

Манойлов В.П., д.т.н., проф.
Житомирський державний технологічний університет
Ключенко А.І., магістр
Житомирський державний технологічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОТКАНИНУ

За останні десятиліття людство почало активно використовувати НВЧ випромінювання. Найяскравіші області його застосування це мобільний зв'язок, мікрохвильові печі, і так звані WiFi роутери. Проте використовувати одну з властивостей цього випромінювання, а саме тепловий ефект, можна також у медицині. Враховуючи високу проникаючу здатність НВЧ хвиль доцільно використати дане явище у боротьбі з злоякісними новоутвореннями, такими як ракові пухлини.

Контрольований нагрів тканин за допомогою НВЧ хвиль можна використати як в діагностиці пухлин так і в лікуванні. В першому випадку підвищена температура пухлин допоможе чіткіше і точніше визначити розміри і розміщення новоутворень неінвазивними методами, такими як ІЧ термографія та радіометрія. В другому, за рахунок досягнення високої температури, достатньої для руйнування клітин, можна позбутися новоутворення термічним методом не завдаючи значної шкоди навколишнім тканинам і організму в цілому. Досягти таких результатів можна завдяки різним значенням діелектричної проникності та теплопровідності в пухлині та звичайних здорових клітинах.

Для запобігання небажаних опіків необхідно зрозуміти як розподіляється тепло всередині пухлини і навколо неї. Завдяки аналогії між електростатичним і тепловими полями (поля потенціальні), можна змодельовати останнє, використовуючи методи рішення електростатичних задач (зокрема, теорему Гауса і метод дзеркальних зображень). Розглянемо новоутворення в вигляді сфери радіусом r_0 , яка розташована достатньо далеко від поверхні шкіри, тобто практично у вільному просторі, яке володіє певними теплофізичними властивостями.

Задано наступними умовами:

- нагрів пухлини відбувається в основному внаслідок процесів метаболізму, при цьому по об'єму пухлини відбувається виділення тепла з рівномірною питомою густиною ρ [Вт/см³];
- всередині і зовні пухлини теплопровідність становить відповідно λ_1 і λ_2 [Вт/см*К].

Для теплового поля аналогією є електростатична модель у вигляді діелектричної кулі радіусом r_0 , всередині і зовні якої діелектрична стала рівна ϵ_1 і ϵ_2 відповідно. Куля рівномірно заряджена з питомою густиною заряду ρ [Кл/см³] (рис. 1).

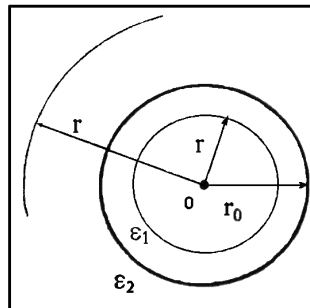


Рис. 1. Електростатична модель новоутворення

Теплова модель описується співвідношеннями із заміною ϵ - на λ (теплопровідність). В результаті отримуємо наступний розподіл температур:

$$T = \frac{\rho r_0^2}{3} \left(\frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{2\lambda_1} \right), \text{ в центрі пухлини;} \quad (1)$$

$$T = \frac{\rho r_0^2}{3} \left(\frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{2\lambda_1} \right) - \frac{\rho r}{6\lambda_1}, \text{ всередині пухлини;} \quad (2)$$

$$T = \frac{\rho r_0^3}{2\lambda_2 r}, \text{ поза пухлиною.} \quad (3)$$

Для побудови моделі теплового впливу НВЧ випромінювання на біотканину і пухлину в тому числі необхідно врахувати ряд факторів, наведених нижче.

Поглинення електромагнітних хвиль обумовлено провідністю тканин. В цьому випадку діелектричну проникність записують у вигляді комплексної величини, яка залежить від частоти електромагнітної хвилі. Так для діелектричної проникності шкіри в НВЧ і КВЧ діапазоні електромагнітних хвиль може бути використана формула Дебая:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{1 - i\omega\tau} - \frac{\sigma}{i\omega\varepsilon_0}, \quad (4)$$

де $\omega = 2\pi f$, f – частота електромагнітної хвилі; $\varepsilon_1 = 4$; $\varepsilon_2 = 42$; $\tau = 6,9 \cdot 10^{-12}$ с; $\sigma = 1,4$ См/м; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Оскільки у нашому випадку існує декілька видів тканин з різними параметрами, то необхідно проводити такі розрахунки для кожного з них і підраховувати загальне поглинання.

При попаданні електромагнітної хвилі на границю розділу двох середовищ (наприклад, повітря і шкіри людини) коефіцієнт відбиття знаходиться наступним чином:

$$R = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + \beta_2^2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2 + \beta_2^2}. \quad (5)$$

Тут величини α_j , β_j – відповідно дійсна і уявна частини хвильового вектора в кожному із середовищ:

$$k_j = \alpha_j + i\beta_j. \quad (6)$$

Оскільки моя модель є багатошаровою то кінцева формула матиме значно складніший вид.

Розподіл питомого енерговиділення в другому середовищі з врахуванням припущень матиме вигляд:

$$Q_f = bP(1 - R)\exp(-bx), \quad (7)$$

де P – потужність випромінювання; $b = \frac{1}{2}\beta_2$ – характерна глибина проникнення енергії електромагнітної хвилі в друге середовище.

Велика кількість кровоносних судин і неперервна циркуляція крові визначають специфіку переносу тепла в живій тканині. В припущенні однорідності та ізотропності кровотоку в межах об'єму біотканини що розглядається, кров яка поступає має артеріальну температуру T_a , а та що витікає – температуру ділянки тканини T . Тоді конвективне перенесення тепла кров'ю рівне:

$$Q_b = \rho_b c_b W (T_a - T), \quad (8)$$

де W – перфузія; ρ_b, c_b – відповідно густина і теплоємність крові.

Отже необхідно визначити скільки тепла поглине досліджувана ділянка (яку частину отримує пухлина порівняно з тканинами навколо пухлини), скільки тепла віднесеться кров'ю, щоб отримати питоме тепловиділення ρ в пухлині з урахуванням як природнього тепла, так і доставленого за допомогою СВЧ випромінювання.

Висновки

1. Побудова моделі вимагає врахування багатьох умов і параметрів, виконати які можна частково або за допомогою умовних припущень, тому її ефективність необхідно перевіряти на фізичному макеті в лабораторних умовах;

2. Дана модель дасть можливість визначити безпечні граничні межі вхідних параметрів, таких як частота та потужність випромінювання, а також знайти їх оптимальне відношення для діагностики та лікування;

МАНОЙЛОВ В'ячеслав Пилипович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Радіотехніки і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету. Наукові інтереси: НВЧ техніка, радіовимірювання.

КЛЮЧЕНКО Арсеній Ігорович, магістр групи БМ-11м кафедри РТ і Т Житомирського державного технологічного університету. Наукові інтереси: НВЧ техніка, радіовимірювання, e-mail: arseniy.senia@yandex.ua