

УДК 537.32

Анатичук Л.І.^{1,2}, Кобилянський Р.Р.^{1,2}



Анатичук Л.І.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна



Кобилянський Р.Р.

ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЛЮДИНИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМИ ЗАСОБАМИ

У роботі об'єктно-орієнтованим комп'ютерним моделюванням досліджено можливості охолодження головного мозку людини. За теплову фізичну модель голови вибрано напівсферу з 4-ма концентричними шарами, що враховує теплофізичні властивості структури голови. При моделюванні теплового стану у звичайних умовах отримано результати, що відповідають реальному розподілу температур. Розглянуто три способи охолодження головного мозку: зниження температури поверхні голови, охолодження артеріальної крові та зменшення кровопостачання. Встановлено, що охолодження поверхні голови приводить до зниження температури тільки у приповерхневих шарах головного мозку. Зменшення кровопостачання призводить до невеликого зростання температури мозку. Ефективним є охолодження головного мозку і голови в цілому при пониженні температури артеріальної крові, що поступає до голови.

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

In this paper, object-oriented computer simulation is used to study the possibilities of human brain cooling. As a thermal physical model of the head we selected a hemisphere with 4 concentric layers which take into account the thermophysical properties of head structure. Simulation of thermal status in normal conditions yielded the results that correspond to real temperature distribution. Three methods of human brain cooling are considered, namely reduction of head surface temperature, cooling of arterial blood and reduction of blood supply. It is established that cooling of head surface leads to temperature reduction only in the near-surface layers of human brain. Reduction of blood supply leads to a slight increase of brain temperature. Cooling of brain and head in general is efficient with temperature reduction of arterial blood coming to head.

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

Вступ

Одна з актуальних проблем у медичній практиці – кисневе голодування (гіпоксія) головного мозку людини [1, 2]. Воно спостерігається у випадках порушень мозкового кровообігу, шоків стані, гострої серцево-судинної недостатності, поперечної блокади серця, травм голови, отруєнні окисом вуглецю та при асфіксії різного походження. Гіпоксія головного мозку може також виникати як ускладнення при операціях на серці та на магістральних судинах, при гіпоксичних набряках головного мозку, інтоксикації і травмах центральної нервової системи [3].

Відомо, що охолодження головного мозку знижує його потребу в кисні, підвищує стійкість до гіпоксії і цим збільшує допустиму тривалість кисневого голодування. Наприклад, охолодження

головного мозку на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ збільшує час його життя у кілька разів [4–6]. Тому такі дослідження – актуальні.

Температура головного мозку є результатом дії декількох основних факторів: генерації тепла в голові, теплообміну голови з навколишнім середовищем, температури крові та інтенсивності кровообігу. Охолодження поверхні голови здається як найбільш простим, доступним і зручним способом впливу на температуру головного мозку людини. Тому цьому дослідженню присвячено низку робіт [7–10].

Ефективним засобом дослідження теплових процесів голови людини є, за можливість, коректне та точне комп'ютерне моделювання розподілів температури і теплових потоків. У роботі [7] розглянуто спрощену двовимірну модель голови людини у вигляді півсфери з концентричними шарами, що враховують теплофізичні властивості головного мозку, черепа та шкіри.

У роботі [8], на відміну від попередньої, використано тривимірну модель голови. Однак у роботі здійснено комп'ютерне моделювання охолодження голови людини лише для випадку, коли не враховано перфузію крові.

У роботі [9] розглянуто 3D-модель голови, що складається з чотирьох шарів: біла та сіра речовина, череп і шкіра. Встановлено, що при цьому буде незначне зниження температури поверхні головного мозку, але аналогічно роботі [8] у моделі не враховано перфузію крові, а температура артеріальної крові є незмінною $T_{\text{крові}} = +37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У роботі [10] проведено комп'ютерне моделювання охолодження головного мозку тільки для випадку, коли температура крові дорівнює $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$, що обмежує інформативність отриманих результатів.

Таким чином, наведені результати свідчать про необхідність проведення більш досконалого комп'ютерного моделювання охолодження головного мозку людини, що і є метою пропонованої роботи.

Фізична модель голови людини

Фізична модель голови людини являє собою напівсферу, радіус якої R дорівнює середньому радіусу голови дорослої людини (рис. 1). Напівсфера має триповерхневі шари 1–3, товщини яких дорівнюють середнім товщинам скальпу h_1 , підшкірного шару h_2 та кісток черепа h_3 , відповідно. Всередині напівсфери знаходиться головний мозок 4 радіусом R_4 . Відповідні шари 1–4 розглядаються як об'ємні джерела тепла, в кожному з яких рівномірно по об'єму генерується тепло метаболізму $q_{\text{MET}i}$ ($i = 1 \dots 4$) та відбувається теплообмін з циркулюючою кров'ю, що задається коефіцієнтом перфузії крові ω_{bi} . Температури на границях відповідних шарів становлять T_1, T_2, T_3, T_4 . Теплофізичні властивості цих біологічних шарів наведено в табл. 1 [11–12].

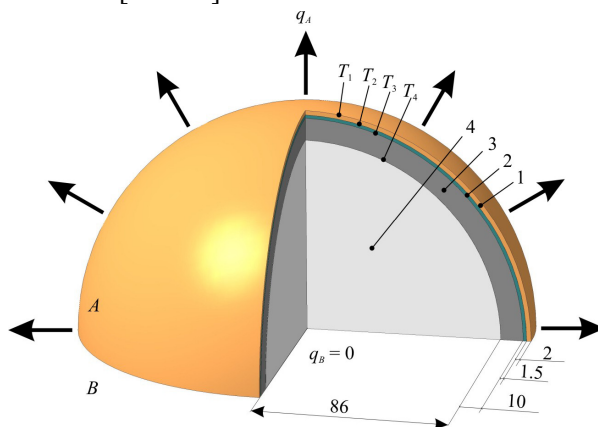


Рис. 1. Фізична модель голови людини.

Термофізичні властивості біологічних шарів голови людини [11 – 12]

Анатомічна структура голови людини	Теплопровідність (k) (Вт/м·К)	Густина (ρ) (кг/м ³)	Питома теплоємність (C_p) (Дж/кг·К)	Перфузія крові (W_b) (л·с ⁻¹ м ⁻³)	Метаболізм (q_{met}) (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	–	–

Поверхня A напівсфери знаходиться в стані теплообміну з навколишнім середовищем або за температури $+2\text{ }^\circ\text{C}$. Тепловий потік, що розсіюється з поверхні голови людини в навколишнє середовище – q_A . Поверхня B напівсфери адіабатично ізольована ($q_B = 0$).

Математичний опис фізичної моделі

Рівняння теплообміну в біологічній тканині має такий вигляд [7 – 12]:

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

де $i = 1 \dots 4$ – відповідні шари фізичної моделі голови людини,
 ρ_i – густина відповідного шару біологічної тканини,
 C_i – питома теплоємність відповідного шару біологічної тканини,
 ρ_b – густина крові,
 C_b – питома теплоємність крові,
 ω_{bi} – швидкість перфузії крові відповідного шару біологічної тканини,
 T_b – температура крові людини,
 q_{met_i} – кількість тепла від метаболізму відповідного шару,
 T – абсолютна температура,
 κ_i – коефіцієнт теплопровідності шару біологічної тканини,
 t – час.

Ліва частина рівняння (1) становить собою швидкість зміни теплової енергії, що міститься в одиниці об'єму біологічної тканини. Три доданки у правій частині – швидкість зміни теплової енергії за рахунок теплопровідності, перфузії крові та тепла метаболізму, відповідно.

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

$$q_A = q_{rad} + q_{conv} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) + h_{conv} \cdot (T - T_0), \quad (2)$$

$$q_B = 0. \quad (3)$$

Тут q_A – тепловий потік, що розсіюється з поверхні голови людини в навколишнє середовище, q_B – тепловий потік з поверхні B напівсфери, q_{rad} – тепловий потік шляхом випромінювання, q_{conv} – тепловий потік шляхом конвекції, ε – ступінь чорноти, σ – стала Больцмана, T – абсолютна температура, T_0 – температура навколишнього середовища, h_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну.

Результати комп'ютерного моделювання

З метою розв'язку рівняння теплообміну в біологічній тканині (1) з граничними умовами (2) – (3) було створено тривимірну комп'ютерну модель голови людини у пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics (рис. 2) [13]. Комп'ютерна модель дає можливість здійснювати моделювання теплофізичних процесів у біологічній тканині тіла людини з урахуванням кровообігу та метаболізму згідно з фізичною моделлю. Визначення розподілів температур та густини теплових потоків всередині голови людини здійснювалося методом скінчених елементів (рис. 3) [14].

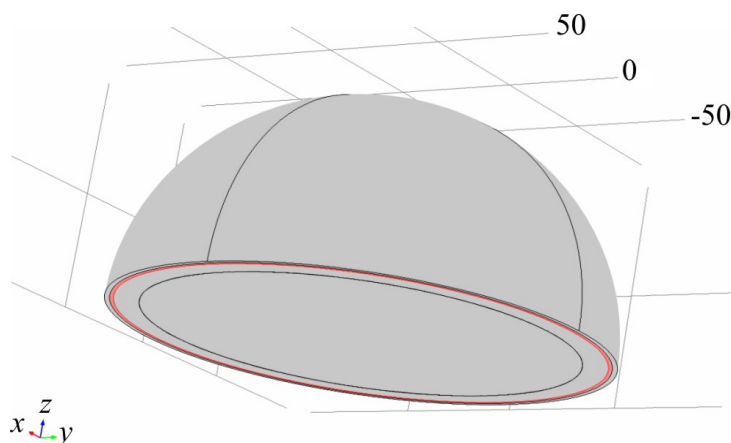


Рис. 2. Тривимірна комп'ютерна модель голови людини у програмі Comsol Multiphysics.

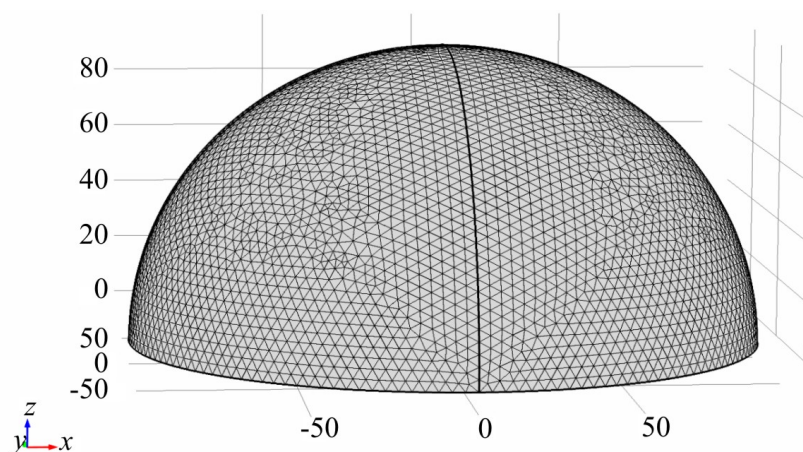


Рис. 3. Сітка методу скінчених елементів у комп'ютерній програмі Comsol Multiphysics.

Спочатку було здійснено комп'ютерне моделювання для типового спокійного стану людини за температури навколишнього середовища $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Картину розподілу температури в перерізі голови людини наведено на рис. 4. У цьому випадку температура в центрі головного мозку становить $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає реальним значенням [15] і є доказом того, що модель правильно відтворює реальні процеси в голові людини.

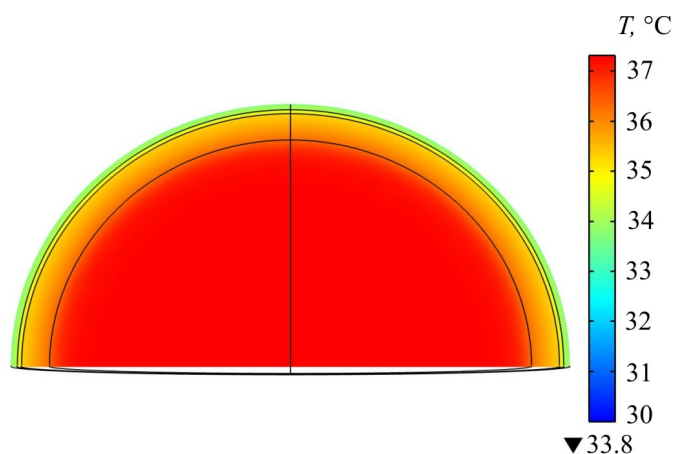


Рис. 4. Картина розподілу температури в перерізі голови людини при конвективному теплообміні голови з повітрям при температурі + 20 °С.

Також при конвективному теплообміні голови з повітрям при температурі + 20 °С було визначено розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини при незмінному кровопостачанні головного мозку та зміні температури артеріальної крові від 30 °С до 37 °С з інтервалом 1 °С (рис. 5), що відповідає розподілу температур, наведеному на рис. 4.

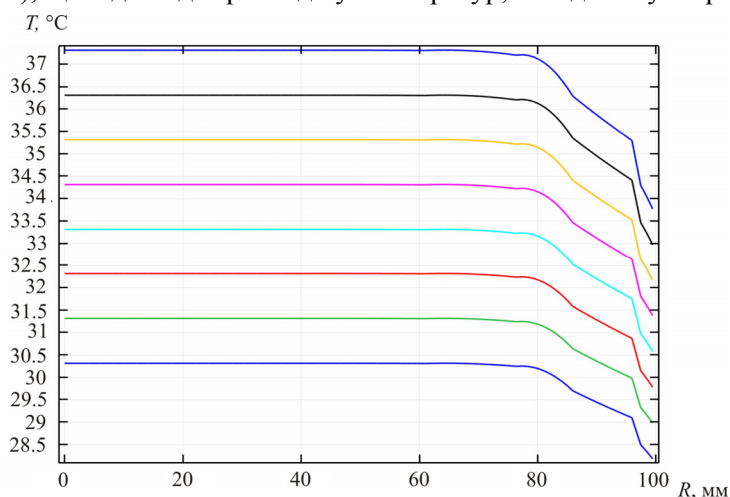


Рис. 5. Розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини при конвективному теплообміні голови з повітрям при температурі + 20 °С, незмінному кровопостачанні головного мозку та зміні температури артеріальної крові від 30 °С до 37 °С з інтервалом 1°С.

Тепер розглянемо випадок, коли температура на поверхні голови + 2 °С, що відповідно до медичних вимог є мінімально допустимою температурою [2, 3]. Картину розподілу температури в перерізі голови людини у цьому випадку наведено на рис. 6, а розподіл температури вздовж радіуса півсфери голови людини при температурі поверхні голови + 2 °С – на рис. 7.

Вплив охолодження поверхні голови на температуру головного мозку знаходимо з порівняння результатів, наведених на рис. 5 та рис. 7. З такого порівняння видно, що справді змінюється температура на шкірному покриві голови від + 34 °С до + 18 °С. Істотна зміна температури відбувається у зовнішніх частинах черепа. При цьому зміна температури на границі між черепом і головним мозком становить близько 10 °С. Зміни температури також відбуваються у приповерхневому шарі головного мозку товщиною 6 – 10 мм – до 10 °С. У більш глибоких шарах зміна температури незначна, а в центральній області головного мозку залишається практично незмінною.

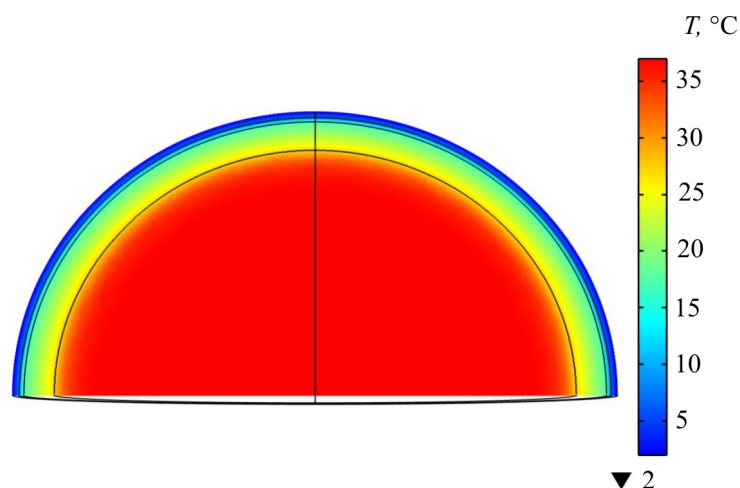


Рис. 6. Картина розподілу температури в перерізі голови людини при температурі поверхні голови + 2 °С.

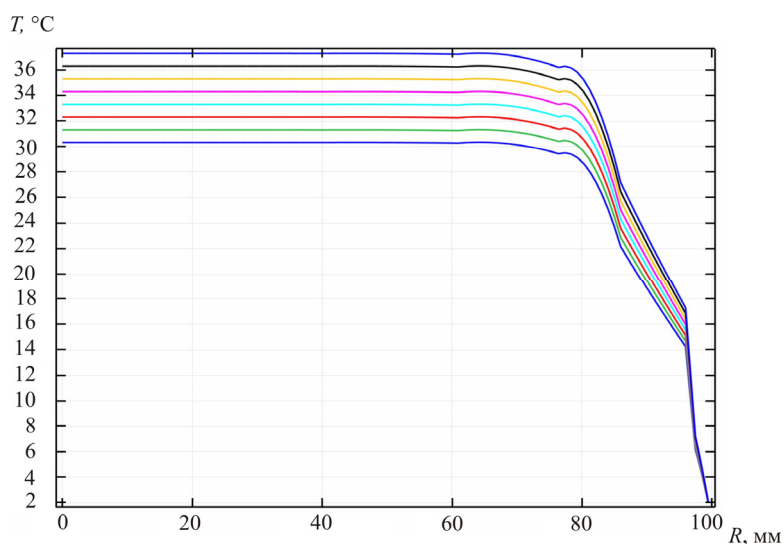


Рис. 7. Розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини при температурі поверхні голови + 2 °С, незмінному кровопостачанні головного мозку та зміні температури артеріальної крові від 30 °С до 37 °С з інтервалом 1 °С.

Такі незначні зміни температури головного мозку людини з охолодженням поверхні голови є наслідком низького коефіцієнта теплопровідності черепа ($k = 1.16$ Вт/м·К) і біологічної тканини мозку ($k = 0.49$ Вт/м·К), а також значного впливу температури артеріальної крові. Завдяки вирішальній дії цих факторів і більш прості моделі, наведені в роботах [7 – 10], дають результати, що збігаються, – температура головного мозку в центральній його частині мало залежить від охолодження поверхні голови людини. Такі результати знайшли експериментальне підтвердження при дослідженні охолодження поверхні голови людини у роботі [16]. Таким чином, використання охолодження поверхні голови може мати практичний інтерес лише у випадках, коли є необхідність понизити температуру приповерхневого шару головного мозку товщиною 6 – 10 мм.

У роботі [8] було висловлено припущення, що охолодження головного мозку людини трапляється при штучному зменшенні потоку артеріальної крові. Використане у нашій роботі комп'ютерне моделювання дає можливість перевірити це припущення. Картину розподілу температури за зменшенням потоку артеріальної крові удвічі наведено на рис. 8, а розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини за постійної температури артеріальної крові

+ 37 °С, зі зміною кровопостачання головного мозку від 20 % до 100 % від свого нормального значення через кожні 10 % для випадку конвективного теплообміну голови з повітрям за температури + 20 °С та випадку температури поверхні голови + 2 °С – на рис. 9 та рис. 10, відповідно.

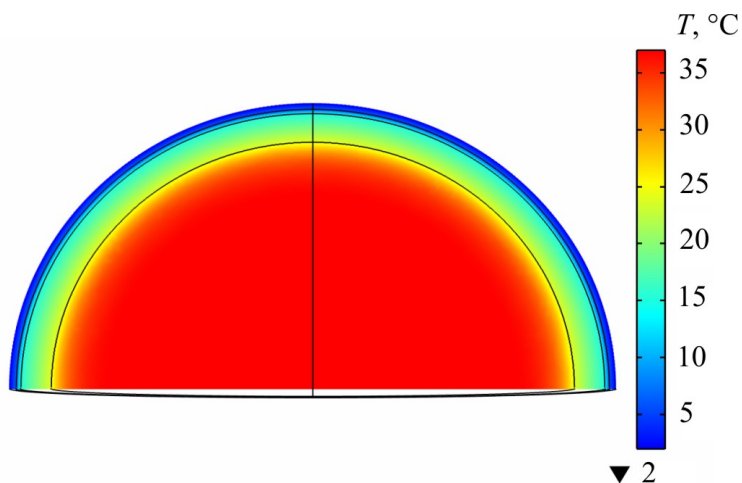


Рис. 8. Картина розподілу температури в перерізі голови людини при температурі поверхні голови + 2 °С та зменшенні потоку артеріальної крові удвічі.

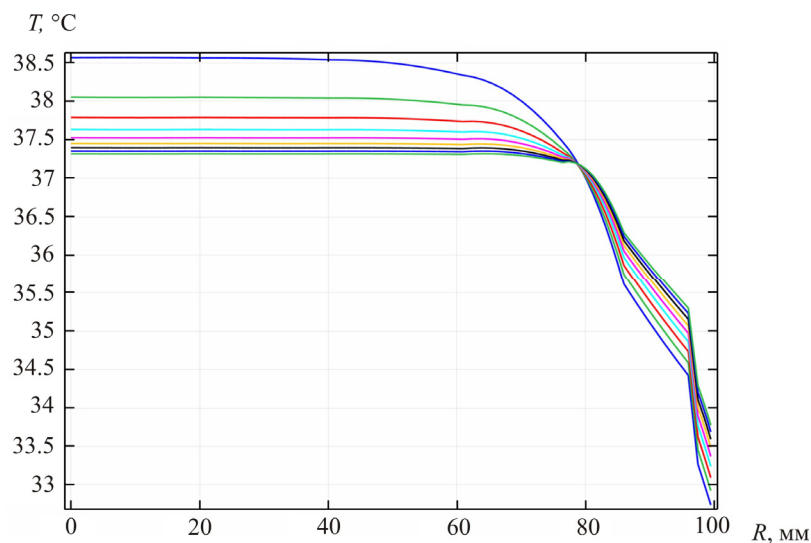


Рис. 9. Розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини при конвективному теплообміні голови з повітрям при температурі + 20 °С, незмінній температурі артеріальної крові + 37 °С та зміні кровопостачання мозку (перфузії крові) від 20, 30...100 % від свого нормального значення.

З наведених результатів випливає, парадоксальний на перший погляд, результат – зменшення потоку артеріальної крові не приводить до зниження температури головного мозку людини навіть при охолодженні поверхні голови до температури + 2 °С, а навпаки, в цьому випадку, появляється додатковий розігрів головного мозку. Насправді такі результати зрозумілі, оскільки густина тепловиділення головного мозку значно переважає питоме тепловиділення організму людини. У цьому випадку організм з циркулюючою кров'ю виконує роль своєрідного радіатора для відводу тепла від голови. Тому зменшення потоку артеріальної крові відповідно призводить до зменшення відводу тепла від голови і, отже, збільшення температури головного мозку людини. З рис. 9 – 10 видно, що при зменшенні кровопостачання головного мозку удвічі порівняно зі своїм нормальним значенням

температура ядра головного мозку підвищується на 0.4 °С, а за зменшенням у 5 разів – на 1.3 °С.

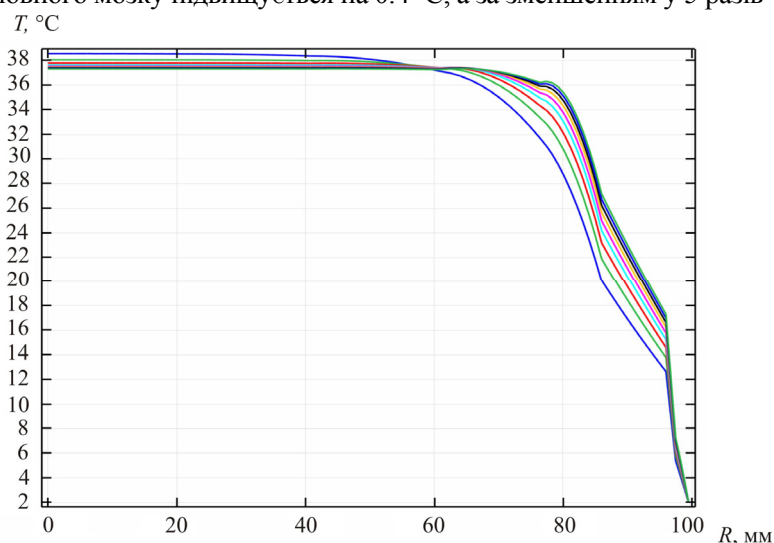


Рис. 10. Розподіли температури вздовж радіуса півсфери голови людини при температурі поверхні голови + 2°C, незмінній температурі артеріальної крові + 37 °С та зміні кровопостачання мозку (перфузії крові) від 20, 30.. 100 % від свого нормального значення.

З отриманих результатів моделювання випливає і зв'язок між температурою крові, що надходить, та температурою головного мозку людини. Встановлено, що за нормального кровопостачання температура центральної частини головного мозку вища за температуру артеріальної крові на 0.3 °С. Так при температурі артеріальної крові + 32 °С температура центральної частини мозку людини знижується до + 32.3 °С.

Таким чином, з результатів комп'ютерного моделювання випливає, що ефективним способом зменшення температури головного мозку людини є зниження температури артеріальної крові, що поступає в голову. Такі понижені температури можуть бути досягнуті шляхом зниження температури тіла людини внаслідок зростання його тепловіддачі в навколишнє середовище. Для цього слід використати теплообмінну ковдру, що може бути охолоджена термоелектричним рідинним термостатом. Оцінки показують, що холодопродуктивність такого термоелектричного пристрою знаходиться в межах ~ 20 ÷ 100 Вт.

Висновки

1. Комп'ютерним моделюванням визначено розподіли температур у голові за звичайних умов конвективного теплообміну (+ 20 °С). Отримано результати, які відповідають реальним значенням температури + 37 °С в центрі головного мозку і + 36.5 °С на його поверхні, що підтверджує коректність моделювання.
2. Охолодження поверхні голови до температури + 2 °С не призводить до пониження температури центральної частини головного мозку. Використання охолодження поверхні голови може мати практичний інтерес лише за необхідності понизити температуру приповерхневого шару головного мозку товщиною 6 – 10 мм до + 27 ÷ + 36 °С.
3. Встановлено, що зменшення кровопостачання головного мозку не призводить до зниження його температури навіть з охолодженням поверхні голови до мінімально допустимої температури + 2 °С. Навпаки, зменшення кровопостачання у 5 разів призводить до зростання температури головного мозку до + 38.6 °С.
4. Ефективне зниження температури головного мозку людини досягається зі зниженням

температури артеріальної крові, що надходить у голову. За температури крові, що надходить до голови, з інтервалом $+37\text{ }^{\circ}\text{C} \div +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура центральної частини головного мозку пропорційно змінюється від $+37.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що за нормального кровопостачання температура центральної частини головного мозку вища за температуру артеріальної крові на $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Література

1. Liu Jing. Cooling strategies and transport theories for brain hypothermia resuscitation. *Front. Energy Power Eng. China*. – 2007. – 1(1): P. 32 – 57.
2. Белоус А.М., Грищенко В.И. Кробиология. – К.: Наук. думка, 1994. – 431 с.
3. Гусев Е.И., Гречко В.Е., Бурд Г.С. Нервные болезни. – М. – 1988. – 640 с.
4. Дарбинян Т.М., Зиракадзе А.Н., Зольников С.М., Кинтрая П.Я., Комаров Б.А., Копшев С.Н., Купин Н.П., Чачава К.Д. Гипотермия искусственная. – М.: «Советская энциклопедия». – 1989.
5. Кобилянський Р.Р., Москалик І.А. Про перспективність використання термоелектрики для лікування голови людини охолодженням // *Термоелектрика*. – № 4. – 2015. – С. 85 – 94.
6. Кобилянський Р.Р., Москалик І.А. Про розподіл температури в голові людини при заданих теплових потоках на її поверхні // *Термоелектрика*. – № 6. – 2015. – С. 59 – 68.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
14. Легостаєв А.Д. Метод скінченних елементів // Конспект лекцій. – К.: КНУБА. – 2004. – С. 112.
15. Покровский В.М., Коротько Г.Ф. Физиология человека. – М.: Медицина, 2003. – 656 с.
16. 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).

Надійшла до редакції 17.03.2016.