

О. В. ТОНЦА, І. В. СЕРДЮК, О. А. ГЕЛЯРОВСЬКА, Н. Т. ПРОЦАЙ, Е. В. ВАСИЛЕЦЬ

ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ПОТОКУ ІОНІВ КРІЗЬ МЕМБРАНУ

Пропонується дослідження якісного впливу електромагнітних полів на мембрану тканини рослин для збереження і доставки їх в свіжому вигляді до кінцевого споживача. Впливу електромагнітних полів на мембрану клітини були піддані плоди яблука, які мають форму сфери. Україна – промислово-аграрна країна з переважно сировинним виробництвом. Вона є одним із провідних експортерів деяких різновидів сільськогосподарської продукції. Велика кількість родючих земель нашої країни створює передумови для того, щоб Україна була повноправним експортером сільськогосподарських товарів у країни Європи і світу. При цьому виникає дві основні проблеми – виробництво якісних сільськогосподарських продуктів фермерами та їх збереження протягом тривалого часу в свіжому вигляді. Дуже важливо, щоб кінцевий споживач отримував продукт свіжим і смачним.

Актуальним є питання допомоги у збереженні свіжості продукту для кінцевого споживача. Для отримання свіжого продукту найчастіше використовують спосіб заморозки і збереження його при температурі нижче мінус 20° за Цельсієм. Проте такий метод не підходить, коли йдеться про свіжі фрукти. Тому об'єктом дослідження для низки вчених став вплив на процес збереження плодово-ягідної продукції зовнішніх електромагнітних полів. Було встановлено, що для збереження свіжості продукту є важливим мембранний потенціал клітини в момент фізіологічного спокою. Саме в цей момент обмін речовин знаходиться в рівновазі. При цьому використовується цикл дихання Кребса, який був відкритий для тварин, але пізніше був доведений і в рослин. Питання дослідження якісного впливу електромагнітних полів на мембрану тканини рослин з метою збереження і доставки їх в свіжому вигляді до кінцевого споживача є дуже важливим і актуальним (наприклад, можна піддати плоди яблука, які мають форму сфери, впливу електромагнітних полів на мембрану клітини).

Найбільш важливим фактором, який впливає на процеси росту і розвитку рослин, є світло, його напрямок, а також його якісні та кількісні характеристики. Проте, існують ще два фактори зовнішнього середовища, яким досі не надавалось великого значення і які не завжди враховуються при аналізі фізіології організму рослин. Мова йде про електричне поле атмосфери та електромагнітне поле Землі. Слід врахувати також можливий вплив (як позитивний, так і негативний) штучних зовнішніх електромагнітних полів на плоди фруктів. Електрофізичні характеристики даних полів визначають результат цього впливу. Це – напруженість, частота, спосіб модуляції, експозиція і таке інше.

Запропоновано методи ефективного збереження сільськогосподарської продукції, засновані на наявності в контейнері, в якому зберігаються фрукти, зовнішнього електромагнітного поля надвисоких частот з частотою діапазону 33,5 – 36 ГГц, що створює здатність блокувати канали руху іонів і збільшує термін зберігання фруктів майже в сім разів.

Ключові слова: електромагнітне поле, електротранспортний ланцюг, електричне поле атмосфери, цикл дихання Кребса, мембрана мітохондрії, електрохімічний потенціал іонів.

О. В. ТОНЦА, И. В. СЕРДЮК, О. А. ГЕЛЯРОВСКАЯ, Н. Т. ПРОЦАЙ, Э. В. ВАСИЛЕЦЬ
ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ИОНОВ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ

Предлагается исследование качественного воздействия электромагнитных полей на мембрану ткани растений для сохранения и доставки их в свежем виде к конечному потребителю. Воздействию электромагнитных полей на мембрану клетки были подвергнуты плоды яблок, имеющие форму сферы. Украина — промышленно-аграрная страна с преобладанием производства сырья. Она является одним из ведущих экспортеров некоторых видов сельскохозяйственной продукции. Большое количество плодородных земель нашей страны говорит о том, что Украина должна быть полноправным экспортером сельскохозяйственных товаров в страны Европы и мира. При этом возникает две основные проблемы: производство качественных сельскохозяйственных продуктов фермерами и их сохранность в течение длительного времени в свежем виде. Очень важно, чтобы конечный потребитель получал продукт свежим и вкусным.

Актуален вопрос помощи в сохранении свежести продукта для конечного потребителя. Для получения свежего продукта чаще всего используют способ заморозки и сохранности его при температуре ниже мінус 20° по Цельсию. Однако такой метод не подходит, когда речь идет о свежих фруктах. Поэтому объектом исследования для ряда ученых стало влияние на процесс хранения плодово-ягодной продукции наружных электромагнитных полей. Было установлено, что для сохранения свежести продукта важен мембранный потенциал клетки в момент физиологического покоя. Конкретно в этот момент обмен веществ находится в равновесии. При этом используется цикл дыхания Кребса, который был открыт для животных, но позже был доказан и у растений. Вопрос исследования качественного воздействия электромагнитных полей на мембрану ткани растений с целью сохранения и доставки их в свежем виде к конечному потребителю является очень важным и актуальным. К примеру, можно подвергнуть плоды яблок, имеющих форму сферы, воздействию электромагнитных полей на мембрану клетки.

Наиболее важным фактором, влияющим на процессы роста и развития растений, является свет, его направление, а также его качественные и количественные характеристики. Однако, не всем известно, что есть еще два фактора внешней среды, которым до сих пор уделялось немного внимания, и которые не всегда учитываются при анализе физиологии организма растения. Речь идет об электрическом поле атмосферы, а также электромагнитном поле Земли. При этом на плоды фруктов могут воздействовать, причем как положительно, так и отрицательно, искусственные наружные электромагнитные поля. Электрофизические свойства данных полей определяют итог этого действия. Это – напряженность, частота, способ модуляции, экспозиция и т.п.

Предложены методы эффективного хранения сельскохозяйственной продукции, основанные на наличии в контейнере, в котором хранятся фрукты, внешнего электромагнитного поля сверхвысоких частот с частотой диапазона 33,5 – 36 ГГц, что создает способность блокировать каналы движения ионов и увеличивает срок хранения фруктов почти в семь раз.

Ключевые слова: электромагнитное поле, електротранспортная цепь, электрическое поле атмосферы, цикл дыхания Кребса, мембрана митохондрии, электрохимический потенциал ионов.

О. В. ТОНЦА, І. В. СЕРДЮК, О. А. ГЕЛЯРОВСЬКА, Н. Т. ПРОЦАЙ, Е. В. ВАСИЛЕЦЬ
PROBABILISTIC MODEL OF ION FLOW ACROSS THE MEMBRANE

It is proposed to study the qualitative impact of electromagnetic fields on the membrane of plant tissue for preservation and delivery of them fresh to the final consumer. Spherical apple fruits were exposed to the influence of electromagnetic fields on the cell membrane. Ukraine is an industrial-agrarian country with a predominance of raw material production. It is one of the leading exporters of some types of agricultural products. The large number of fertile lands of our country indicates that Ukraine should be a full-fledged exporter of agricultural goods to the countries of Europe and the world. At the same time, two main problems arise: the production of quality agricultural products by farmers and their preservation for a long

time in a fresh form. It is very important that the final consumer receives the product fresh and tasty.

The freshness of a product is preserved by freezing and keeping it at a temperature below minus 20 degrees Celsius. However, this method is not suitable when it comes to fresh fruit. Therefore, the object of research for a number of scientists was the influence of external electromagnetic fields on the process of preserving fruit and berry products. It was established that the membrane potential of the cell at the moment of physiological rest is important for the preservation of product freshness. It is at this moment that the metabolism is in balance. At the same time, the Krebs respiration cycle is used, which was discovered for animals, but was later proven in plants as well. The issue of researching the qualitative impact of electromagnetic fields on the membrane of plant tissue in order to preserve and deliver them fresh to the final consumer is very important and relevant. For example, it is possible to expose apple fruits, which have the shape of a sphere, to the influence of electromagnetic fields on the cell membrane.

The most important factor that affects the processes of growth and development of plants is known to be light, its direction, as well as its qualitative and quantitative characteristics. However, not everyone knows that there are two more environmental factors that have received little attention so far, and that are not always taken into account when analyzing the physiology of the plant organism. These factors are the electric field of the atmosphere, as well as the electromagnetic field of the Earth. At the same time, artificial external electromagnetic fields can affect fruits, both positively and negatively. The electrophysical characteristics of these fields determine the result of this influence. These are voltages, frequency, method of modulation, exposure, etc. The methods of storing of agricultural products are presented based on the presence in the fruit storage of electromagnetic field of ultra high frequency in the range 33,5–36 GHz, which blocks the ion channels and increases the fruit shelf life by up to seven times.

Key words: electromagnetic field, electron transport chain, atmospheric electric field, Krebs respiration cycle, mitochondrial membrane, electrochemical potential of ions.

Вступ. Великі і родючі ґрунти дозволяють нашій країні у повній мірі задовольняти попит населення на *сільськогосподарські продукти*. Це також створює умови для того, щоб Україна була повноправним експортером сільськогосподарських продуктів в країні Європи. Головною проблемою стає не тільки виробництво якісних продуктів фермерами, а й їх збереження в свіжому вигляді. Важливо, щоб кінцевий споживач отримав продукт свіжим і смачним. Розглянемо, як можна допомогти у збереженні свіжості продукту для кінцевого споживача. Всім знайомий процес отримання свіжого продукту шляхом заморозки і збереження його при температурі нижче мінус 20° за Цельсієм. Але даний метод не підходить, якщо мова йде про свіжі фрукти. Саме тому ряд вчених звернувся до вивчення впливу *зовнішніх електромагнітних полів на процес збереження* плодово-ягідної продукції. Це пов'язано з тим, що для збереження свіжості продукту важливий *мембранний потенціал клітини* в момент фізіологічного спокою, коли обмін речовин знаходиться в рівновазі. Найбільш відомим є *цикл дихання Кребса*. Він був відкритий для тварин, але пізніше був доведений і в рослин.

Значення циклу Кребса не вичерпується його внеском в *енергетичний обмін клітини*. Не менш важливу роль грає та обставина, що багато проміжних продуктів циклу використовуються при *синтезі* різних з'єднань. Перш за все, слід відзначити участь ряду *органічних кислот в азотному обміні*, синтезі і розпаді білкових речовин. Важливо відзначити, що через реакції циклу Кребса встановлюється тісний зв'язок між обміном *трьох найважливіших груп з'єднань – білків, жирів і вуглеводів*. Для реалізації циклу Кребса служить дихальний *електротранспортний ланцюг (ЕТЛ)*, який локалізований у внутрішній мембрані мітохондрій [1].

Розглянуто вплив електромагнітних полів на мембрану тканини рослин для збереження і доставки їх в свіжому вигляді до кінцевого споживача. Впливу електромагнітних полів на мембрану клітини були піддані плоди яблук, які мають форму сфери. У процесі життєдіяльності рослинні організми зазвичай орієнтуються на такі фактори зовнішнього середовища, як світло, температура, рівень вуглекислоти в атмосфері, вміст мінеральних елементів у ґрунті та його вологоємність. Найбільш важливим фактором для процесів росту і розвитку рослин, звичайно ж, є світло, його напрямок, якісні та кількісні характеристики. Існують, однак, ще два фактори довкілля, яким і *досі* приділяється мало уваги і вони, як правило, не враховуються при аналізі фізіології рослинного організму. Маються на увазі *електричне поле атмосфери і електромагнітне поле Землі*. При цьому на рослини можуть впливати, як в позитивному, так і в негативному сенсі, штучні зовнішні електромагнітні поля. Результат цього впливу залежить від електрофізичних характеристик даних полів: напруженості, частоти, способу модуляції, експозиції і так далі.

Вплив зовнішніх електромагнітних полів на процеси життєдіяльності рослин пояснюється тим, що основною електричною характеристикою рослинної клітини є її мембранний потенціал, який відповідає стану клітини під час *фізіологічного спокою*, коли обмін речовин знаходиться в стані рівноваги. Живі структури завжди мають негативний заряд по відношенню до довкілля. Мембранний потенціал визначає всі типи електричної активності живих організмів, в тому числі і процес дихання і обміну речовин.

Цикл дихання Кребса був відкритий на тваринах, в подальшому було доведено його існування і у рослин. В рослинних тканинах містяться всі кислоти, які беруть участь в циклі, виявлені всі ферменти, які каталізують перетворення цих кислот. Більшість ферментів циклу Кребса локалізовано в *матриці мітохондрій, аконілази і сукцінад дегідрогенази* – у внутрішній мембрані мітохондрії. Особливо важливо, що через реакції циклу Кребса встановлюється тісний зв'язок між обміном трьох найважливіших груп з'єднань – білків, жирів і вуглеводів.

Для реалізації циклу Кребса служить дихальний ЕТЛ, що локалізований у внутрішній мембрані мітохондрій. Він потрібний для передачі електронів від відновлених субстратів до кисню, що супроводжується *трансмембранним перенесенням іонів H^+* . Таким чином, ЕТЛ мітохондрій виконує функцію *окислювально-відновлювальної помпи*.

Теорія даного процесу запропонована англійським біохіміком *Пітером Деннісом Мітчеллом*. Він припустив, що потік електронів через систему молекул переносників супроводжується транспортом іонів H^+ через внутрішню мембрану мітохондрій. В результаті на мембрані створюється електрохімічний потенціал іонів H^+ , який включає *хімічний, або осмотичний градієнт і електричний градієнт*, або мембранний потенціал. Згідно з

хіміоосмотичною теорією електрохімічний трансмембранний потенціал іонів i є джерелом енергії для синтезу аденозинтрифосфату (АТФ) за рахунок звернення транспорту іонів через протонний канал H^+ .

Теорія Мітчелла виходить з того, що переносники чергуються один з одним. Таким чином, в одну сторону можливий перенос і електронів, і протонів, а у зворотний – тільки електронів. В результаті іони H^+ накопичуються на одній стороні мембрани [2].

Інтенсивність дихання і, таким чином, тривалість збереження фруктів залежить від того, наскільки активно відбувається перенесення іонів і протонів через мембрану мітохондрій. Можливість регуляції цього перенесення, а саме його гальмування, має зробити можливими великі терміни зберігання фруктів без істотної втрати їх властивостей.

Математична постановка задачі. Природно припустити, що істотний вплив на процес переносу заряджених частинок через мембрану може надати зовнішнє електричне постійне або змінне поле. Електричні поля є нормальним фактором функціонування більшості біологічних мембран. Разом з тим, електричні поля високої напруженості викликають появу якісно нових явищ. Відомо, що гіперполяризація клітинної мембрани до деякого критичного значення потенціалу викликає різке збільшення трансмембранного струму – явище, аналогічне електричному пробою діелектриків. Однак, в разі клітинних мембран пробій був повністю зворотнім: при реполяризації клітини низька провідність мембрани відновлювалася, а саме явище електричного пробоя можна було спостерігати неодноразово.

Зазвичай процес руйнування мембран пов'язують з досягненням параметрами системи деяких критичних значень, після чого процес відхилення стає незворотним і настає руйнування мембран. Ліпідні бішари стійкі лише при малих змінах параметрів, тобто є метастабільними системами. Відхилення мембран від рівноваги можна пов'язати з виникненням дефектів у структурі мембран за рахунок випадкового локального стискання в поздовжньому або поперечному напрямку. Випадкове зменшення товщини мембрани носить різко виражений локальний характер, що слід розглядати як початковий етап формування локального поглиблення.

Найчастіше механізм руйнування мембран обумовлений дефектами типу наскрізної пори. Передбачається, що в цьому випадку формування дефекту супроводжується переорієнтацією молекул ліпиду, розташованих поблизу кордону дефекту з утворенням так званої інвертованої пори. Для опису даного процесу пори характеризується радіусом еквівалентного циліндричного дефекту. Енергія E дефекту дорівнює роботі створення такого дефекту за відрахуванням енергії відповідної бездефектної ділянки мембрани, тобто

$$E = 2\pi\tilde{\sigma}r - \pi\sigma r^2, \quad (1)$$

де $\tilde{\sigma}$ – лінійний натяг одиниці довжини периметра дефекту ($\tilde{\sigma} = h\sigma_n$); σ – натяг мембрани; h – товщина мембрани; σ_n – міжфазовий натяг "внутрішньої" поверхні дефекту (пори). Для руйнування мембрани досить появи всього одного дефекту з надкритичною величиною радіуса $r > r_{кр}$.

Багато природних мембран функціонують в умовах, коли до них прикладена висока (250 – 300 мВ) різниця електричних потенціалів, що різко скорочує час їх життя, хоча короточасний вплив електричного поля на мембрану призводить до збільшення фонові провідності та появи флуктуації провідності. Це вказує на можливість формування найпростіших каналів під дією поля, тим більше, що їх появу на мембрані вдається реєструвати і при інших модифікаціях ліпідів. Тому механізми електричного пробоя біологічної ліпідної мембрани становлять безсумнівний інтерес для розуміння їх функціонування.

При дії на суспензії клітин імпульсних електричних полів високої напруженості (імпульси тривалістю від декількох мікросекунд до декількох мілісекунд при напруженості поля в кілька кВ/см) відзначені порушення проникності клітинних мембран і загибель клітин. Порушення бар'єрних властивостей мембрани обумовлено індукцією в електричному полі трансмембранного потенціалу величиною до 1 В.

Ретельний контроль параметрів електричної обробки клітин дозволяє викликати тимчасове підвищення проникності клітинних мембран (електропорація) з метою введення в клітини біологічно активних речовин, що відкриває широкі можливості для застосування електричних полів в біотехнологічних дослідженнях. Поряд з порцією мембран, електричні поля здатні індукувати злиття клітин, що може бути використано для отримання гібридів. Крім того, вплив електричних полів може активувати функцію мембранних білків, стимулювати протікання клітинних процесів, викликати морфологічні зміни, такі як формування клітинних відростків або локальні сферичні здуття мембрани на поверхні клітин. У зв'язку з цим вплив електричних полів на живі клітини є предметом численних досліджень [3].

Розглянемо спочатку питання розподілу електромагнітного поля всередині клітини для визначення процесів, що протікають у ній при цьому. Як відомо, постійне поле викликає переміщення клітин, які мають поверхневий заряд, – явище електрофорезу. При впливі на клітинні суспензії змінного неоднорідного поля спостерігається рух клітин, який називається діелектрофорезом. При діелектрофорезі поверхневий заряд клітин не відіграє суттєвої ролі. Механізм руху полягає у взаємодії наведеного дипольного моменту з зовнішнім полем.

Будемо розглядати клітину у вигляді сфери, що має діелектричну оболонку. Частотно-залежна складова індукovanого дипольного моменту для такої сферичної частинки записується у вигляді:

$$D = \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 A_1 + j\omega \varepsilon_0 B_1 + C_1}{\omega^2 \varepsilon_0^2 A_2 + j\omega \varepsilon_0 B_2 + C_2} \quad (2)$$

де j – уявна одиниця; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Параметри A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 і C_2 визначаються незалежними від частоти значеннями провідності і діелектричної проникності зовнішнього і внутрішнього середовищ:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\varepsilon_e \varepsilon_i}{r} + \frac{C(\varepsilon_e - \varepsilon_i)}{\varepsilon_0}, & A_2 &= -2 \frac{\varepsilon_e \varepsilon_i}{r} - \frac{C(2\varepsilon_e + \varepsilon_i)}{\varepsilon_0}; \\ B_1 &= \frac{C(\sigma_i - \sigma_e)}{\varepsilon_0}, & B_2 &= \frac{C(\sigma_i + 2\sigma_e)}{\varepsilon_0}; \\ C_1 &= \rho(\sigma_i - \sigma_e) - \frac{\sigma_i \sigma_e}{r}, & C_2 &= \rho(\sigma_i + 2\sigma_e) + \frac{2\sigma_i \sigma_e}{r}, \end{aligned} \quad (3)$$

де r , C , ρ , ε_e , ε_i , σ_e , σ_i і ε_0 позначають радіус клітини, смність мембрани, провідність мембрани, діелектричні проникності зовнішнього і внутрішнього середовища, провідності зовнішнього і внутрішнього середовищ та абсолютну діелектричну проникність вакууму, відповідно.

Різниця напрямків *діелектрофоретичної сили* на низьких (кілогерц) і високих (мегагерц) частотах обумовлено різною орієнтацією індукованого дипольного моменту по відношенню до зовнішньої електризації поля.

З представлених рівнянь (2), (3) випливає, що в разі впливу низькочастотного поля, мембрана являє собою хороший ізолятор, і струм йде в обхід клітини по провідному середовищу. Індуковані заряди збільшують напруженість поля всередині частинки. Такий розподіл індукованих зарядів відповідає антипаралельній орієнтації дипольного моменту частинки відносно зовнішнього поля.

При впливі високочастотного поля провідність мембрани висока. Через те, що електропровідність внутрішньоклітинного середовища вище електропровідності безсолівого позаклітинного середовища, струм протікає переважно через клітку. У цих умовах розподіл індукованих зарядів на поверхні частинки відповідає паралельній орієнтації дипольного моменту по відношенню до зовнішнього поля, як бачимо на рис. 1.

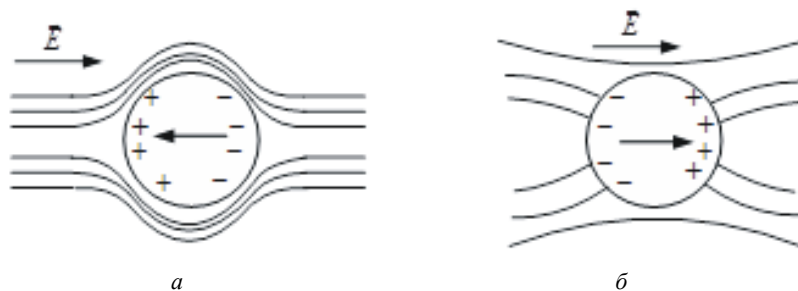


Рис. 1 – Розподіл індукованих зарядів на поверхні клітини і орієнтація індукованого дипольного моменту:
а – непровідна частка в провідному середовищі (клітина в низькочастотному полі);
б – провідна частка в погано провідному середовищі (клітина в високочастотному полі).

Розподіл індукованих зарядів на поверхні клітини і орієнтація індукованого дипольного моменту: ліворуч – непровідна частка в провідному середовищі (клітина в низькочастотному полі); праворуч – провідна частка в погано провідному середовищі (клітина в високочастотному полі) [4].

Критична частота, при якій відбувається зміна напрямку діелектрофоретичної поведінки, відповідає умові рівності електропровідності середовища і клітини. При підвищенні частоти в діапазоні десятків і сотень мегагерц діелектрофоретична сила зменшується від максимального рівня до нуля, а потім знову змінює напрямок. Цей перехід зумовлений дисперсією поляризації цитоплазми.

Очевидно, що уповільнення процесу дихання, а, відтак, збільшення терміну зберігання фруктів, може бути досягнуто за рахунок зменшення проникності мембран мітохондрій. Цього можна досягти, зменшуючи величину струму всередині клітини, який присутній саме при високочастотному електромагнітному впливі на плід. Отже, надмірний вплив електромагнітних хвиль на клітку може привести до її знищення. Треба враховувати певні умови та напрямок хвиль при проникненні через мембрану клітини.

Математична модель і методи розв'язання задачі. Для простоти будемо розглядати клітину у вигляді об'єкта, що має сферичну форму. З'ясуємо, як залежить внутрішнє поле в таких об'єктах від амплітуди падаючої плоскої хвилі. Для отримання початкових виразів, які дозволять вирішити поставлену задачу, припустимо, що зовнішня середа, що заповнює внутрішню частину сфери, характеризується діелектричною та магнітною проникністю ε і μ , які, при наявності неоднорідності, можуть бути функціями радіуса сфери.

Зовнішній по відношенню до розсіювача простір вважається однорідним. Він характеризується діелектрич-

ною та магнітною проникністю ε_1 і μ_1 . Якщо повітря – зовнішня середа, то

$$\varepsilon_1 \approx \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{\Phi}{M}.$$

Оскільки розглядаються біологічні об'єкти, то всюди в подальшому $\mu = \mu_1 \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$.

Далі будемо вважати, що в загальному випадку падаючих електромагнітних полів застосовуються такі позначення: $\vec{E}_0(t)$, $\vec{H}_0(t)$ – їх амплітуди; $\omega(t)$ – їх частоти; \vec{k} – хвильовий вектор; \vec{r} – радіус-вектор розглянутої точки; $\vec{E}_0(t)$ і $\vec{H}_0(t)$ пов'язані між собою через опір зовнішньої середи на об'єкт.

Нехай центр сфери співпадає з центром декартової системи координат. Плоска хвиля поширюється в додатному напрямку осі OZ , і її електричний вектор спрямований паралельно осі OY , як ми бачимо на рис. 2.

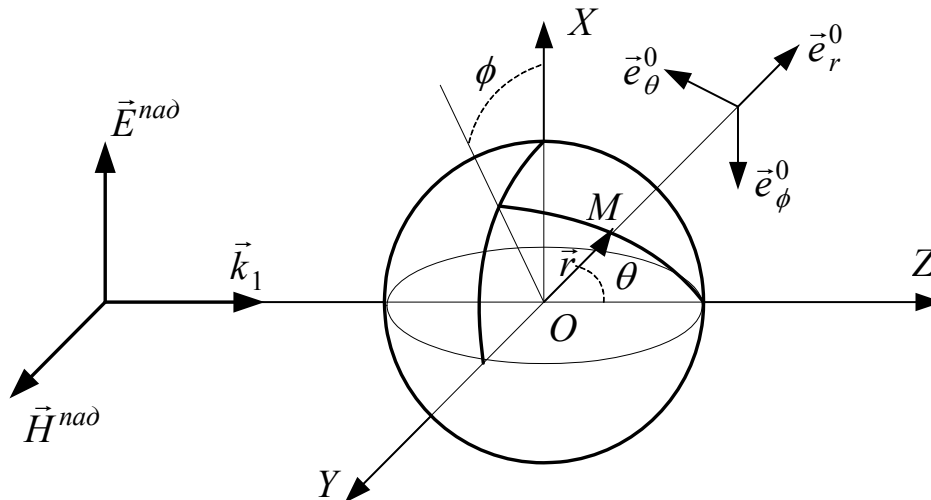


Рис. 2 – Розсіювання плоскої хвилі на сфері.

Для коректного моделювання цього процесу розглянемо спочатку розсіювання електромагнітної хвилі на однорідному сферичному біологічному об'єкті. Для вирішення проблеми розширюємо падаюче поле у векторних сферичних хвильових функціях. Рішення буде отримано з використанням сферичної системи координат (r, ϕ, θ) . Тоді:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{nad} &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{no}^+ - j\vec{N}_{ne}^+); \\ \vec{H}^{nad} &= \frac{k_1 E_0}{\mu_0 \omega} \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (\vec{M}_{ne}^+ + j\vec{N}_{no}^+), \end{aligned} \quad (4)$$

де E_0 – амплітуда падаючого поля; o або e – індекси, що означають вибір верхнього або нижнього варіанта тригонометричної функції і знака;

$$\vec{M}_{ne}^+ = \sqrt{\frac{\pi}{2k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \left[\pm \vec{e}_\theta^0 \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\sin}^{\cos} \phi - \vec{e}_\phi^0 \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \phi \right]; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{N}_{no}^+ &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k_1 r} \left\{ \vec{e}_r^0 \frac{n(n+1)}{\sqrt{k_1 r}} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \phi + \vec{e}_\theta^0 \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\cos}^{\sin} \phi \pm \right. \\ &\quad \left. \pm \vec{e}_\phi^0 \frac{1}{\sin \theta} \left[\sqrt{k_1 r} J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r) \right]' P_n^{(1)}(\cos \theta)_{\sin}^{\cos} \phi \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$; $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$; $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ – приєднані функції Лежандра; $J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ – функції Бесселя першого

роду напівцілого порядку; \vec{e}_r^0 , \vec{e}_ϕ^0 , \vec{e}_θ^0 – координатні орти.

Похідна береться по відношенню до змінної $(k_1 r)$.

Розсіяна хвиля в цьому випадку має вигляд:

$$\begin{aligned}\vec{E}^{poz} &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n^{poz} \vec{M}_{no}^- - j b_n^{poz} \vec{N}_{ne}^-); \\ \vec{H}^{poz} &= -\frac{k_1}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n^{poz} \vec{M}_{ne}^- + j a_n^{poz} \vec{N}_{no}^-).\end{aligned}\quad (7)$$

Функції $\vec{M}_{n_e}^-$ і $\vec{N}_{n_e}^-$ виходять з $\vec{M}_{n_e}^+$ і $\vec{N}_{n_e}^+$ шляхом заміни $J_{n+\frac{1}{2}}(k_1 r)$ на функцію Ханкеля другого роду напівцілого порядку $H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_1 r)$.

Нарешті, внутрішнє поле визначається виразами:

$$\begin{cases} \vec{E} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \vec{M}_{no}^+ - j b_n \vec{N}_{ne}^+); \\ \vec{H} = -\frac{k}{\omega \mu_0} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} j^n \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \vec{M}_{ne}^+ + j a_n \vec{N}_{no}^+), \end{cases}\quad (8)$$

де $\vec{M}_{n_e}^+$ і $\vec{N}_{n_e}^+$ мають той же вигляд, що і у виразах (5) і (6), але в них k_1 замінено на k .

Найпростіший і найбільш загальний випадок, коли є тільки три кінетичні бар'єри в мембрані. Бічні бар'єри відповідають вхідним ділянкам каналу, де відбувається процес первинної дегідратації, центральний бар'єр виконує роль селективного фільтра як бачимо на рис. 3.

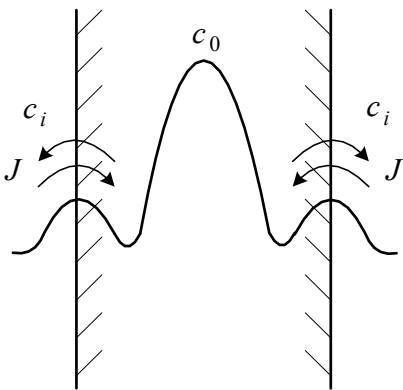


Рис. 3 – Енергетичний профіль моделі каналу: c_i – концентрація іонів в навколишньому розчині; c_0 – концентрація іонів всередині мембрани; J – інтенсивність потоку іонів всередину і назовні мембрани.

Якщо мембрана насправді містить заряджені частинки, здатні рухатися в електричному полі, то, очевидно, можна реєструвати струм, викликаний рухом цих частинок. Якщо мембрана є ідеальним діелектриком, то при подачі імпульсу крокової напруги через неї в перші моменти протікає ємнісний струм або струм зміщення.

Інша ситуація виникає, якщо мембрана містить заряджені частинки, здатні рухатися в електричному полі, і в початковому стані розподіл рухливих частинок є асиметричним.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розглянути ймовірнісні моделі потоку іонів крізь мембрану клітин та ефективні алгоритми їх реалізації, які можуть стати основою для збереження і транспортування зібраних фруктів і ягід без втрати їх свіжості і смаку. Розкриваються можливості використання найважливішого мембранного потенціалу клітини фруктів у момент фізіологічного спокою. В основу дослідження покладено цикл дихання Кребса для рослин. Перспектива подальших досліджень

полягає в використанні можливості регулювання перенесення іонів і протонів через мембрану мітохондрій, а саме їх процес гальмування, метаболізм на рівні клітинних мембран і їх процес дихання дозволяє збільшувати терміни зберігання плодів фруктів.

Список літератури

1. Titova N., Pirotti A., Pirotti E., Manicheva N., Romanyuk S. Mathematical model for determining the interval electromagnetic fields in a small fish (whitebait) // Proceedings of Odessa Polytechnic University. – 2020. – Issue 3(62). – P. 113 – 118.
2. Пиротти Е. Л., Отдельнов В. А. Моделирование распределения электромагнитного поля в малых биологических сферах // Вестник НТУ ХПИ. – 2007. – № 41. – С. 17 – 21.
3. Тітова Н. В. Аналіз інформаційних процесів у біологічних об'єктах під впливом зовнішніх електромагнітних полів. Проблеми інформатизації // Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Київ : Державний університет телекомунікацій, 9–10 квітня 2015р. – С. 79.
4. Тітова Н. В. Вирішення задачі про розсіювання плоскої хвилі на біологічному об'єкті / Інформаційні управляючі системи і технології. Т. II. : монографія. – Бердянськ : Видавець Ткачук О. В., 2015 р. – 256 с.

References (transliterated)

1. Titova N., Pirotti A., Pirotti E., Manicheva N., Romanyuk S. Mathematical model for determining the interval electromagnetic fields in a small fish (whitebait). *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2020, Issue 3(62), pp. 113–118.

2. Pirotti E. L., Otdel'nov V. A. Modelirovanie raspredeleniya elektromagnitnogo polya v malykh biologicheskikh sferakh [Modeling distribution of electromagnetic field in small biological spheres]. *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of NTU "KhPI"]. 2007, no. 41, pp. 17–21.
3. Titova N. V. Analiz informatsionnykh protsesiv u biologichnykh ob'ektax pid vplyvom zovnishnikh elektromagnitnykh poliv. Problemy informatyzatsiyi [Analysis of information processes in biological object submitted to the impact of external electromagnetic fields. Informatization problems]. *Materialy 4-yi mizhnarodnoyi naukovu-tehnikhnoyi konferentsiyi, Kyiv, 9–10 kvitnya 2015* [Proceedings of the 4-th International Scientific and Technical Conference, Kyiv, 9 – 10 April 2015]. Kyiv, Derzhavnyy universytet telekomunikatsiy Publ. 79 p.
4. Titova N. V. Vyrisnennya zadachi pro rozsiyuvannya plaskoyi khvyli na biologichnomu ob'ekti. [Solving the problem of dispersion of a plane wave on a biological object]. In *Informatsiyni upravlyayuchi systemy i tekhnologiyi. T. II. : monografiya* [In Information managing systems and technologies. Vol. II : monograph]. Berdyansk, Publ. Tkachuk O. V., 2015. 256 p.

Надійшла (received) 17.10.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Тоница Олег Владимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 578-03-04; e-mail: Oleh.Tonitsa@khp.edu.ua.

Тоница Олег Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 578-03-04; e-mail: Oleh.Tonitsa@khp.edu.ua.

Tonitsa Oleg Volodimirovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (067) 578-03-04; e-mail: Oleh.Tonitsa@khp.edu.ua.

Сердюк Ирина Васильевна – доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (096) 211-46-10; e-mail: Iryna.Serdiuk@khp.edu.ua.

Сердюк Ирина Васильевна – доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (096) 211-46-10; e-mail: Iryna.Serdiuk@khp.edu.ua.

Serdyuk Irina Vasilivna – Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (096) 211-46-10; e-mail: Iryna.Serdiuk@khp.edu.ua.

Геляровська Оксана Анатоліївна – доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 575-57-57; e-mail: Oksana.Heliarovska@khp.edu.ua.

Геляровская Оксана Анатольевна – доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 575-57-57; e-mail: Oksana.Heliarovska@khp.edu.ua.

Geliarovska Oksana Anatoliivna – Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (067) 575-57-57; e-mail: Oksana.Heliarovska@khp.edu.ua.

Процай Наталя Тимофіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (096) 288-68-82; e-mail: Nataliia.Protsay@khp.edu.ua.

Процай Наталья Тимофеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной математики и анализа данных, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (096) 288-68-82; e-mail: Nataliia.Protsay@khp.edu.ua.

Protsai Natalya Timofiiivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (096) 288-68-82; e-mail: Nataliia.Protsay@khp.edu.ua.

Василець Едуард Віталійович – магістрант кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +4(917) 1813-83-64; e-mail: Eduard.Vasilets@cs.khp.edu.ua.

Василець Эдуард Витальевич – магистрант кафедры компьютерной математики и анализа данных, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: +4(917) 1813-83-64; e-mail: Eduard.Vasilets@cs.khp.edu.ua.

Vasylets Eduard Vitaliyovych – Master student at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: +4(917) 1813-83-64; e-mail: Eduard.Vasilets@cs.khp.edu.ua.