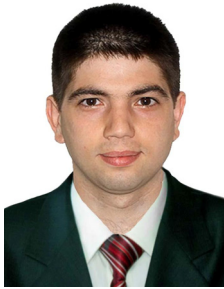


УДК 537.32



Кобилянський Р.Р.

Кобилянський Р.Р.^{1,2}, Москалик І.А.¹

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Москалик І.А.

ПРО РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В ГОЛОВІ ЛЮДИНИ ПРИ ЗАДАНИХ ТЕПЛОВИХ ПОТОКАХ НА ЇЇ ПОВЕРХНІ

У роботі наведено огляд та аналіз фізичних і комп'ютерних моделей охолодження голови людини. За допомогою об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання наявних фізичних моделей визначено розподіли температури в голові людини при заданих теплових потоках на її поверхні. Виявлено недоліки моделей голови людини та запропоновано шляхи їх вдосконалення.

Ключові слова: термоелектричне охолодження, охолодження голови людини, гіпоксія головного мозку, комп'ютерне моделювання.

The paper presents a review and analysis of the existing physical and computer models of human head cooling. With the aid of object-oriented computer simulation of currently available physical models the distributions of temperature in human head at given thermal fluxes on its surface are determined. The disadvantages of the existing models of human head are determined and the ways for their improvement are proposed.

Key words: thermoelectric cooling, human head cooling, brain hypoxia, computer simulation.

Вступ

Актуальна проблема у медицині – кисневе голодування головного мозку (гіпоксія), що розвивається внаслідок недостатнього надходження до нервових тканин кисню. Відбувається це з двох причин: через нестачу кисню в крові або через порушення забезпечення головного мозку кров'ю. Гіпоксія спостерігається в разі порушень мозкового кровообігу, шоків станів, гострої серцево-судинної недостатності, поперечної блокади серця, травм голови та асфіксії різного походження. Вона може виникати як ускладнення внаслідок операцій на серці та магістральних судинах, а також у післяопераційному періоді – гіпоксичні набряки головного мозку, інтоксикацію і травми центральної нервової системи.

Відомо, що охолодження головного мозку знижує його потребу в кисні, підвищує стійкість до гіпоксії і цим збільшує допустиму тривалість кисневого голодування. Наприклад, охолодження на 5 °С збільшує час життя мозку у кілька разів [1 – 4].

Для коректного проектування приладів для гіпотермії головного мозку необхідно знати розподіли температури голови людини. Але наявні в літературі фізичні моделі та результати

комп'ютерного моделювання теплових процесів голови людини суперечливі.

У роботі [5] розроблено двовимірну математичну модель для дослідження охолодження головного мозку немовлят та дорослих при зануренні в холодну воду. Модель голови спрощена і показана у формі півсфери, що складається з головного мозку, черепа та шкіри. Результати моделювання показують, що для немовлят температура крові в сонній артерії знижується всього на $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 5 хв із зануренням у воду з температурою $T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, у дорослих у такому випадку охолодження не спостерігалось. У роботі [6] побудовано тривимірну модель голови людини з урахуванням теплофізичних властивостей складових шарів голови людини. Проведено комп'ютерне моделювання охолодження голови людини льодом. Встановлено, що охолодження головного мозку буде спостерігатися лише у випадку, якщо не враховувати перфузію крові. Досліджено охолодження мозку за допомогою охолоджуючого шолома з температурою $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, у даному випадку маємо незначне охолодження кори мозку, а температура ядра мозку залишається незмінною ($T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$). Також у роботі [6] досліджено охолодження крові, що циркулює через шию. Встановлено, що охолодження артеріальної крові відбувається лише у випадку, коли швидкість крові буде зменшеною на порядок, що не можливо в реальних умовах. У роботі [7] виконано 3D-моделювання голови людини. При цьому фізична модель складається з чотирьох шарів: біла та сіра речовина, шкіра, череп. Встановлено, що буде незначне зниження температури поверхні головного мозку, але аналогічно роботі [6] у моделі не враховано перфузію крові. У роботі [8] проведено комп'ютерне моделювання охолодження головного мозку у немовлят і дорослих за допомогою охолоджуючого шолома з використанням Comsol Multiphysics. Результати показують, що у немовлят охолоджується лише 5–6 мм приповерхневого шару головного мозку, а пониження температури ядра мозку не відбувається навіть після шести годин застосування. Результати моделювання голови дорослої людини: за мінімальної температури охолоджуючого шолома $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура головного мозку знижується на $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. У роботі [9] було проведено експериментальне дослідження охолодження голови та шиї людини на 5-ти добровольцях віком 31–48 років. Охолодження здійснювалось упродовж 30 хв за допомогою охолоджуючого шолома та коміра, виготовлених з подвійного шару нейлону, з отворами для повітряного обдуву у внутрішньому шарі, температура повітря становить $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, розхід 42.5 л/с . Контроль за температурою мозку здійснювався за допомогою МРТ-сканера. Встановлено, що температура мозку за 30 хв понизилась на $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура у стравоході – на $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отримані результати свідчать, що відбувається незначне охолодження головного мозку людини та циркулюючої крові.

Мета пропонованої роботи – виявлення некоректності наявних моделей голови людини та визначення розподілів температури в голові людини за заданих теплових потоків на її поверхні.

Фізична модель голови людини

Фізичну модель створено на основі наявних моделей голови людини. Вона являє собою напівсферу, радіус якої R дорівнює середньому радіусу голови дорослої людини (рис. 1). Ця сфера має приповерхневі шари 1–3, товщини яких дорівнюють середнім товщинам скальпу

h_1 , підшкірного шару h_2 та кісток черепа h_3 відповідно. Всередині напівсфери знаходиться мозок 4 радіусом R_4 . Відповідні шари 1 – 4 розглядаються як об'ємні джерела тепла, в кожному з яких рівномірно по об'єму шару генерується тепло метаболізму q_{METi} ($i = 1..4$) та відбувається теплообмін з циркулюючою кров'ю, що задається коефіцієнтом перфузії крові ω_{bi} . При цьому мозок є біологічною тканиною з високою перфузією крові, а температура крові є незмінною $T_b = 37$ °С. Температури на границях відповідних шарів становлять T_1, T_2, T_3, T_4 . Теплофізичні властивості цих біологічних шарів наведено в табл. [10].

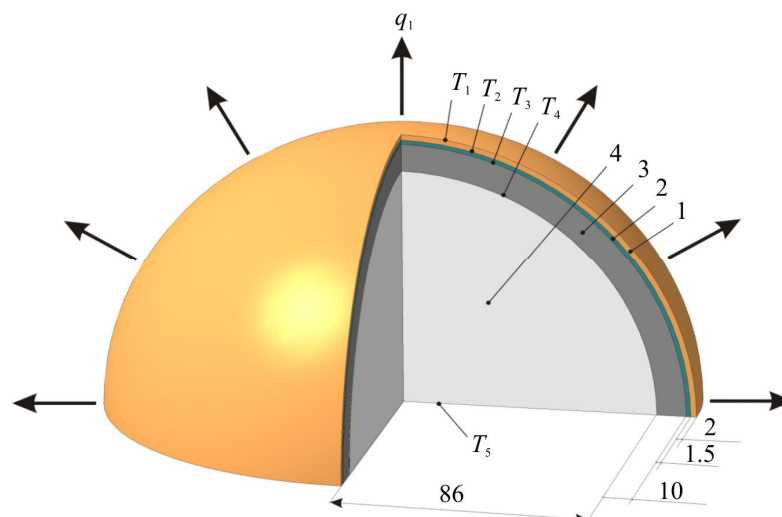


Рис. 1. Фізична модель голови людини.

Таблиця

Теплофізичні властивості біологічних шарів голови людини [10]

Анатомічна структура голови людини	Теплопровідність k , Вт/м·К	Густина ρ , кг/м ³	Питома теплоємність C_p , Дж/кг·К	Перфузія W_b , л·с ⁻¹ м ⁻³	Метаболізм $q_{теп}$, Вт/м ³
Скальп	0.47	1000	3680	1.5	363
Підшкірний шар	0.16	850	2300	0.2	130
Череп	1.16	1500	1591	0.15	130
Мозок	0.49	1080	3850	8.5	10437
Кров	0.5	1069	3650	–	–

Верхня поверхня напівсфери знаходиться в стані теплообміну з навколишнім середовищем (шляхом випромінювання та конвекції) або з охолоджуючим шоломом (із заданим інтегральним коефіцієнтом теплопередачі). Причому q_1 – це густина теплового потоку, що розсіюється з голови людини в навколишнє середовище. Нижня поверхня напівсфери має температуру $T_5 = 37$ °С.

Математичний опис фізичної моделі

Загальне рівняння теплообміну в біологічній тканині має такий вигляд [1 – 10]

$$\rho_i \cdot C_i \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa_i \cdot \nabla T) + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_{bi} \cdot (T_b - T) + q_{meti}, \quad (1)$$

де $i = 1..4$ – відповідні шари фізичної моделі голови людини,
 ρ_i – густина відповідного шару біологічної тканини ($\text{кг}/\text{м}^3$),
 C_i – питома теплоємність відповідного шару біологічної тканини ($\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$),
 ρ_b – густина крові ($\text{кг}/\text{м}^3$),
 C_b – питома теплоємність крові ($\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$),
 ω_{bi} – швидкість перфузії крові відповідного шару біологічної тканини ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$),
 T_b – температура крові людини (К),
 q_{meti} – кількість тепла від метаболізму відповідного шару ($\text{Вт}/\text{м}^3$),
 T – абсолютна температура (К),
 κ_i – коефіцієнт теплопровідності шару біологічної тканини ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$),
 t – час (с).

Вираз у лівій частині рівняння (1) являє собою швидкість зміни теплової енергії, що міститься в одиниці об'єму біологічної тканини. Три доданки у правій частині цього рівняння являють собою відповідно швидкість зміни теплової енергії за рахунок теплопровідності, перфузії крові та тепла метаболізму.

Рівняння теплообміну в біологічній тканині (1) необхідно розв'язувати з такими граничними умовами (2) – (3):

$$\begin{cases} q_1 = q_{pid} + q_{conv} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) + h_{conv} \cdot (T - T_0) \\ \text{або} \\ q_1 = h_{pid} \cdot (T - T_{pid}) \end{cases}, \quad (2)$$

$$T_s = 310 \text{ К}, \quad (3)$$

де q_1 – густина теплового потоку, що розсіюється з голови людини в навколишнє середовище, q_{pid} – густина теплового потоку шляхом випромінювання, q_{conv} – густина теплового потоку шляхом конвекції, ε – ступінь чорноти, σ – стала Больцмана, T – абсолютна температура, T_0 – температура навколишнього середовища, h_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну, h_{pid} – коефіцієнт конвективного теплообміну з рідиною, T_{pid} – температура рідини.

Результати комп'ютерного моделювання

З метою визначення теплового впливу на голову людини було створено тривимірну комп'ютерну модель голови, поверхня якої контактує з охолоджуючим шоломом. Для побудови комп'ютерної моделі використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [11], що дає можливість здійснювати моделювання теплофізичних процесів у біологічній тканині тіла людини з урахуванням кровообігу та метаболізму. Розрахунок розподілів температур та густини теплових потоків всередині голови людини здійснювався методом скінчених елементів (рис. 2) [12].

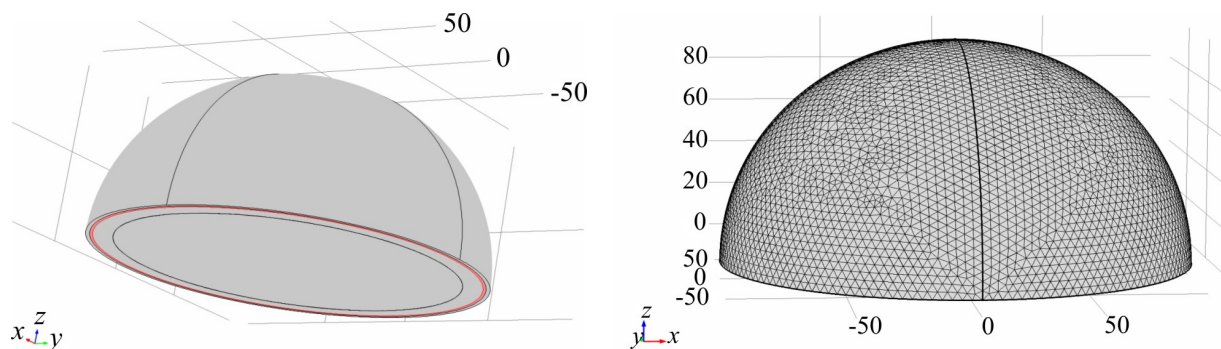


Рис. 2. Сітка методу скінчених елементів у комп'ютерній програмі COMSOL MULTIPHYSICS.

За допомогою об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температури всередині голови людини. Як приклад, на рис. 3 наведено розподіл температури в осьовому перерізі голови людини при загальному тепловому потоці з її поверхні $Q = 10$ Вт.

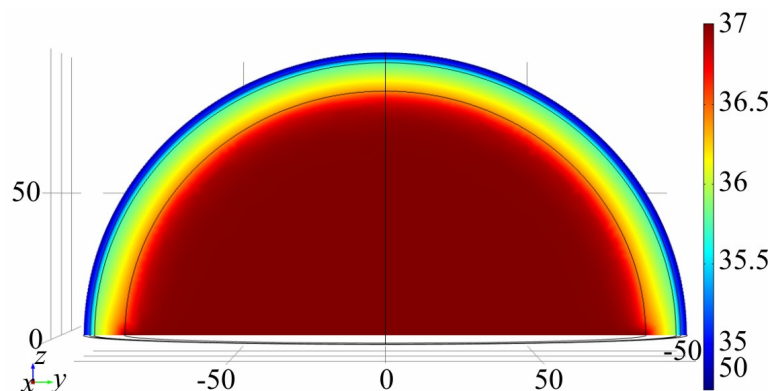


Рис. 3. Розподіл температури в осьовому перерізі голови людини при загальному тепловому потоці з її поверхні $Q = 10$ Вт.

Діапазон значень теплових потоків з поверхні голови людини становить $Q = 10 \div 100$ Вт, що обмежено мінімально допустимою температурою поверхні голови на рівні $+2$ °С. Для зручності порівняння вказаних теплових режимів на рис. 4 наведено розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови за відповідних значень теплових потоків з поверхні голови людини.

Із рис. 4 видно, що за умови дотримання мінімально допустимої температури зовнішніх покривів голови ($+2$ °С) до необхідної температури $+32$ °С можливо охолодити лише 3 мм приповерхневого шару головного мозку людини. При цьому температура ядра головного мозку залишається незмінною ($+37$ °С). У такому випадку від голови відводиться 90 Вт тепла, що згідно літературних даних [13] становить 90 % теплопродукції всього організму людини. Але насправді повинно бути охолодження головного мозку, оскільки тепловідведення на рівні 90 Вт у 6 разів перевищує загальну теплопродукцію голови людини. Внаслідок цього кров, що пройшла через голову, має охолоджуватися, а проходячи через тіло людини, охолоджувати весь організм людини і, повернувшись знов до голови температура крові, має бути дещо нижчою від температури $+37$ °С, яка в наявних моделях задається константою. Очевидно, що саме ця обставина і є основним недоліком наявних фізичних та комп'ютерних моделей голови людини.

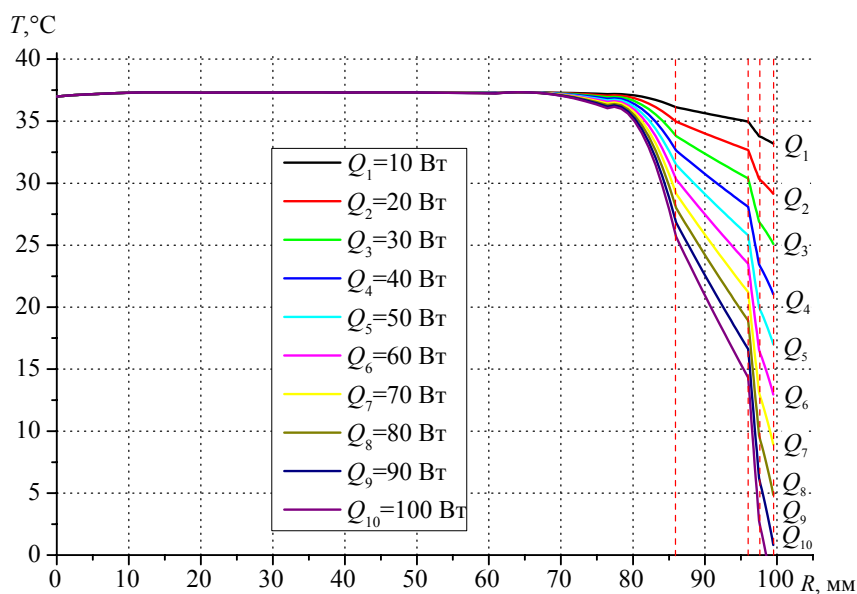


Рис. 4. Вплив потужності охолодження Q на розподіл температури T вздовж радіуса R півсфери голови людини.

Отже, відомі підходи щодо створення фізичних моделей та комп'ютерного моделювання голови людини, у яких температура артеріальної крові незмінна $T_{\text{крові}} = +37\text{ }^{\circ}\text{C}$, потребують вдосконалення шляхом урахування поступового охолодження циркулюючої крові та теплоємності всього організму людини.

Висновки

1. За допомогою об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання на основі наявних фізичних моделей визначено розподіли температури в голові людини за заданих теплових потоків на її поверхні. Встановлено, що за умови дотримання мінімально допустимої температури зовнішніх покривів голови ($+2\text{ }^{\circ}\text{C}$) до необхідної температури $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ можливо охолодити лише 3 мм приповерхневого шару головного мозку людини, а температура ядра головного мозку при цьому залишається незмінною на рівні $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Встановлено, що відомі підходи щодо створення фізичних моделей та комп'ютерного моделювання голови людини, у яких температура артеріальної крові є незмінною $T_{\text{крові}} = +37\text{ }^{\circ}\text{C}$, потребують удосконалення шляхом урахування поступового охолодження циркулюючої крові та теплоємності всього організму людини.

Список літератури

1. Liu Jing. Cooling strategies and transport theories for brain hypothermia resuscitation. *Front. Energy Power Eng. China* 2007, 1(1): 32 – 57.
2. Белоус А.М., Грищенко В.И. Кробиология. – К.: Наук. думка, 1994. – 431 с.
3. Дарбинян Т.М., Зиракадзе А.Н., Зольников С.М., Кинтрыя П.Я., Комаров Б.А., Копшев С.Н., Купин Н.П., Чачава К.Д. Гипотермия искусственная. – М.: Советская энциклопедия // – 1989 г.

4. Кобилянський Р.Р. Про перспективність використання термоелектрики для лікування голови людини охолодженням /Р.Р. Кобилянський, І.А. Москалик // Термоелектрика. – № 4. – 2015.
5. Xiaojiang Xu, Peter Tikuisis and Gordon Giesbrecht. A mathematical model for human brain cooling during cold-water near-drowning. 1999. – *J Appl Physiol.* – 86: 265 – 272.
6. Brian H. Dennis, Robert C. Eberhart, George S. Dulikravich, Steve W. Radons. Finite element simulation of cooling of realistic 3-d human head and neck. *Journal of biomechanical engineering.* January 2004.
7. Matthew A. Neimark, Angelos-Aristeidis Konstas, Jae H. Choi, Andrew F. Laine, John Pile-Spellman. Brain cooling maintenance with cooling cap following induction with intracarotid cold saline infusion: A quantitative model. *Journal of Theoretical Biology*-2008.
8. Michael Christiansen, Nikolai Rakhilin, Anna Tarakanova, Kevin Wong. Modeling brain cooling treatment approved for hypoxic-ischemic encephalopathy in infants to treat stroke and cardiac arrest in adult patients. Cornell University. Fall 2010.
9. Harris B.A., Andrews P.J.D., Marshall I., Robinson T.M. and Murray G.D. Forced convective head cooling device reduces human cross-sectional brain temperature measured by magnetic resonance: a non-randomized healthy volunteer pilot study. *British Journal of Anaesthesia* 100 (3): 365 – 72 (2008).
10. 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.* (1985). 1999 Nov; 87(5):1957 – 1972.
11. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
12. Легостаєв А.Д. Метод скінчених елементів // Конспект лекцій. – К.: КНУБА. – 2004. – с. 112.
13. Jiang S.C., Ma N., Li H.J., Zhang X.X. Effects of thermal properties and geometrical dimensions on skin burn injuries. Beijing, China. – 2002.- – с.713 – 117.

Надійшла до редакції 28.10.2015