

МОДЕЛЬ ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЇ ЛЮДИНИ ПРИ ЕМ ГІПЕРТЕРМІЇ

Інститут сталого розвитку ім. В. Чорновола, Національний університет –Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, stasevych@ukr.net

Лікування злоякісних пухлин відбувається як традиційними методами (хімічна, променева терапія), так і новими (малоінвазивними), які при менших ускладненнях в організмі дають більший терапевтичний ефект. Мова йде про технології направленою руйнування злоякісних клітин термічним або хімічним (електрохімічним) впливом.

Існують різні види термічного впливу на злоякісні пухлини: лазерна, мікрохвильова, радіочастотна, ультразвукова, кріодеструкція. Методики локального руйнування злоякісних пухлин використовуються при лікуванні пухлин печінки, нирок, легень та інших органів.

Одним із таких методів лікування є метод локальної гіпертермії злоякісної пухлини - руйнівне нагрівання пухлини, причому необхідно обережати здорові клітини від перегрівання. Підвищення температури тіла згубно впливає на злоякісні пухлини та покращує діяльність імунної системи. Локальне підвищення температури ураженої ділянки тіла до 42-47°C робить злоякісні клітини більш чутливими до радіоактивного випромінювання та сильнодіючих хімічних препаратів.

Для побудови моделі терморегуляції людини використаємо пасивну систему терморегуляції тіла людини, запропоновану Dusan Fiala [1]. Пасивна система терморегуляції моделюється геометричною апроксимацією тіла людини та явищами теплообміну в ньому.

Геометрична модель тіла людини. Геометрично тіло людини розбивається на 16 сегментів: голова; шия; тулуб - грудна клітка, черевна порожнина; дві верхні кінцівки - передпліччя, лікоть, кисть; дві нижні кінцівки - стегно, гомілка, стопа. Усі сегменти тіла представлені багат шаровими циліндрами, а голова – сферою.

У свою чергу, в залежності від фізичних параметрів сегменти тіла шия, нижні та верхні кінцівки поділяються на чотири шари: ядро – кістка, м'язова тканина, жирова тканина та шкіра. Тулуб людини представлений як два п'ятишарових сегменти з різними фізичними властивостями ядра - легені та нутрощі, кістка, м'язова тканина, жирова тканина, шкіра. Голова представлена як чотиришарова сфера (ядро – мозок, кістка, жирова тканина, шкіра).

Теплова модель тіла людини. Кожна частина тіла має певну температуру, яка підтримується завдяки системі терморегуляції. Метаболічне тепло, яке виробляється організмом, розноситься у різні частини тіла за рахунок циркуляції артеріальної крові і теплоперенесення до поверхні тіла. У свою чергу між організмом людини та навколишнім середовищем відбувається постійний теплообмін, а система терморегуляції підтримує температуру окремих частин тіла постійною.

Випаровування відбувається з поверхні шкіри і легень (за рахунок дихання), що складає близько 30% тепловтрат. Найбільша частка тепловтрат (близько 50%) припадає на випромінювання в зовнішнє середовище від відкритих частин тіла та одягу.

Розподіл теплового поля знаходиться з рівняння Penne [3], яке має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_m + w_{bl} \rho_{bl} c_{bl} (T_{bl,a} - T), \quad (1)$$

де - ρ , c , ρ_{bl} , c_{bl} - густина і теплоємність біотканини і артеріальної крові відповідно; λ - коефіцієнт теплопровідності біотканини; n – безрозмірний коефіцієнт ($n=1$ для полярних координат і $n=2$ для сферичних); w_{bl} - швидкість перфузії крові; T , $T_{bl,a}$ - температура біотканини і артеріальної крові відповідно; q_m - метаболічна теплопродукція (основна швидкість обміну речовин) [1, 2].

Величини термofізичних і фізіологічних параметрів організму людини для кожного шару відповідного сегменту тіла наведено у [1, 2]. Для проведення розрахунків прийнято, що тканина кожного шару відповідного сегмента тіла є однорідною по всій товщині шару. Для визначення залежності кровотоку від температури в охолоджуваних приповерхневих ділянках тіла скористаємося співвідношенням [5]:

$$w_{bl} = w_{bl,0} [1 - K_1 (T_{bl,a} - T)], \quad (2)$$

де w_{bl} - перфузія крові, яка відповідає базовому рівню температури ($T_b=36.6^0\text{C}$); $K_1=0.01\dots 0.035$.

При температурах, вищих за базовий рівень, кровотік у м'язових тканинах залишається практично незмінним до досягнення критичної температури $T_{cr}=41.5^0\text{C}$. Зростання кровотоку в цьому випадку може бути апроксимоване лінійною функцією [9]:

$$w_{bl} = w_{bl,0} [1 - K_1 (T_{cr} - T)]. \quad (3)$$

У моделі Dusan Fiala [2] метаболічне вироблення тепла складається із базового значення метаболізму $q_{m,b,0}$ та додаткового тепла Δq_m :

$$q_m = q_{m,b,0} + \Delta q_m. \quad (4)$$

Моделювання потужності тепловиділення електромагнітного поля. Для знаходження розподілу теплового поля ділянки тіла, яка піддається гіпотермічній процедурі, напишемо рівняння Penne у циліндричних координатах [4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_m + S(r, z, \theta, t) + w_{bl} \rho_{bl} c_{bl} (T_{bl,a} - T), \quad (5)$$

де $S(r, z, \theta, t)$ - об'ємна потужність тепловиділення, створювана ЕМ випромінювачем.

Література

1. Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system*, *J. Appl. Physiol.* 87 (1999) 1957-1972.
2. Kingma, B. *Human Thermoregulation. A Synergy between Physiology and Mathematical Modelling*, Ph.D thesis, Maastricht University, 2012.
3. Pennes, H. H. *Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm*. *J. Appl. Physiol.* 1: 93–121, 1948.
4. Werner, J., and M. Buse. *Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body*. *J. Appl. Physiol.* 65: 1110-1118, 1988.