

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛІЗОВАНИХ ПОРУШЕНЬ КОНФОРМАЦІЇ МЕМБРАН КЛІТИН ВИЩИХ РОСЛИН

***Д.Г. Войтюк, член-кореспондент НААН України
Ю.В. Човнюк, Ю.О. Гуменюк, О.П. Гуцол,
кандидати технічних наук***

Запропонована фізико-механічна модель локалізованих порушень конформації мембран клітин вищих рослин. Встановлені умови виникнення дисипативних солітонів надвисокочастотного (НВЧ) і вкрай високочастотного (ВВЧ) діапазонів за існування гіперзвукових акустоелектромагнітних резонансів кластерних структур клітин вищих рослин.

Фізико-механічне моделювання, локалізовані порушення, конформації, мембрани, клітини, вищі рослини, кластерні структури клітин рослин.

Постановка проблеми. Вже перші дослідження просторової структури клітин живої матерії за допомогою високовольтних електронних мікроскопів показали, що весь внутрішній простір клітин (нем'язовах) дійсно пронизують системи ниток та мікротрубок. Мікронитки та трубки утримують всі органели клітин (у т. ч. вищих рослин) у певних місцях. Вони визначають форму самої клітини та її зміни (конформації). Перенесення енергії та інформації й усі внутрішні рухи у клітині здійснюються за допомогою мікрониток та трубок. Виконання всіх цих функцій здійснюються за рахунок енергії гідролізу молекул АТФ. Процес їх гідролізу, мабуть, регулюється змінами концентрації двократно іонізованих іонів кальцію. Система мікрониток (мікрофіламентів чи мікрофібрил) та мікротрубок у цитоплазмі клітин рослини була названа цитоскелетом. Цитоплазматична мембрана та всі внутрішні мембрани різних клітин (рослин) у основних рисах мають однакову побудову. До їх складу входять молекули жироподібних, які називаються ліпідами, білки й у малій кількості вуглеводні. Вуглеводні (полісахариди) зазвичай утворюють комплекси з ліпідами (гліколіпідами) й білками (глікопротеїни).

Згідно сучасним уявленням клітинні мембрани – це рідинно-мозаїчні структури, які утримують у замкненому подвійному прошарку ліпідних молекул двовимірні розчини орієнтованих у поперечному напрямку до прошарку білкових молекул,

глікопротеїнів, гліколіпідів, та полісахаридів. Основу такої мозаїчної структури утворює подвійний прошарок ліпідних молекул з іонними та полярними групами атомів, які лежать на зовнішній та внутрішній поверхнях мембрани, контактуючи з водою. У мембранах з малим вмістом білків останні у вигляді «айсбергів» у ліпідному прошарку. Внаслідок взаємодії між білковими молекулами вони зазвичай збираються у комплекси, котрі виконують певні фізіологічні функції.

Зовнішня поверхня живої клітини завжди заряджена додатньо, а внутрішня має від'ємний заряд. Зазвичай значення потенціалу зовнішньої поверхні мембрани приймають за нуль. Тоді потенціал внутрішньої сторони від'ємний. У нормальному життєдіяльному стані клітини різниця потенціалів має майже постійне значення (50...80) мВ. При товщині мембрани від 5 до 6 нм напруженість електричного поля у діелектричному прошарку мембрани досягає $10^5 \text{ В/см} = 10^7 \text{ В/м}$.

Підтримання різниці потенціалів й різниці концентрації іонів поза та всередині клітини необхідне для її нормального функціонування. Для створення таких умов витрачається до 50% енергії, яка виробляється клітиною.

Проходження іонів через мембрану клітин рослини обумовлене двома процесами: пасивним та активним транспортом. Перший полягає у проходженні нейтральних та заряджених часинок через мембрану за законом дифузії (Фіка) з місць більших у місця менших концентрацій. Цей процес здійснюється під дією різниці концентрацій і різниці електричних потенціалів для заряджених часточок. Спільна їх дія характеризується електрохімічним градієнтом.

Потік частинок у процесі пасивного транспорту у бік менших концентрацій пропорціональний різниці електрохімічного потенціалу. Коефіцієнт пропорціональності залежить від температури й у деяких випадках – від різниці концентрацій та електричних потенціалів. Така залежність свідчить про те, що процес пасивного транспорту – нелінійний ефект. Щоб створити необхідні для нормального функціонування живої клітини рослини різниці електричних потенціалів та концентрацій іонів всередині та зовні клітини, необхідне примусове їх переміщення через мембрану з областей малих у області більших концентрацій, тобто вздовж градієнта концентрації. Такі процеси вимагають витрат енергії й називаються активним транспортом.

Транспортні системи, які здатні при поглинанні енергії створювати відповідні різниці потенціалів і концентрацій іонів, називаються іонними насосами. Існують натрій-калієві насоси у цитоплазматичній мембрані, які забезпечують необхідний неоднаковий їх розподіл всередині та зовні клітини рослини. Існують

кальцієві насоси, які створюють градієнти концентрацій іонів кальцію на двох поверхнях мембрани, протонні насоси, які утворюють градієнти концентрацій протонів на внутрішніх мембранах мітохондрій.

Кальцієві насоси входять до складу мембран мережі трубок, пронизують ксилемні та флоемні провідні шляхи рослини. Важлива проблем з'ясування на молекулярному рівні механізму роботи іонних насосів залишається однією з невирішених у сучасній біофізиці. Незрозуміло, які сили викликають переміщення іонів проти електричного поля у бік більших концентрацій.

Було доведено [1], що кальцієві насоси у процесі переносу іонів використовують енергію гідролізу молекул АТФ. Виявилось, що при транспорту двох іонів кальцію витрачається енергія гідролізу однієї молекули АТФ. Не жаль, ні структура білково-ліпідного комплексу, який утворює кальцієвий насос, ні механізм його роботи при використанні енергії гідролізу молекул АТФ ще не з'ясовані.

Аналіз публікацій по темі дослідження. У роботі [1] наведені основні результати теоретичного дослідження на молекулярному рівні перенесення вібраційних збуджень, електронів та протонів у біосистемах за допомогою уособлених хвилеутворень (т. з. солітонів), а також вплив електромагнітного випромінювання (*ЕМВ*) на живу матерію. Механізму транспорту енергії у біологічних система було присвячене спеціальне засідання Нью-Йоркської академії наук у 1973 році. Однак учасники конференції так і не прийшли до єдиної думки і питання про «кризу» у біоенергетиці залишилось не вирішеним. У 1973 році була опублікована робота [3]. Дослідники встановили, що у альфа-спіральних білкових молекулах можуть розповсюджуватись без втрати енергії та зміни форми коливні збудження колективної природи. Такі збудження у подальшому отримали назву давидівських солітонів [4 - 9]. Робота [3], а також наступні виконані у ІТФ АН УРСР [10, 11], поклали початок численним дослідженням вчених (вітчизняних та зарубіжних) щодо ефективності переносу вібраційної енергії солітонами у біосистемах. Такі дослідження у значній мірі вирішили питання про кризу у біоенергетиці. Було також встановлено, що солітони можуть відігравати суттєву роль у багатьох біологічних явищах [12, 13].

Результати та підходи цитованих вище робіт будуть використані у даному дослідженні.

Мета досліджень. Обґрунтувати локалізовані порушення конформації мембран клітин вищих рослин у межах запропонованої фізико-механічної моделі, яка заснована на генерації у кластерах клітин дисипативних солітонів *НВЧ/КВЧ*-діапазону та виникненні гіперзвукових акустоелектромагнітних резонансів вказаних

кластерних структур, що контактують між собою вздовж периметру своїми мембранними поверхнями. Для зменшення ефективності перенесення енергії солітонами та збудження ділянками клітинних мембран зі включеними у них білковими молекулами власних коливань (згинного типу) може використовуватись *ЕМВ НВЧ/КВЧ*-діапазону малої (нетеплової) інтенсивності (з міліметровою довжиною хвилі $\lambda = (5 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

Результати досліджень. *Мітохондрії і хлоропласти – енергетичні фабрики клітин рослин.* Усі багатоклітинні (еукаріоти) – зелені рослини, гриби та найпростіші – мають клітини, які у 10^3 разів перевищують за об'ємом клітини бактерій. Потреба у енергії великих мас цитоплазми не може бути задоволена тільки за рахунок молекул *АТФ*, які синтезуються у цитоплазматичній мембрані. Такі клітини крім ядра утримують у собі спеціальні включення (органели) – тілакоїди у хлоропластах зелених водоростей та рослин. Основне призначення цих органел – постачання клітин молекулами *АТФ*. Це своєрідні енергетичні фабрики клітин.

Кількість мітохондрій у клітинах у деяких випадках досягає кількох десятків тисяч. Вони мають поперечні розміри $\sim (0,2 \dots 5) \cdot 10^{-6} \text{ м}$, еліпсоїдальну чи витягнуту паличкоподібну форму. Мітохондрії у клітині можуть переміщуватись й зазвичай зосереджуватись у тих її місцях, де відбувається найбільш інтенсивне використання енергії.

Кожна мітохондрія оточена двома мембранами. Будова зовнішньої доволі гладкої співпадає з будовою зовнішньої цитоплазматичної мембрани самої клітини. Вона утримує білкові комплекси, які утворюють канали, що пропускають нейтральні молекули з невеликою масою.

Внутрішня мембрана, яку часто називають спряженою, представляє собою замкнений мішок з численними складками, які називаються кристами. Завдяки кристам суттєво зростає поверхня внутрішньої мембрани, яка є головним органом, що синтезує молекули *АТФ*. Щільність білкових комплексів у спряжених мембранах значно вище (до 70%), ніж у цитоплазматичних.

У клітинах зелених водоростей та вищих рослин фосфорилування відбувається в органелах – хлоропластах, які пофарбовані у зелений колір. Кожна клітин утримує від одного (хлорелла) до сотні хлоропластів. Хлоропласти суттєво більші, ніж мітохондрії. Вони мають діаметр від 4 до 10 мкм $(4 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ й товщину $(1 \dots 2) \text{ мкм} = (1 \dots 2) \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Хлоропласт утримується у оболонці, яка створена з двох близько розміщених мембран. Всередині другої оболонки знаходиться безбарвна рідина – строма, у яку занурені грани, в яких

присутній хлорофіл. Грани, у свою чергу, складаються зі стоек тонких пластинок, тілакоїдів, які налягають одна на одну.

Тілакоїди оточені своїми мембранами й утримують молекули хлорофілу. На поверхні тілакоїдів є грибоподібні вирости, повернені у бік строми. Внутрішня область тілакоїди заряджена позитивно, строма має від'ємний заряд, у просторі між двома зовнішніми мембранами хлоропласту електричний заряд позитивний.

У клітинах зелених рослин є й фотосинтезуючі хлоропласти й мітохондрії. У темряві клітини дихають киснем й окислюють глюкозу у мітохондріях при синтезі молекул АТФ. На світлі працюють хлоропласти.

Таким чином, у синтезі молекул АТФ можуть приймати участь цитоплазматичні мембрани прокаріотичних клітин бактерій й синьо-зелених водоростей, внутрішні мембрани мітохондрій та мембрани тілакоїдів хлоропластів зелених рослин незважаючи на різну фізичну природу енергії, що використовується (окислення, поглинання світла), механізм синтезу АТФ та транспорту іонів через такі мембрани практично однаковий.

Синтез АТФ частково відбувається й у цитоплазмі, але основні процеси фосфорилування протікають на мембранах. Механізм фосфорилування зв'язаний (спряжений) з процесом вилучення енергії при окисленні органічних з'єднань (дихання) й при поглинанні світла. Тому мембрани тілакоїдів, внутрішні мембрани мітохондрій й цитоплазматичні мембрани бактерій називають спрягаючими мембранами.

Енергетизований стан мембрани, крім синтезу молекул АТФ, необхідний для багатьох процесів у клітині. Зокрема, цей стан використовується натрієвими насосами мембрани, які переміщують іони натрію в обмін на протони, що рухаються у бік менших їх концентрацій електричне поле мембрани полегшує рух протонів й перешкоджає рухові іонів натрію. Рівновага настає тоді, коли різниця концентрацій іонів натрію вирівнюється з різницею концентрацій протонів, яка підтримується зовнішні джерелом – диханням чи фотосинтезом.

Різниця концентрацій протонів на двох сторонах мембрани забезпечує перенесення молекул АДФ й фосфату у матрикс мітохондрій та вилучення з нього молекул АТФ. Фосфат знаходиться у цитоплазмі мітохондрії у вигляді від'ємно зарядженого іона. Вона переміщується у матрикс під дією електричного поля спрягаючої мембрани. Молекули АДФ й АТФ знаходяться у клітині у стані іонів: АДФ³⁻ й АДФ⁴⁻. Тому перехід АДФ³⁻ в середину матрикса й винесення АДФ⁴⁻ еквівалентні переміщенню через мембрану з матрикса одного

від'ємного заряду чи переміщенню всередину матрикса одного додатного заряду.

Як було вказано вище, цитоплазма клітини й матрикс мітохондрій мають від'ємний потенціал. Крім спрягаючої мембрани, яка оточує матрикс, у кожній мітохондрії є зовнішня мембрана. З однієї сторони, вона дозволяє мати на зовнішній поверхні спрягаючої мембрани додатний потенціал, а з другої – у невеликому просторі між цими мембранами легше створити велику концентрацію протонів, необхідну для переводу спрягаючої мембрани у енергетизований стан. У цьому невеличкому просторі також неважко створити потрібні концентрації молекул *АДФ* й фосфату, необхідні для синтезу молекул *АТФ*.

Мітохондрії майже не відрізняються від бактерій за розмірами. Склад ліпідів у мембранах бактерій й внутрішніх (спрягаючих) мембранах мітохондрій майже однаковий. Мітохондрії мають автономний механізм синтезу білків та нуклеїнових кислот, що дає їм змогу синтезувати свої власні молекули. Виявляється, що мітохондріальна ДНК має кільцеву побудову, як і ДНК бактерій.

Молекула *АТФ*, виходячи з мітохондрії на зовнішній стороні мітохондріальної мембрани, приймає участь у синтезі молекули креатинфосфату з молекули креатину. Молекула *АДФ*, яка при цьому утворюється, знову попадає всередину мітохондрії, вступаючи у повторний синтез молекул *АТФ*. Молекули креатинфосфату дифундують у місця споживання енергії. Тут фосфатна група від креатинфосфату переходить на молекулу *АДФ*, котра перетворюється у молекулу *АТФ*. Потім утворені молекули *АТФ* безпосередньо забезпечують енергією відповідні процеси. Після відщеплення фосфідної групи від креатинфосфату креатин повертається до мітохондрій, і цикл повторюється знову.

Таким чином, жива клітина має два типи енергії для виконання різноманітних біологічних процесів у різних середовищах. Один з них хімічна енергія, яка запасується при синтезі молекул *АТФ*. Вона використовується у водному середовищі (цитоплазмі), у котрій легко розчиняються ці молекули. Вони все ж таки не розчиняються у ліпідному прошарку клітинних мембран, тому для забезпечення енергією процесів, які відбуваються в середині мембран, використовується протонний потенціал енергетизованого стану мембрани. Досить важливим і суттєвим є те, що енергія протонного градієнта може використовуватись для синтезу молекул *АТФ* у ферментах *АТФ*-синтезу. І навпаки, енергія гідролізу молекул *АТФ* може використовуватись для створення протонного градієнта.

Солітони, екситони, та поляритони у квазіодновимірних кластерах клітин рослин. Відомо [1], що солітони можуть

збуджуватись у квазіодновимірних нелінійних системах з дисперсією. Такі умови виконуються у багатьох біологічних явищах і, зокрема, у кластерах клітин рослин.

У [11, 13] встановлено, що при гідролізі молекули АТФ, прикріпленої до кінця альфа-спіральної білкової молекули виділена енергія може переміщуватись вздовж вказаної молекули у вигляді солітона без витрати енергії.

Енергія гідролізу молекул АТФ збуджує внутрішнє пептидне коливання амід 1. частота цього коливання не залежить від типу амінокислотних залишків, які входять до складу білкової молекули, що свідчить про слабкий зв'язок такого коливання з численними іншими коливаннями у білковій молекулі.

Уявлення, фізичні механізми та їх обґрунтування, наведені у роботах [1, 11, 13], використані у даному дослідженні.

У кластерах клітин рослин (кожний з кластерів складається приблизно зі 100 клітин), розміщених у ксилемних та флоемних провідних шляхах, і контактують між собою вздовж поверхонь, що мають фрактальну розмірність (завдяки постійним коливанням згинного типу у мембранах поверхневих прошарків клітин даного кластеру), можуть збуджуватись під впливом зовнішнього збурення (ЕМВ НВЧ/КВЧ-діапазону) коливання у області резонансу акустоелектромагнітного типу.

На кластер вказаних клітин з характерним типом структурних елементів (скажімо, хлоропластів/мітохондрій, тілакоїдів) діє ЕМВ частоти $\Omega_{\text{ЕМВ}}$ з хвильовим вектором $k \rightarrow 0$, яке збуджує (резонансні) коливання акустичного ($\Omega_{\text{АК}}$) типу (у гіперзвуківому діапазоні) – т. з. оптичні фрактони (теж з $k \rightarrow 0$). У таблиці наведені значення $\lambda_{\text{ЕМВ}}$, й $\lambda_{\text{АК}}$, за яких виникає акустоелектромагнітний резонанс у клітинних кластерах (рослин) для кожної $\Omega_{\text{ЕМВ}}$ (тобто при $\Omega_{\text{АК}} = \Omega_{\text{ЕМВ}}$).

1. Значення $\lambda_{\text{ЕМВ}}$, м; $\lambda_{\text{АК}}$, м для резонансів типу: $\Omega_{\text{ЕМВ}} = \Omega_{\text{АК}}$.

$\Omega_{\text{ЕМВ}}$, ГГц	$\lambda_{\text{ЕМВ}}$, м	$\lambda_{\text{АК}}$, м
5	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-7}$
10	$3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-7}$
15	$2 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-8}$
20	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$
25	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-8}$
30	$1 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-8}$
35	$8,57 \cdot 10^{-3}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
40	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
45	$6,67 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-8}$
50	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-8}$
55	$5,45 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$
60	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$

З таблиці видно, *ЕМВ* НВЧ/КВЧ-діапазону (з $\Omega_{ЕМВ} = (5 \dots 60)$ ГГц) викликає у клітинних кластерах (у їх структурних елементах) акустичні коливання гіперзвукового діапазону (т.з. фрактони) з $\lambda_{АК} = (16,7 \dots 200)$ нм. Такі коливання можуть розповсюджуватись вздовж самих структурних елементів клітинних кластерів (хлоропластів, мітохондрій, тілакоїдів), так і передаватись від одного кластера до іншого, змінюючи відстань у міжщільному просторі контактуючих (через мембранні поверхні) клітин (та кластерів клітин), і, водночас, змінюючи фрактальну розмірність самої поверхні окремо взятої (збудженої *ЕМВ*) клітини (і кластера в цілому). Зміна фрактальної розмірності контактуючих сусідніх клітин виникає внаслідок зміни фрактальної розмірності структурних елементів (органел) клітини (мітохондрій, тілакоїдів, хлоропластів) і всього кластера клітини в цілому. Таким чином інформація від збудженої клітини (кластера клітин) передається далі вздовж всього флоемного (ксилемного) провідного шляху. Отже, форма (матеріальна) сигналу про збудження конкретної ділянки флоемного провідного шляху (а також і ксилемного) – це змінена фрактальна розмірність (D_f) цієї ділянки (спочатку окремої органели, потім окремо взятої клітини, потім кластера клітин рослин.) даний фізичний механізм, на нашу думку, лежить в основі сигналізації у провідних шляхах рослин при їх збудженні зовнішнім подразником певної частоти ($\Omega_{ЕМВ}$). Носіями такої інформації є білкові молекули, що знаходяться всередині мембран структурних елементів клітин (мітохондрії/хлоропласти), на більш високому ієрархічному рівні – мембрани клітин (окремих), а ще на більш високому ієрархічному рівні – кластери клітин рослин, зосереджені у флоемних/ксилемних провідних шляхах (рис. 1.)

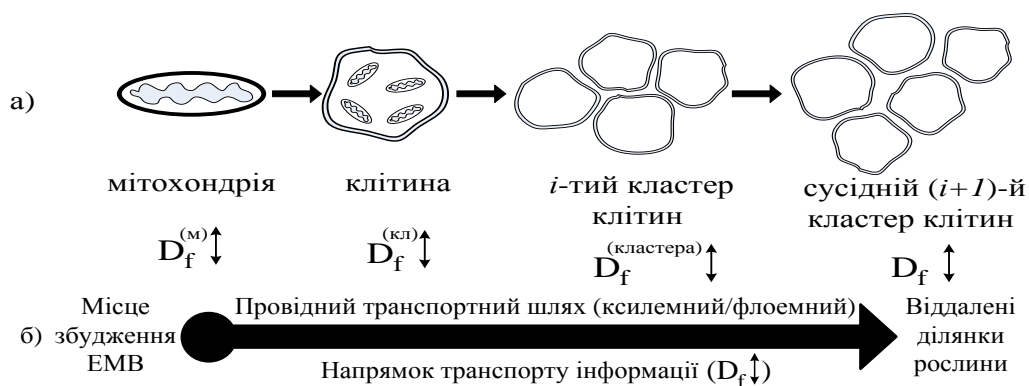


Рис. 1. Фізичний механізм передачі інформації про збудження *ЕМВ* структурних елементів (мітохондрій/хлоропластів) окремої клітини рослини у її провідних транспортних шляхах (ксилемних/флоемних): а – структурно-ієрархічні рівні передачі інформації; б – напрямок передачі інформації про зміну D_f .

Слід зазначити, що для ефективної передачі інформації про зміну D_f вздовж транспортного провідного шляху рослини можна використовувати два типи збуджень у кластерах клітин: поздовжні (т. з. акустичні фрактони) та згинні (оптичні фрактони), зображені на рис. 2.

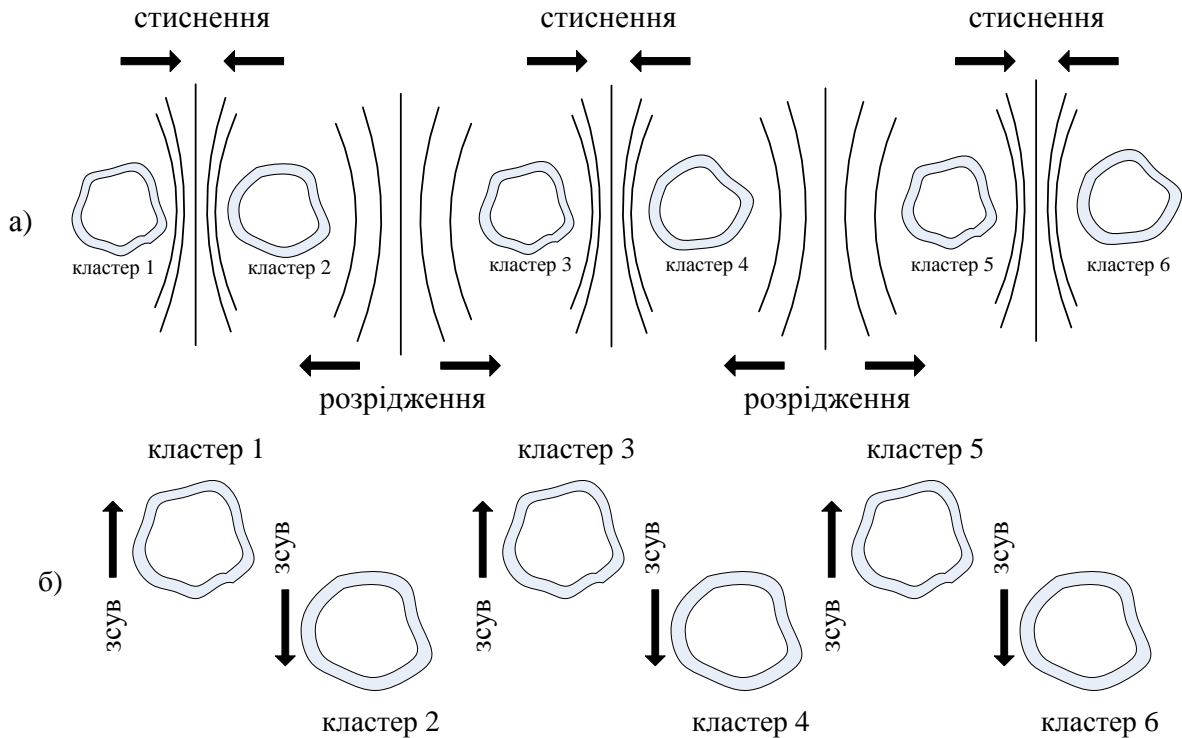


Рис. 2. Типи фрактонів, які можуть розповсюджуватись у кластерах клітин і у провідних транспортних шляхах рослин: а – акустичні фрактони; б – оптичні фрактони.

Стосовно зміни D_f слід зазначити наступне: загальновідомо, що фрактал/фрактальна структура має властивість самоподібності, дробову (або з цілою частиною і дробовою) розмірність (відмінну від 1 – для лінії, від 2 – для площини, від 3 – для об'єму) і визначається, наприклад, методом підрахунку квадратів таким чином:

$$D_f = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\ln\{N(L)\}}{\ln L} \quad (1)$$

де $N(L)$ – число квадратів зі стороною L , яке необхідне для покриття даної фрактальної структури (мембрана клітини, мембрана мітохондрії, мембрана хлоропласту, мембрани поверхневого прошарку кластеру клітин рослини.) зрозуміло, що D_f у назвах структурних елементі лежить у межах:

$$1 < D_f < 2 \quad (2)$$

Крім того, границя фрактальної структури недиференційована (у математичному сенсі), тобто від форми кривої, що обмежує

поверхню фрактальної структури, не можна знайти похідну в жодній точці цієї поверхні (!). Фрактальна розмірність (D_f) є показником міри заповнення простору фрактальною структурою. Коли, скажімо, клітина (та її зовнішня мембрана) рослини знаходиться у певному (незбудженому *EMB*) стані, D_f приймає певне проміжне значення (D_{f_0}) з відрізка [1; 2], тобто $D_{f_0} \in [1; 2]$. При наявності збудження зовні даної клітини (її органел) D_f зростає від певного значення (D_{f_0}) до $D_{f_{max}} \rightarrow 2$. Коли клітина втрачає енергію збудження ззовні (за рахунок *EMB*), тоді її D_f спадає (від $D_{f_{max}}$ до D_{f_0}). Величину D_{f_0} визначає низка факторів (тип клітини, вид рослини, особливості побудови її органел, типи органел, які є у даній рослині). Крім того, на нашу думку, за інших однакових умов (температура, тиск, освітленість та ін.) Ω_{EMB} (резонансна частота, яка задає ритм нормального функціонування) рослини (вдень і вночі) та її розвитку) може визначатись частотою реліктового випромінювання Всесвіту, що лежить у діапазоні 60 ГГц (за середньої температури Всесвіту $T = 2,7^\circ K$, ця частота $\Omega_{EMB} = 60$ ГГц відповідає максимуму енергетичної характеристики *EMB* – спектральної цільності потужності випромінювання $P_s, \frac{Вт}{Гц \cdot м^2}$).

Фрактальним структурам притаманна властивість (масштабної інваріантності), тобто одноманітність у широкому діапазоні масштабів. Внаслідок цього будь-яка невелика часина фракталу утримує у собі інформацію про весь фрактал (скажімо органела клітини рослини і весь кластер клітини рослини). Само подібність фрактальних структур є результатом ітерації функції зі зворотним зв'язком (т. з. само референтний зворотний зв'язок) або ж інакше кажучи, визначається, будується і розвивається у просторі і часі за рекурсивним (зі зворотнім зв'язком) алгоритмом. Складні форми фрактальних структур створюються за допомогою спеціальних «генетичних» правил і матеріальною основою їх існування (носієм інформації про них) є, на нашу думку, морфогенетичні поля фрактальних структур, які мають акустоелектромагнітну природу (при цьому *EMB* лежить у *НВЧ/КВЧ*-діапазоні, а акустичні поля, які підтримуються фрактальними структурами – у гіперзвуковому діапазоні, що відповідає наноструктурним масштабам органел клітин рослин, мембранам клітин з білковими молекулами, «зануреними» у їх напівпроникні канали). Саме такий фізичний механізм передачі інформації про збудження «фрагментів» клітин рослини (як і самої клітини, її мембрани, кластерів подібних клітин) визначає зв'язок ближнього (локального) (у сенсі D_f – величини) і дальнього (глобального) порядків (визначає сутність функціонування у

рослинах транспортних провідних шляхів). До речі, все зазначене вище, дозволяє стисло математично описувати самі (фрактальні) структури та процеси, що в них відбуваються. Зрозуміло, що у неоднорідних структурах, на кшталт флоємних/ксилемних провідних транспортних шляхів, у залежності від D_f – величини можуть збуджуватись вібраційно-хвильові резонанси (хвилеутворення), схожі на фонони у твердих тілах, які розповсюджуються вздовж цих структур, і називаються фрак тонами.

Збудження основного резонансного ($\Omega_{EMB} = \Omega_{AK}$) коливання у органелі (мембрані клітини, поверхневому мембранному прошарку кластеру клітин рослини) призводить до двох додаткових взаємодій. Перша з них – це резонансна взаємодія (типу диполь – дипольної взаємодії), яка виникає між кластерами клітин (спочатку між органелами клітини, потім між окремими клітинами кластеру при їх взаємодії вздовж поверхні контакту (своїми мембранами)). Ця взаємодія викликає стрибання коливання (фрактонів) з одного кластера клітини на інший (сусідній) кластер (на кшталт передачі коливання одного маятника на інші такий самий за їх слабкого зв'язку). Зрозуміло, що така взаємодія кластерів клітин залежить від відстані між кластерами.

Інша взаємодія є деформаційною. При збудженні основного резонансу ($\Omega_{EMB} = \Omega_{AK}$) у даному кластері змінюється його взаємодія (і D_f , зрозуміло) з сусідніми кластерами, а це викликає зміну взаємної відстані між кластерами – переміщення їх (центрів ваги) з первісних рівноважних положень.

Таким чином, деформаційна взаємодія визначається зв'язком основного резонансу (коливання) ($\Omega_{EMB} = \Omega_{AK}$) зі зміщеннями рівноважних положень кластерів клітин.

На нашу думку, перший тип взаємодії призводить до виникнення у кластерних структурах оптичних фрактонів, а другий – акустичних фрактонів. При цьому повинні виконуватись частотно-хвильові синхронізми (або умови), що накладаються на частоти збуджень, оптичних та акустичних фрактонів та їх хвильових векторів (\vec{k}) типу:

$$\begin{cases} \Omega_{EMB} = \Omega_{AK} = \Omega_{of} + \Omega_{af} \\ \vec{k}_{EMB} = \vec{k}_{AK} = \vec{k}_{of} + \vec{k}_{af} \end{cases} \quad (3)$$

Вирази у (3) мають наступний фізичний зміст: Ω_{EMB} , Ω_{AK} – частоти акустоелектромагнітного резонансу ($\Omega_{EMB} = \Omega_{AK} = \Omega_{pump}$ – частота «накачування»); Ω_{of} – частота оптичного фрактону; Ω_{af} – частота акустичного фрактону; $\vec{k}_{EMB} \equiv \vec{k}_{pump} = \vec{k}_{AK}$ – хвильовий вектор *EMB*, «накачування» та акустичного поля (гіперзвукового

діапазону), відповідно. Зазначимо, що розмірність $[\Omega] = c^{-1} = \Gamma u$, а $[\vec{k}] = m^{-1}$. З урахуванням наявної фрактальної структури у співвідношенні для частот (3) з'являється показник степеня (для кожної з них) у вигляді D_f . Стосовно хвильових векторів \vec{k} (3) слід зазначити, що:

$$|\vec{k}| = \sqrt{(k_x)^2 + (k_y)^2 + (k_z)^2} \quad (4)$$

Для звичайної метрики простору, у фрактальних структурах прийме вигляд:

$$|\vec{k}|^{D_f} = \sqrt{(k_x)^{2D_f} + (k_y)^{2D_f} + (k_z)^{2D_f}} \quad (5)$$

На рис. 3 на діаграмі (ω, \vec{k}) зображені умови частотно-хвильового синхронізму у інтерпретації (3)

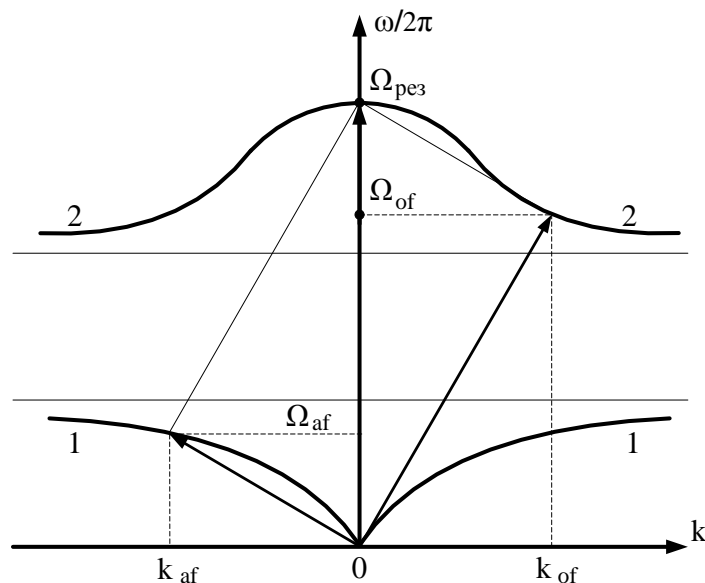


Рис. 3. Частотно-хвильовий синхронізм у клітинних структурах рослин.

Нелінійні процеси які відповідають умовам синхронізму типу (3), виникають у клітинних структурах вищих рослин завдяки точковим (нерегулярним) контактам мембранних поверхонь огреби клітин кластера, що контактують між собою й з подібними поверхнями сусідніх з даним кластерів клітин, а дисперсія виникаючих хвиле утворень зобов'язана просторовому розпливанню локалізованого збудження, що складене з багатьох монохроматичних хвиль. Ці нелінійних хвиле утвореннях (типу солітонів) відбувається інтенсивна взаємодія монохроматичних складових пакету. Ця взаємодія спричинює перерозподіл енергії між ними. Якщо цей перерозподіл зводиться до того, що відбирається енергія від швидких хвиль хвильового пакету й передається хвилям,

які відстають, тоді у результаті утворюється стабільне збудження, яке розповсюджується як єдине ціле. Саме велика стабільність солітонів (акустичних і оптичних) стимулює чисельні спроби їх використання при дослідженні нелінійних хвиле утворень у різноманітних (у т.ч. біологічних) середовищах.

На нашу думку хвиле утворення типу оптичного фрактону (на оптичній гілці) та акустичного фрактону (на акустичній гілці) (рис. 3) є солітонними.

При цьому швидкість перенесення енергії (тобто т. з. групова швидкість хвиль v_g) у оптичних фрактонів від'ємна, а у акустичних фрактонів – додатна:

$$v_{g_{of}} = \frac{d\Omega}{dk} < 0, \quad v_{g_{af}} = \frac{d\Omega}{dk} > 0 \quad (6)$$

При квантовому переході у збуджений стан під дією ЕМВ (світла певної частоти Ω_{EMB}) доволі важкі клітинні структури (кластери клітин) не встигають зміщуватись зі своїх рівноважних положень (принцип Франка-Кондона). У цьому випадку у колективному збудженому стані приймає головну участь тільки додаткова взаємодія першого типу – резонансна. Такі збуджені стани характеризуються рівномірним розподілом імовірності збудження по всіх органелах, по всіх окремих окремих клітинах рослин та їх кластерах. При цьому не порушується періодичний розподіл клітин вздовж окремого кластера, чи кластерів клітин вздовж провідного транспортного шляху рослин (флюїдного/ксилемного). Елементарне збудження цього типу характеризується монохроматичними хвилями, які мають фіксовану енергію (частоту), фазову швидкість ($v_\phi = \frac{\Omega}{k}$) й довжину хвилі λ . Вони мають назву (для акустичних гілок) екситонів, або поляритонів – єдиних оптико-механічних коливань (для оптичних гілок).

Переміщення хвильового пакету (рух екситона чи поляритона) критично не супроводжується деформацією ланцюга клітин (чи кластерів клітин) рослини. Екситони/поляритони переносять тільки енергію вібраційного резонансного збудження ($\Omega_p = \Omega_{EMB} = \Omega_{AK}$) з доволі малою груповою швидкістю (рис. 4).

Слід, однак, мати на увазі, що перенесення енергії екситонними/поляритонними хвильовими пакетами є доволі малої ефективності за двома причинами: 1) область, яка охоплена збудженням, при переміщенні збільшується, оскільки складові хвильового пакету рухаються з різними фазовими ($v_\phi = \frac{\Omega}{k}$) швидкостями; 2) хвильові пакети при русі гальмуються, віддаючи енергію тепловим коливанням (молекул, атомів) середовища (клітини вище рослин). Процеси дисипації енергії обумовлені

деформаційною взаємодією зі зміщеннями рівноважних положень окремих клітин (їх органел) та кластерів клітин рослин.

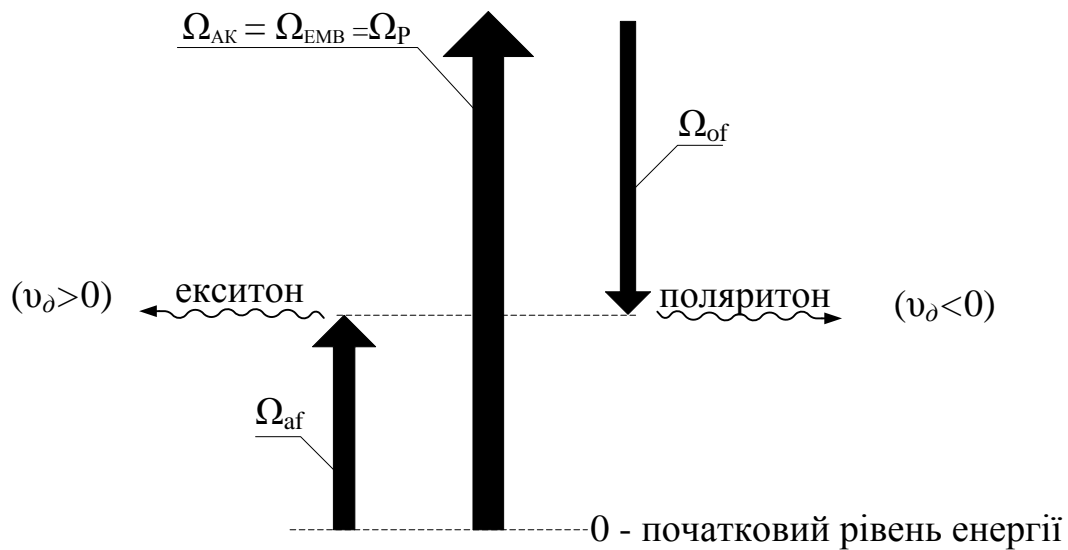


Рис. 4. Виникнення екситон-поляритонних пар при наявності у клітинах/кластерах клітин вищих рослин акустоелектромагнітного резонансу.

У порівнянні з екситами/поляритонами солітони (акустичної та оптичної гілок) рухаються зі швидкістю, яка менша за швидкість поздовжнього звуку, мають меншу загальну енергію (при зв'язуванні резонансних коливань $\Omega_p = \Omega_{EMB} = \Omega_{AK}$ з деформаційними – оптичні та акустичні фрактони виділяється енергія такого зв'язку і виникає таким чином вигреш за енергією), топологічно стійкі. Тому їх кінетична енергія не перетворюється у енергію теплового руху, а збуджуються солітони лише на кінцях провідних шляхів (транспортних) вищих рослин або на кінцях білкових молекул, що знаходяться у мембранах клітин чи на кінцях кластерних клітинних структур (першого і останнього клітинних кластерів, які розміщені на конкретному транспортному провідному шляху вищої рослини). Тому «знищити» солітон (завдяки його топологічній стійкості) набагато важче, ніж звичайний екситон/поляритон.

Утворення солітону пов'язане зі зміщенням рівноважних положень органел, окремих клітин, кластерів клітин рослини, тому світло (EMB) не збуджує солітони. З цієї ж причини дуже малою є вірогідність випромінювання світла солітоном. (Інша справа – акустичні поля гіперзвукового діапазону.)

Крім того, [10 - 13], солітони можуть збуджуватись локальними зовнішніми впливами, наприклад, при хімічних реакціях у рослинах (у їх органелах, клітинах, кластерах клітин, розміщених на конкретному провідному транспортному шляху). Найбільш

вірогідним є їх збудження, коли локальний вплив/дія ззовні реалізується на кінці молекулярного ланцюга (білкових молекул), на мембрані органели, на мембранних поверхнях клітин/кластерів клітин, що знаходяться на одному з кінців транспортного шляху вищих рослин.

У вищих рослинах ксилемні та флоемні провідні транспортні шляхи взаємодіють між собою. Тому при повному теоретичному описові збуджених станів органел клітини, клітинних кластерів слід враховувати резонансні взаємодії між кластерами клітин, що входять до складу різних транспортних шляхів рослини.

Зауважимо, що врахування цієї обставини може призвести [10 - 13] до виникнення у таких структурах трьох типів стаціонарних солітонів, які відповідають одному й тому ж резонансному / головному коливанню ($\Omega_{EMB} = \Omega_{AK} = \Omega_{rump}$):

1) симетричних солітонів (вздовж кожного транспортного шляху рослини розповсюджуються збурення у фазі (з однаковою фазою);

2) несиметричні солітони (збурення вздовж транспортних шляхів рослини рухаються з деяким зсувом фаз, а у області збудження виникає згин локального типу кожного зі взаємодіючих шляхів).

Якщо у взаємодіючих транспортних шляхах рослини збуджується нестационарний стан, зобов'язаний суперпозиції симетричних та несиметричних солітонів, тоді виникають биття, які відповідають перестрибуванням збудження з одного транспортного шляху на сусідній.

Таке перестрибування зумовлений резонансною взаємодією між кластерними структурами (між окремими клітинами) сусідніх транспортних шляхів рослини. Період таких рухів (перестрибувань) лежить у діапазоні $T = (2 \dots 3) \cdot 10^{-12} c = (2 \dots 3) \text{ нс}$.

Висновки

1. Запропонована фізико-механічна модель локальних порушень конформації мембран клітин вищих рослин, яка дозволяє визначити фізичні причини й умови виникнення дисипативних солітонів НВЧ/ВВЧ-діапазону електромагнітних хвиль та гіперзвукових акустоелектромагнітних резонансів у кластерних клітинних структурах.

2. Кластерні клітинні структури, розміщені на провідних транспортних шляхах вищих рослин (ксилемний та флоемний), мають фрактальні властивості й свою, притаманну тільки їм фрактальну розмірність. Формула (зокрема, мембранні поверхні органел, окремих клітин, контактуючих між собою кластерів клітин через поверхневі міжщільні контакти), яка змінюється у процесах,

збудження вказаних структур зовнішнім ЕМВ, що викликає у них резонанси акустоелектромагнітної природи. Саме резонанси лежать у гіперзвуковому діапазоні акустичних коливань таких структур.

3. Інформація про зміну D_f у збуджених елементах клітинних структур передається досить швидко до віддалених ділянок транспортних шляхів рослини від місця збудження цієї структури за допомогою солітонів (акустичної та оптичної гілок), які до того ж виникають (симетричні/несиметричні) й при взаємодії сусідніх транспортних шляхів (ксилемного та флоемного, що взаємодіють між собою).

4. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для вдосконалення й уточнення інженерних розрахунків пристроїв молекулярної мікро- та наноелектроніки, які використовуються у сучасних технологіях вирощування сільськогосподарських культур (мікро- й нанофоніка рослин).

Список літератури

1. *Давыдов А.С.* Солитоны в биоэнергетике. / *А.С. Давыдов.* – Киев: Наукова думка, 1986. – 160 с.
2. *Green D. E.* Mechanism of energy transduction in biological systems. / *D. E.Green // Science.* – 1973. – Vol. 181 – P. 583–584.
3. *Davydov A.S.* Solitary excitons in one-dimensional molecular chains. / *A.S. Davydov, N.I. Kislukha //Physica Status Solidi (B).* –1973. – Vol. 59. – P. 465–470.
4. *Hyman J.M.* On Davydov's Alpha-Helix Solitons. / *J.M. Hyman, D.W. McLaughlin //Physica D: Nonlinear Phenomena.* –1981. – Vol. 3. – №. 1–2. – P. 23–45.
5. *Scott A. C.* The laser-Raman spectrum of Davydov soliton. / *A. C. Scott // Physics Letters A.* –1981. – Vol. 86. – № 1. – P.60–62.
6. *Scott A. C.* Dynamics of Davydov solitons. / *A. C. Scott // Phys. Rev.* –1982. – Vol. 26. – № 1. – P. 578–595.
7. *Scott A. C.* The Vibrational Structure of Davydov Solitons. / *A. C. Scott // Physica Scripta.*– 1982. - Vol. 25 – P. 651 – 658.
8. *Scott A. C.* Solitons on the Alpha-Helix proteins / *A. C. Scott // Struct. and Dynam. Nucl. Acids and Proteins.* – 1983. –№ 4. – P. 389–404.
9. *Eilbeck J.C.* Davydov Soliton on the Alpha-Helix. A 16 mm mute film. 1 Wood road. / *J.C.Eilbeck.* – Wimbledon; London, S.W. 200HM. – 1979.
10. *Давыдов А.С.* Биология и квантовая механика. / *А.С. Давыдов.* – Киев: Наукова думка, 1979. – 296 с.
11. *Давыдов А. С.* Солитоны в молекулярных системах / *А.С. Давыдов* – Киев: Наукова думка, 1984. – 288 с.
12. *Davydov A. S.* Biology and Quantum Mechanics. / *A. S. Davydov.* – Oxford: Pergamon Press, 1981. – 225 p.
13. *Davydov A. S.* Solitons in Molecular Systems. / *A. S. Davydov.* – Dordrecht: Reidel, 1985. – 319 p.

Предложена физико-механическая модель локализованных нарушений конформации мембран клеток высших растений.

Установлены условия возникновения диссипативных солитонов сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайне высокочастотного (КВЧ) диапазонов при существовании гиперзвуковых акустоэлектромагнитных резонансов кластерных структур клеток высших растений.

Физико-механическое моделирование, локализованные нарушения, конформации, мембраны, клетки, высшие растения, диссипативные солитоны, сверхвысокочастотный (СВЧ) и крайне высокочастотный (КВЧ) диапазоны, гиперзвуковые акусто-электромагнитные резонансы, кластерные структуры клеток растений.

The paper has proposed a physical-mechanical model of localized disturbances of conformation of the cell membranes in high plants, as well as the conditions for the formation of dissipative solitons, ultra-high frequency (UHF) and extremely high frequency (EHF) range with the existence of hypersonic acoustic and electromagnetic resonances cluster structures of the cells of higher plants.

Physico-mechanical modeling, localized disorders, conformation, membrane, cells, high plants, dissipative solitons, ultra high frequency (UHF) range, extremely high frequency (EHF) range, hypersonic acoustic and electromagnetic resonances, cluster structures of plant cells.

УДК 621.87

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЖИМУ РУХУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТІЛОВОГО КРАНА З УРАХУВАННЯМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

**В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
В.В. Мельніченко, аспірант***

В статті розглянуто спосіб усунення коливань вантажу під час роботи механізму повороту стрілових кранів. Оптимізація режиму пуску механізму повороту крана проводиться за допомогою методів варіаційного числення. В роботі використано інтегральний комплексний критерій у вигляді лінійної згортки двох одиничних критеріїв, що відображають енергетичні втрати та дію динамічних навантажень.

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.С. Ловейкін

© В.С. Ловейкін, В.В. Мельніченко, 2013