

С. Стасевич, І. Казимира, М. Плавайка (Львів, УКРАЇНА)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТІЛА ЛЮДИНИ ПРИ ЗОВНІШНІХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВАХ

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

Температура тіла людини є показником теплового стану організму, що відображає складні процеси між теплоутворенням різних органів, тканин та теплообміном між ними і зовнішнім середовищем. Середня температура людського тіла лежить в діапазоні  $36,5^{\circ}\text{C}$  -  $37,2^{\circ}\text{C}$ , завдяки системи терморегуляції організму.

Утворення тепла організмом та його віддача назовні напряму залежить від температури навколишнього середовища. Найкращу термостабільність серед теплокровних має людина: при зміні температури навколишнього середовища на  $10^{\circ}\text{C}$  температура її тіла змінюється приблизно на  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Причому температура шкіри може коливатися на  $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$  (від  $28^{\circ}\text{C}$  на кінцівках до  $34^{\circ}\text{C}$  на шкірі голови), а внутрішні терморецептори реагують на зміну сотих градусів органу.

Температурний стан комфорту для оголеної людини становить  $28^{\circ}\text{C}$  -  $30^{\circ}\text{C}$ , а легко одягненої при  $22^{\circ}\text{C}$  -  $25^{\circ}\text{C}$ . Температура тіла вище  $42^{\circ}\text{C}$  призводить до втрати свідомості, при ній відбувається порушення обміну речовин в тканинах мозку. При температурі  $27^{\circ}\text{C}$  настає кома, відбувається порушення серцевої діяльності та дихання.

Різні органи мають різну активність метаболізму, і тому їх температура є різною. Найвищу температуру має печінка ( $37,8^{\circ}\text{C}$  -  $38^{\circ}\text{C}$ ), оскільки вона розташована глибоко всередині тіла і має найвищий рівень обмінних процесів. Найбільш інтенсивне теплоутворення спостерігається в м'язах, печінці та нирках. Основний носій температурної складової в організмі — артеріальна кров в лівому шлуночку і великих магістральних судинах.

Сталість температури тіла при будь-яких зовнішніх впливах на організм зберігається лише при рівновазі процесів теплоутворення і тепловіддачі організму. Це досягається за допомогою фізичних і хімічних процесів терморегуляції.

Теплообмін людини з навколишнім середовищем відбувається за рахунок теплопровідності, конвекції, випромінювання та випаровування. Важко визначити співвідношення кількості відданої теплоти між перерахованими процесами, оскільки воно залежить від багатьох факторів: стану організму (температура, емоційний стан, рухливість і т.п.), стану навколишнього середовища (температура, вологість, рух повітря тощо), одягу (матеріал, форма, колір, товщина).

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

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 багатошаровими 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).

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.

Розподіл теплового поля знаходиться з рівняння Пенне [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  $\rho$ ,  $c$ ,  $\rho_{bl}$ ,  $c_{bl}$  - густина і теплоємність біотканини і артеріальної крові відповідно;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності біотканини;

$n$  – безрозмірний коефіцієнт ( $n=1$  для полярних координат і  $n=2$  для сферичних);

$w_{bl}$  - швидкість перфузії крові [1];

$T$ ,  $T_{bl,a}$  - температура біотканини і артеріальної крові відповідно;

$q_m$  - метаболічна теплопродукція (основна швидкість обміну речовин) [1].

Величини термофізичних і фізіологічних параметрів організму середньостатистичної людини (висота – 180 см, вага – 70 кг, легко одягнена) 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.

Дана модель дозволяє прогнозувати комфортний стан людини, яка перебуває в різних умовах зовнішніх температур. Задача розв'язувалася методом кінцевих різниць, граничні умови на поверхні різних частин тіла [4]: голова, шия – 33.5°C, тулуб (грудна клітка, черевна порожнина) – 33.9°C, рука – 32.6°C, долоня – 31.2°C, нога – 32.5°C, ступня – 31.1°C.

### 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.
5. Костюк І., Стасевич С. *Моделювання теплового стану ділянки тіла людини при НВЧ опроміненні з використанням гнучких плоских індикаторів / Електроніка и связь, №11, Киев, 2001, С.71-73.*