $\gamma X_{КОМ} / S$.

Якщо опір комірки моделі (клітини) переважно реактивний (ємнісний), але провідністю міжклітинного середовища нехтувати не можна, то

$$\frac{1}{\dot{Z}_{заг}} = \frac{S}{\gamma l} \left(\frac{\gamma}{\rho_{МК}} + j \frac{1}{X_{КОМ}} \right). \quad (6)$$

У цьому випадку ми маємо паралельне з'єднання активного опору міжклітинного середовища та ємнісного опору мембрани. За достатньо низьких і достатньо високих частотах опір тканини буде переважно активним, але його абсолютне значення за низьких частот суттєво залежить від степеня поляризації клітинних мембран.

Експериментальні дослідження

Результат дії високочастотного електромагнітного поля на насіння залежить від електричних характеристик насіння. Крім того, вивчення зміни електричних характеристик після ВЧ обробки насіння дає певні відомості щодо зміни обмінних процесів у насінні.

Визначення електричних характеристик насипного насіння озимої пшениці проводили за допомогою вимірювача добротності (Q-метра) Е-4-4. Діапазон частот генератора цього приладу знаходиться в межах від 50кГц до 35 МГц. Вимірювання проводилися на частотах 3, 6, 9, 12 МГц. Використовувався метод розстроювання ємності. Насіння насипали у вимірювальну комірку, в якій знаходилися дві паралельні металеві пластинки, що утворювали плоский конденсатор. Діелектриком такого конденсатора виступало насипане в комірку насіння. Для вимірів застосовували котушки з попередньо визначеними значеннями індуктивності і добротності [12, 14].

Вимірювали характеристики необробленого насіння (контрольна партія) і насіння, обробленого електромагнітним полем ВЧ діапазону. Опромінення ВЧ полем проводили на частоті 27,12 МГц за допомогою апарату УВЧ-60 Мед ТеКо. Потужність опромінення складала 60 Вт, а тривалість обробки – 5 хвилин. Для обробки насіння ВЧ полем і для вимірювання його електричних характеристик використовувалося незволене насіння, його вологість складала приблизно 10 %. За допомогою Q-метра вимірювали комплексний опір, тобто активну і ємнісну складові опору. Для визначення цих характеристик використовували паралельну схему з'єднання ємності й активного опору. Це дозволило розрахувати діелектричну проникливість і питомий опір насіння.

Експериментальні результати визначення активного опору для неопроміненого і опроміненого насіння пшениці наведені на рис. 3.

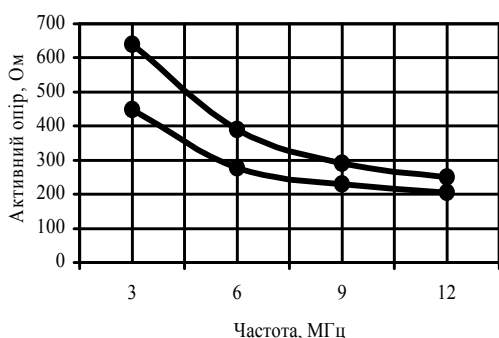


Рис. 3. Залежність активного опору опроміненого (нижня крива) і неопроміненого (верхня крива) насіння пшениці від частоти

Із наведених результатів видно, що обробка насіння полем ВЧ впливає на його електричні характеристики. Слід зазначити, що в досліджах використовувалося сухе насіння, тобто насіння, яке спеціально не зволожували. Внаслідок цього ємнісна складова комплексного опору значно перевищує його активну складову і дозволяє, в даному випадку, вважати насіння діелектриком.

Опромінене насіння характеризується меншим значенням активного опору для паралельної схеми вимірювання, що пов'язано зі збільшенням проникливості мембран після опромінення насіння полем ВЧ.

ВИСНОВКИ

Розроблена фізико-математична модель електричних властивостей біологічних тканин рослин, що дає змогу аналізувати пасивні електричні характеристики насіння на різних частотах до і після опромінення. Визначено, що еквівалентна електрична схема насіння є комбінованою й її неможливо звести до послідовно чи паралельно з'єднаних постійних ємності та активного опору. Експериментально підтверджено, що під дією ВЧ опромінення змінюється

опір; це пояснюється інтенсифікацією обмінних процесів, збільшенням водопоглинання і, як наслідок, стимулюється процес проростання.

Список літератури

1. Бородин И. Ф. Воздействие электромагнитной волны с семенем при дезинсекции зерна / И. Ф. Бородин, С. В. Вендин, С. Г. Кузнецов // *Техника в сельском хозяйстве*. – 1991. – № 6. – С. 8–10.
2. Грабовски Б. *Справочник по электронике* / Б. Грабовски : [пер. с фр. А. В. Хаванов – 2-е изд., испр.]. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 416 с.
3. Исмаилов Э. Ш. *Биофизическое действие СВЧ излучений* / Э. Ш. Исмаилов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 306 с.
4. Кутовой В. А. *Высокочастотная технология защиты зерна от амбарных вредителей* / В. А. Кутовой, Б. И. Рудяк, Л. А. Базыма [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2001. – № 4. – С. 129–132.
5. *Основы взаимодействия физических полей с биологическими объектами* / В.П. Олейник. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 61 с.
6. Пат.51700 UA МПК (2009) A01C 1/00 (2010. 07), *Способ передосівного опромінення насіння зернових*. / Петровський О.М., Смердов А.А., Жемела Г.П., Волков С.І., Ландар А.А. // власник Петровський О.М. Патент на корисну модель №51700. заявлено 15.02.2010; опубліковано 26.07.2010. Бюл. № 14 2010р.
7. Черенков А. Д. *Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства* / А. Д. Черенков, Н. Г. Косулина // *Світлотехніка та електроенергетика* / *Міжнародний науково-технічний журнал*. – Х.: ХНАМГ. – 2005. – № 5. – С. 77–80.
8. Thomasset A. *Proprietes bioelectriques des tissus. Mesure de l'impedance en clinique* / A. Thomasset // *Lyon Med*. – 1962 – № 28. – P. 107–109.

Надійшла до редколегії 22.08.2017

Рецензент: д-р. хім. наук, проф. В.В. Соловійов, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Л.И. Леви, А.Н. Петровский

На основе строения клеток определены электрические свойства биологической ткани, из которой состоит семя растений. Показано изменение составляющих активного сопротивления в зависимости от частоты электромагнитного излучения с помощью которого проводилась стимуляция. Экспериментально доказано, что эквивалентную электрическую схему невозможно свести к простым случаям соединения сопротивлений и емкостей, а именно семена нельзя считать нейтральным диелектриком. Разработана методика оценки интенсивности обменных процессов в зависимости от электрического сопротивления семян.

Ключевые слова: семена, мембрана, сопротивление, емкость, частота, эквивалентная схема, обменный процесс.

PHYSICO-MATHEMATICAL MODEL OF INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON ELECTRICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL FABRICS

L.I. Levi, A.N. Petrovskiy

Based on the structure of cells, the electrical properties of the biological tissue from which the seeds of plants are composed are determined. The change in the components of the active resistance is shown depending on the frequency of the electromagnetic radiation by means of which stimulation was carried out. It has been experimentally proved that an equivalent electrical circuit can not be reduced to simple cases of connecting resistances and capacitances, namely, the seeds can not be considered a neutral dielectric. A technique for estimating the intensity of metabolic processes as a function of the electrical resistance of seeds has been developed.

Keywords: seeds, membrane, resistance, capacity, frequency, equivalent circuit, exchange process.