

Програмне забезпечення для розрахунку резонансних частот мембран живих організмів

Родіо Клименко¹, Дмитро Кухаренко¹

1. Навчально-науковий інститут електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, УКРАЇНА, Кременчук, вул. Першотравнева, 20. email: dkuch100@gmail.com

Анотація: У роботі проводився огляд джерел інфразвуку штучних та природних, а також його вплив на живі організми. Проведені експерименти на колорадських жуках і жабах свідчать про смертельну дію інфразвуку. А щодо людини 7 Гц вважається смертельним і для неї. Немає наукових випробувань і праць щодо мікроорганізмів, тому дослідження цієї тематики є актуальною задачею.

Елементарна частинка нейтринно володіє, як відомо, величезною проникаючою здатністю. Інфразвук – свого роду «акустичне нейтрино» – здатний проходити без помітного ослаблення через скло і навіть крізь стіни.

Ключові слова: інфразвук, низькочастотне коливання, мікроорганізми.

I. ВСТУП

Інфразвуком називають акустичні коливання з частотою нижче 20 Гц. Цей частотний діапазон лежить нижче слухового порогу [1]. Слуховий аналізатор людини не спроможний сприймати коливання таких частот. Інфразвук за фізичними характеристиками має однакову природу зі звуком він мало поглинається повітрям, тому може поширюватись на великі відстані. Інфразвук характеризується інфразвуковим тиском, інтенсивністю, що вимірюються у децибелах. У виробничих умовах інфразвук генерується при роботі компресорів, турбін, дизельних двигунів, що здійснюють обертові та визотно-поступальні рухи, а також турбулентні процеси, що виникають під час руху великих потоків газів або рідин. Внаслідок цього інфразвук супроводжується звуковою або інфразвуковою частиною спектра.

До об'єктів на яких інфразвукова область акустичного спектру переважає над звуковою, відноситься автомобільний і водний транспорт, конвертерні і мартенівські цехи металургійного виробництва, компресорні, газоперекачувальні станції, портові крани і т. ін. Інфразвук як фізичне явище підпорядковується закономірностям характерним для звукових хвиль, але крім цього має ряд особливостей, що пов'язані з низькою частотою коливання пружного середовища. До таких особливостей інфразвуку належить:

- більша амплітуда коливань ніж акустичних хвиль при різній потужності джерела звуку;
- розповсюдження на велику відстань від джерела через слабе поглинання його атмосферним повітрям;
- створення явища дифракції через велику довжину хвиль;
- здатність створювати вібрацію крупних об'єктів через явище резонансу.

Вказані особливості інфразвукових хвиль чинять труднощі у боротьбі з ними, тому що класичні

засоби, такі як звукопоглинання, звукоізоляція або віддалення від джерела, що використовуються для зниження шуму, виявляються малоефективними. З літературних джерел відомо про чутливість людини до коливань з великою інтенсивністю в області інфразвукових частот. Всебічне вивчення біологічної дії інфразвуку продовжує тривати, але існуючі висновки свідчать про те, що інфразвук, як розповсюджений гігієнічний чинник, залежно від частоти і рівня звукового тиску чинить вплив на функціональний стан організму, несприятливо діючи на нервову, серцево-судинну системи, функцію дихання, стан слухового та вестибулярного аналізаторів.

Отже, інфразвук як професійний чинник може несприятливо впливати на організм людини і чинити специфічну дію на орган слуху. Причиною такої біологічної дії інфразвуку є те, що він сприймається не тільки слуховим аналізатором, а всією поверхнею тіла людини, тому вивчення його властивостей залишається актуальною задачею.

II. МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для того, щоб визначити вплив інфразвуку на клітину, необхідно з'ясувати її будову (рис.1). У еукаріотичної клітини мембрани розташовані як на поверхні клітини, так і всередині неї, утворюючи мембранні органели. До складу мембран входять ліпіди, білки і вуглеводи. Ліпіди мембрани представлені в основному фосфоліпідами (близько 75%) і холестерином (близько 20%), тоді як гліколіпіди утворюють мінорну фракцію. Більшість білків мембран відноситься до складних білків, наприклад, глікопротеїну. Вуглеводи не зустрічаються в мембрані у вільному стані: вони входять в склад складних білків і ліпідів - гліколіпідів і глікопротеїнів.

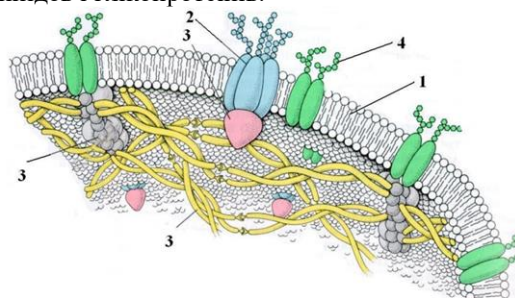


Рисунок 1 – Будова мембрани еукаріотичної клітини: 1 - ліпідний бішар; 2 – інтегральний білок; 3 – периферійний білок; 4 – вуглеводний залишок глікопротеїна.

Очевидним є той факт, що товщина мембрани грає якщо не найголовнішу роль, то одну із головних. Загальна товщина мембран живих організмів має діапазон від 5 до 10 нм [2]. А відповідно резонансна частота для різних клітин буде різною. Клітинна мембрана має досить складну будову, її можна побачити в електронний мікроскоп. Грубо кажучи, вона складається з подвійного шару ліпідів (жирів), в якій в різних місцях включені різні пептиди (білки).

Загальний план будови клітинної мембрани універсальний для всього живого світу. Однак мембрани тварин містять включення холестерину, який визначає її жорсткість. Відмінність мембран різних царств організмів в основному стосується надмембранних утворень (шарів). Так у рослин і грибів над мембраною (із зовнішнього боку) знаходиться клітинна стінка. У рослин вона складається переважно з целюлози, а у грибів - з речовини хітину. У тварин надмембранний шар називається глікокаліксом. По-іншому клітинна мембрана називається цитоплазматичною мембраною або плазматичною мембраною.

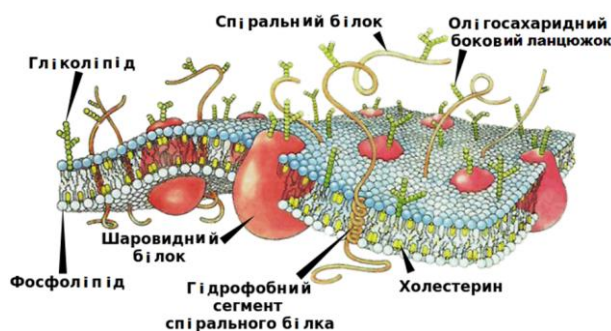


Рисунок 2 – Будова мембрани еукаріотичної клітини з підвищеною силою натягу та щільністю мембрани за рахунок холестерину

Розглянемо механічні властивості еукаріотичної клітини. У клітині будь-якої тканини є власна частота коливань. Коли інфразвук відповідної частоти впливає на мембрану клітини, можливе таке фізичне явище як резонанс. Отже, необхідно визначити диференціальне рівняння коливань мембрани. Зміщення точки мембрани з положення рівноваги позначимо через u , v , w . Через n позначимо напрямок нормалі до поверхні мембрани в даний момент часу. При таких позначеннях направляючі косинуси мають наступний вигляд

Розглядаються механічні властивості мембрани клітини мікроорганізму. Ефект резонансу мембрани клітини виникає внаслідок співпадання власних коливань з вимушеними. Зміщення точки мембрани з положення рівноваги визначаються наступними параметрами u , v , w . Визначимо напрямок нормалі h до поверхні мембрани в деякий момент часу. Направляючі косинуси мають наступний вигляд:

$$\cos(h, x_1) = -\cos(h, z_1) \frac{\partial w}{\partial t},$$

$$\cos(h, y_1) = -\cos(h, z_1) \frac{\partial w}{\partial t},$$

$$\cos(h, z_1) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y_1}\right)^2}}.$$

Прим малих деформацій мембрани, будемо мати наступні рівняння:

$$\cos(h, x_1) = -\frac{\partial w}{\partial t},$$

$$\cos(h, y_1) = -\frac{\partial w}{\partial t},$$

$$\cos(h, z_1) = 1.$$

Припустимо, що напруження $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}$ мають рівномірно розподілятися по товщині мембрани. Якщо компоненти напруження будуть малі, отримаємо наступне рівняння:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{S}{d},$$

де d – товщина мембрани.

Якщо малими величинами знехтувати, отримаємо:

$$\sigma_x \cos(h, x_1) + \tau_{xy} \cos(h, y_1) + \tau_{xz} \cos(h, z_1) = -\frac{S}{d} \frac{\partial w}{\partial x_1} + \tau_{xz} = 0$$

$$\tau_{yx} \cos(h, x_1) + \sigma_y \cos(h, y_1) + \tau_{yz} \cos(h, z_1) = -\frac{S}{d} \frac{\partial w}{\partial y_1} + \tau_{yz} = 0$$

$$\tau_{xz} \cos(h, x_1) + \tau_{yz} \cos(h, y_1) + \sigma_z \cos(h, z_1) = \sigma_z = 0,$$

таким чином остаточно отримаємо:

$$\tau_{xz} = \frac{S}{d} \frac{\partial w}{\partial x_1}, \tau_{yz} = \frac{S}{d} \frac{\partial w}{\partial y_1}, \sigma_z = 0.$$

Якщо підставити рівняння, які наведені вище у третє рівняння рівноваги:

$$\left(\frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yz}}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 \sigma_z}{\partial z_1^2} \right) t = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

отримаємо диференціальне рівняння руху мембрани:

$$\frac{S}{d} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y_1^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

де ρ – маса одиниці об'єму мембрани.

Відповідно $\mu = \rho d$.

Рівняння маси на одиницю поверхні представлено нижче:

$$c^2 = \frac{S}{\mu} = \frac{S}{\rho d}, \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y_1^2} = \Delta w.$$

Отримаємо диференціальне рівняння у вигляді:

$$c^2 \Delta w = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}.$$

Очевидно, що товщина мембрани грає найголовнішу роль у визначенні резонансних властивостей клітини мікроорганізму. Товщина мембран живих організмів має наступний діапазон: від 5 до 10 нм. Резонансна частота буде різною для різних клітин.

Розглянемо математичну модель деякої мембрани, яка має прямокутну форму. Якщо ввести еквівалентні

контактні сили і додати резонансну напруженість з рівнянням вільних коливань (рис. 3), отримаємо:

$$R_1(x, y, t) = (H \cdot \Delta x + H \cdot \Delta y) \cdot R_1(t),$$

$$R_2(x_1, y_1, t_1) = (\delta x - \delta x_2)(\delta y - \delta y_2) \cdot R_2(t),$$

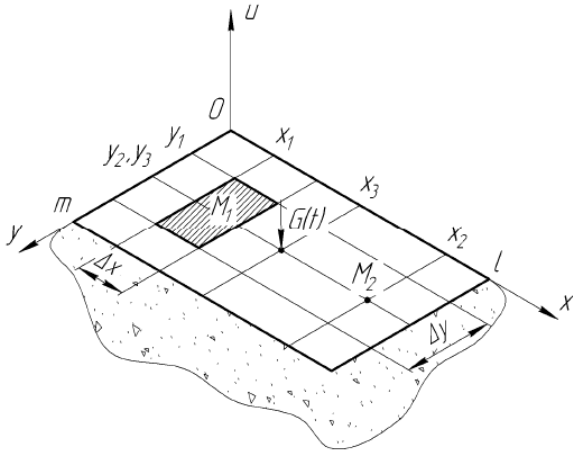


Рисунок 3 – Спрощена модель клітинної мембрани у тривимірній декартовій системі координат з механічним навантаженням

Якщо переміщення мас дорівнюють переміщенням точок мембрани. Тоді припустимо, що переміщення Δx , Δy мають мале значення в порівнянні з l і m .

$$X_{M1}(t) = dx(x_1, y_1, t), X_{M2}(t) = dx(x_2, y_2, t).$$

Розглянемо параметричну модель Власова-Леонтьєва [5]:

$$R_1(x_1, y_1, t_1) = \frac{2E_0 \cdot \nabla^2 \cdot X(x_1, y_1, t_1)}{1 - g_0^2} \int_0^H (\psi')^2 dz \cdot +$$

$$+ \frac{E_0 \cdot X(x_1, y_1, t_1)}{4(1 + g_0^2)} \int_0^H \psi^2 dz \cdot + m_f \cdot \frac{\partial^2 X(x_1, y_1, t_1)}{\partial t^2},$$

$$t_f = \frac{E_0}{1 - g_0^2} \int_0^H (\psi')^2 dz, k_f = \frac{E_0}{4(1 + g_0^2)} \int_0^H \psi^2 dz$$

де t_f і k_f – коефіцієнти, що характеризують роботу мембрани на стиск і зрушення, E_0 , ν_0 – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Маса пружної основи має вигляд:

$$m_f = \rho_0 \int_0^H \psi^2 dz,$$

де ρ_0 – щільність матеріалу клітинної мембрани.

Затухання коливання в глибині мембрани клітини відбувається за наступним законом:

$$\psi(z) = \frac{\sin(\gamma(H-z))}{\sin(\gamma H)},$$

де γ – коефіцієнт згасання коливань мембрани; H – товщина мембрани.

Диференціальне рівняння коливання при резонансі системи «мембрана-внутрішнє середовище клітини» може бути записано у наступним чином:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} (R_0(x_1, y_1, t_1) + R_1(x_1, y_1, t_1) + R_2(x_1, y_1, t_1) - \rho \cdot G(x_1, y_1, t_1)) =$$

$$= a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y_1^2} \right)$$

Диференціальне рівняння представимо у вигляді подвійного ряду Фур'є:

$$u(x_1, y_1, t_1) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} u_{k,n}(t) \cdot \sin \frac{k\pi x_1}{l} \cdot \sin \frac{n\pi y_1}{l}.$$

Після підстановки в рівняння, яке приведено вище, отримаємо:

$$u(x_1, y_1, t_1) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_{1k,n}}{\lambda_{k,n}} \right) \cdot \int_0^t R_1(\tau) \cdot \sin(\lambda_{k,n}(t-\tau)) dt + \left(\frac{C_{2k,n}}{\lambda_{k,n}} \right) \cdot \int_0^t R_2(\tau) \times$$

$$\times \sin(\lambda_{k,n}(t-\tau)) dt + \left(\frac{C_{3k,n}}{\lambda_{k,n}} \right) \cdot \int_0^t G(\tau) \cdot \sin(\lambda_{k,n}(t-\tau)) dt \sin \frac{k\pi x_1}{l} \cdot \sin \frac{n\pi y_1}{l},$$

де

$$C_{1k,n} = \frac{4}{(\rho + m_f) k n \pi^2} \left(\cos \frac{k\pi x_1}{l} - \cos \frac{k\pi(x_1 + \Delta x)}{l} \right) \left(\cos \frac{k\pi y_1}{m} - \cos \frac{k\pi(y_1 + \Delta y)}{m} \right),$$

$$C_{2k,n} = \frac{4}{(\rho + m_f) l m} \sin \frac{k\pi x_2}{l} \sin \frac{n\pi y_2}{m},$$

$$C_{3k,n} = -\frac{4}{(\rho + m_f) l m} \sin \frac{k\pi x_3}{l} \sin \frac{n\pi y_3}{m},$$

$$\lambda_{k,n} = \sqrt{\left(\pi^2 \cdot (2t_f + a^2 \rho) \cdot \left(\frac{k^2}{l^2} + \frac{n^2}{m^2} \right) + k_f \right) / (\rho + m_f)}.$$

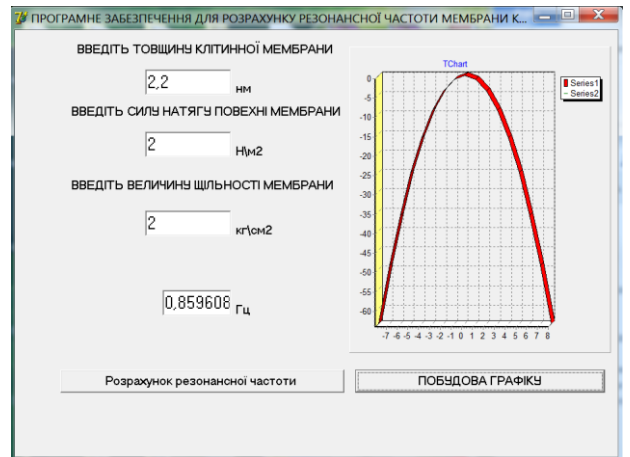


Рисунок 4 – Програмне забезпечення для визначення резонансної частоти мембранної клітини мікроорганізму

Запропоновано програмне забезпечення для визначення резонансної частоти цитоплазматичної мембрани мікроорганізмів. Для роботи програмного забезпечення необхідно ввести в робоче вікно програми наступні параметри: товщину цитоплазматичної мембрани (нм), силу натягу поверхні мембрани (Н/м2) та щільність мембрани 1кг\см2. Наприклад, розрахована резонансна частота

мембрани випадкового мікроорганізму товщиною 2,2 нм, сила натягу поверхні мембрани при цьому складає 1 Н/м^2 , щільність мембрани має 1 кг/см^3 . Розрахована резонансна частота випадкового мікроорганізму становить 0,86 Гц (рис.4). Було проведено дослідження акустичних характеристик в випромінювачі інфразвукових коливань типу рупор.

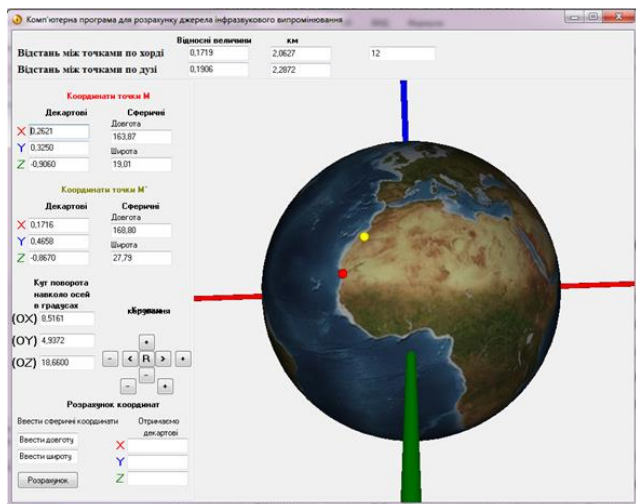


Рисунок 5 – Програмне забезпечення для визначення джерела інфразвукового випромінювання

Запропоновано програмне забезпечення для знаходження джерела інфразвукового випромінювання (рис.5). Особливістю програмного забезпечення є тривимірний модуль з мінімальними апаратними вимогами та відповідними органами керування, швидкість розрахунків (відстані по хорді і по дузі в кілометрах та у відносних одиницях між двома точками, визначення декартових координат за відомими сферичними). Програмне забезпечення працює наступним чином: за допомогою лівої клавіші миші встановлюємо фіксовану точку М, за допомогою правої клавіші встановлюємо фіксовану точку М'. У відповідних вікнах відображуються декартові координати. При переміщенні фіксованих точок по поверхні моделі земної кулі декартові координати змінюються. За допомогою колеса маніпулятора типу “миші” можливо здійснювати збільшення моделі земної кулі.

Будь-яка система має власні резонансними частотами. У спокійному стані, тобто, в стані рівноваги системи, вони ніяк не проявляються. Але, варто тільки вивести систему зі стану рівноваги, наприклад, просто порушивши всередині приміщення складний звуковий сигнал, наприклад, музичний, як ця система відразу ж проявить свої власні резонансні частоти. Акустичний резонанс – це ефект різкого зростання результуючої амплітуди звукового сигналу при наближенні частоти збудливого сигналу до власної частоти системи.

III. ВИСНОВКИ

У роботі зроблений огляд впливу інфразвуку на цитоплазматичну мембрану. Запропоновано математична модель та програмне забезпечення для визначення резонансної частоти цитоплазматичної

мембрани живого організму для пригнічення життєдіяльності останнього. Для роботи програмного забезпечення необхідно всього три параметри: товщина цитоплазматичної мембрани, сила натягу поверхні мембрани та щільність мембрани.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Kukhareno, D., Pasenko, A., Sakun, O., Antonova, O., Yuliia, I. Software Modeling of Measuring the Influence of Infrasound as a Production and Environmental Factor of Industry Technologies on the Membrane Complex of Microorganisms of Technological Processes. Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2023.
- [2] Nykyforov, V., Sakun, O., Digtar, S., ... Maznytska, O., Kukhareno, D. Determination of Electromagnetic Radiation Intensity by Reaction of Hydro- and Aerobionts. Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021
- [3] Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2024). The Sobel algorithm implementation for detection an object contour in the mobile robot's workspace in real time.
- [4] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
- [5] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2024). MobileNetV2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.
- [6] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Gurin, D. (2024). Human Operator Identification in a Collaborative Robot Workspace within the Industry 5.0 Concept. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 95-105.
- [7] Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Gurin, D. (2024). Human Operator Identification in a Collaborative Robot Workspace within the Industry 5.0 Concept. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 95-105.
- [8] Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2024). Using Convolutional Neural Networks to Analyze and Detect Key Points of Objects in Image. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 5-15.
- [9] Gurin, D., Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., & Maksymova, S. (2024). Using the Kalman Filter to Represent Probabilistic Models for Determining the Location of a Person in Collaborative Robot Working Area. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 66-75.