

УДК 537.32



Кобылянский Р.Р.

Кобылянский Р.Р.<sup>1,2</sup>, Москалик И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН  
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет им.  
Ю. Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58012, Украина



Москалик И.А.

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГОЛОВЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ЗАДАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

---

*В работе приведен обзор и анализ существующих физических и компьютерных моделей охлаждения головы человека. С помощью объектно-ориентированного компьютерного моделирования существующих физических моделей определены распределения температуры в голове человека при заданных тепловых потоках на ее поверхности. Выявлены недостатки существующих моделей головы человека и предложены пути их совершенствования.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическое охлаждение, охлаждение головы человека, гипоксия головного мозга, компьютерное моделирование.

*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.

### Введение

Актуальной проблемой в медицине является кислородное голодание головного мозга (гипоксия), развивающиеся вследствие недостаточного поступления в нервные ткани кислорода. Происходит это по двум причинам: из-за недостатка кислорода в крови или из-за нарушений обеспечения головного мозга кровью. Гипоксия наблюдается при нарушениях мозгового кровообращения, шоковых состояниях, острой сердечно-сосудистой недостаточности, поперечной блокаде сердца, травмах головы и при асфиксии различного происхождения. Она может возникать как осложнение во время операций на сердце и магистральных сосудах, а также в послеоперационном периоде – при гипоксических отеках головного мозга, интоксикации и травмах центральной нервной системы.

Известно, что охлаждение головного мозга снижает его потребность в кислороде, повышает устойчивость к гипоксии и этим увеличивает допустимую продолжительность кислородного голодания. Так, например, охлаждение на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличивает время жизни мозга в несколько раз [1 – 4].

Для корректного проектирования приборов для гипотермии головного мозга необходимо знать распределения температуры в голове человека. Но имеющиеся в литературе физические модели и результаты компьютерного моделирования тепловых процессов головы человека противоречивы.

В работе [5] разработана двухмерная математическая модель для исследования охлаждения головного мозга младенцев и взрослых при погружении в холодную воду. Модель головы упрощена и представлена в форме полусферы, состоящей из головного мозга, черепа и кожи. Результаты моделирования показывают, что для младенцев температура крови в сонной артерии снижается всего на  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 5 мин при погружении в воду с температурой  $T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у взрослых в таком случае охлаждения не наблюдалось. В работе [6] построена трехмерная модель головы человека с учетом теплофизических свойств составляющих слоев головы человека. Проведено компьютерное моделирование охлаждения головы человека льдом. Установлено, что охлаждение головного мозга будет наблюдаться только в случае, если не учитывать перфузию крови. Исследованы охлаждения мозга с помощью охлаждающего шлема с температурой  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в данном случае имеет место незначительное охлаждение коры мозга, а температура ядра мозга остается неизменной ( $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Также в данной работе исследованы охлаждения циркулирующей крови через шею. Установлено, что охлаждение артериальной крови имеет место только в случае, когда скорость крови будет уменьшенной на порядок, что невозможно в реальных условиях. В работе [7] выполнено 3D-моделирование головы человека. При этом физическая модель состоит из четырех слоев: белое и серое вещество, кожа, череп. Установлено, что имеет место незначительное снижение температуры поверхности головного мозга, аналогично работе [6] в модели не учтена перфузия крови. В работе [8] проведено компьютерное моделирование охлаждения головного мозга у новорожденных и взрослых с помощью охлаждающего шлема с использованием Comsol Multiphysics. Результаты показывают, что у младенцев охлаждается только 5 – 6 мм приповерхностного слоя головного мозга, а понижение температуры ядра мозга не происходит даже после шести часов применения. Результаты моделирования головы взрослого человека: при минимальной температуре охлаждающей шлема  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура головного мозга снижается на  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В работе [9] было проведено экспериментальное исследование охлаждения головы и шеи человека на 5-ти добровольцах в возрасте от 31 – 48 лет. Охлаждение осуществлялось в течение 30 мин с помощью охлаждающего шлема и воротника, изготовленных из двойного слоя нейлона, с отверстиями для воздушного обдува во внутреннем слое, температура воздуха составляет

14.5 °С, расход 42.5 л/с. Контроль за температурой мозга проводился с помощью МРТ-сканера. Установлено, что температура мозга за 30 мин понизилась на 0.45 °С, а температура в пищеводе – на 0.16 °С. Полученные результаты свидетельствуют о том, что происходит незначительное охлаждение головного мозга человека и циркулирующей крови.

Поэтому *цель работы* выявление некорректности существующих моделей головы человека и определение распределения температуры в голове человека при заданных тепловых потоках на ее поверхности.

### Физическая модель головы человека

Физическая модель создана на основе существующих моделей головы человека и представляет собой полусферу, радиус которой  $R$  равен среднему радиусу головы взрослого человека (рис. 1). Эта сфера имеет приповерхностные слои 1–3, толщины которых равны средним толщинам скальпа  $h_1$ , подкожного слоя  $h_2$  и костей черепа  $h_3$  соответственно. Внутри полусферы находится мозг 4 радиусом  $R_4$ . Соответствующие слои 1–4 рассматриваются как объемные источники тепла, в каждом из которых равномерно по объему слоя генерируется тепло метаболизма  $q_{METi}$  ( $i = 1..4$ ), и происходит теплообмен с циркулирующей кровью, который задается коэффициентом перфузии крови  $\omega_{bi}$ . При этом, мозг является биологической тканью с высокой перфузией крови, а температура крови является постоянной  $T_b = 37$  °С. Температуры на границах соответствующих слоев составляют  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Теплофизические свойства этих биологических слоев приведены в табл. 1 [10].

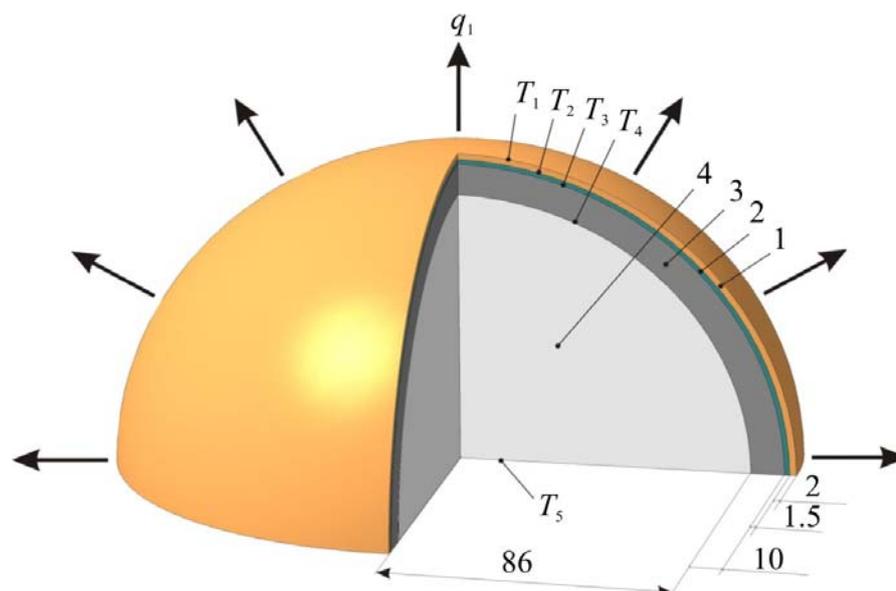


Рис. 1. Физическая модель головы человека.

Таблица 1

Теплофизические свойства биологических слоев головы человека [10]

Анатомическая структура головы человека	Теплопроводность (k) (Вт/м·К)	Плотность (ρ) (кг/м <sup>3</sup> )	Удельная теплоемкость (C <sub>p</sub> ) (Дж/кг·К)	Перфузия (W <sub>b</sub> ) (л·с <sup>-1</sup> м <sup>-3</sup> )	Метаболизм (q <sub>met</sub> ) (Вт/м <sup>3</sup> )
Скальп	0.47	1000	3680	1.5	363
Подкожный шар	0.16	850	2300	0.2	130
Череп	1.16	1500	1591	0.15	130
Мозг	0.49	1080	3850	8.5	10437
Кровь	0.5	1069	3650	–	–

Верхняя поверхность полусферы находится в состоянии теплообмена с окружающей средой (путем излучения и конвекции) или с охлаждающим шлемом (с заданным интегральным коэффициентом теплопередачи). Причем  $q_1$  – это плотность теплового потока, который рассеивается от головы человека в окружающую среду. Нижняя поверхность полусферы имеет температуру  $T_5 = 37$  °С.

### Математическое описание физической модели

Общее уравнение теплообмена в биологической ткани имеет следующий вид [1 – 10]:

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

где  $i = 1...4$  – соответствующие слои физической модели головы человека,

$\rho_i$  – плотность соответствующего слоя биологической ткани (кг/м<sup>3</sup>),

$C_i$  – удельная теплоемкость соответствующего слоя биологической ткани (Дж/кг·К),

$\rho_b$  – плотность крови (кг/м<sup>3</sup>),

$C_b$  – удельная теплоемкость крови (Дж/кг·К),

$\omega_{bi}$  – скорость перфузии крови соответствующего слоя биологической ткани (м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>),

$T_b$  – температура крови человека (К),

$q_{met_i}$  – количество тепла от метаболизма соответствующего слоя (Вт/м<sup>3</sup>),

$T$  – абсолютная температура (К),

$\kappa_i$  – коэффициент теплопроводности слоя биологической ткани (Вт/м·К),

$t$  – время (с).

Слагаемое в левой части уравнения (1) представляет собой скорость изменения

тепловой энергии, содержащейся в единице объема биологической ткани. Три слагаемых в правой части этого уравнения представляют собой соответственно скорость изменения тепловой энергии за счет теплопроводности, перфузии крови и тепла метаболизма.

Уравнения теплообмена в биологической ткани (1) необходимо решать со следующими граничными условиями (2) – (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = q_{rad} + q_{conv} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) + h_{conv} \cdot (T - T_0) \\ \text{або} \\ q_1 = h_{fluid} \cdot (T - T_{fluid}) \end{array} \right. , \quad (2)$$

$$T_5 = 310 \text{ K} , \quad (3)$$

где  $q_1$  – плотность теплового потока, рассеиваемая с головы человека на окружающую среду,  $q_{rad}$  – плотность теплового потока путем излучения,  $q_{conv}$  – плотность теплового потока путем конвекции,  $\varepsilon$  – степень черноты,  $\sigma$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $h_{conv}$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $h_{fluid}$  – коэффициент конвективного теплообмена с жидкостью,  $T_{fluid}$  – температура жидкости.

## Результаты компьютерного моделирования

С целью определения теплового воздействия на голову человека была создана трехмерная компьютерная модель головы, поверхность которой контактирует с охлаждающим шлемом. Для построения компьютерной модели использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [11], что позволяет проводить моделирование теплофизических процессов в биологической ткани тела человека с учетом кровообращения и метаболизма. Расчет распределений температур и плотности тепловых потоков внутри головы человека осуществлялся методом конечных элементов (рис. 2) [12].

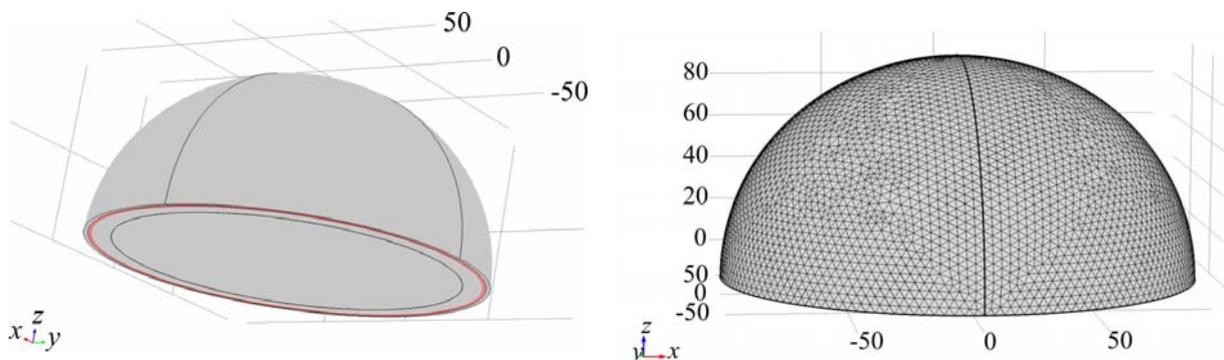


Рис. 2. Сетка метода конечных элементов в компьютерной программе COMSOL MULTIPHYSICS.

С помощью объектно-ориентированного компьютерного моделирования были определены распределения температуры внутри головы человека. В качестве примера, на рис. 3 приведено распределение температуры в осевом сечении головы человека при общем тепловом потоке с ее поверхности  $Q = 10$  Вт.

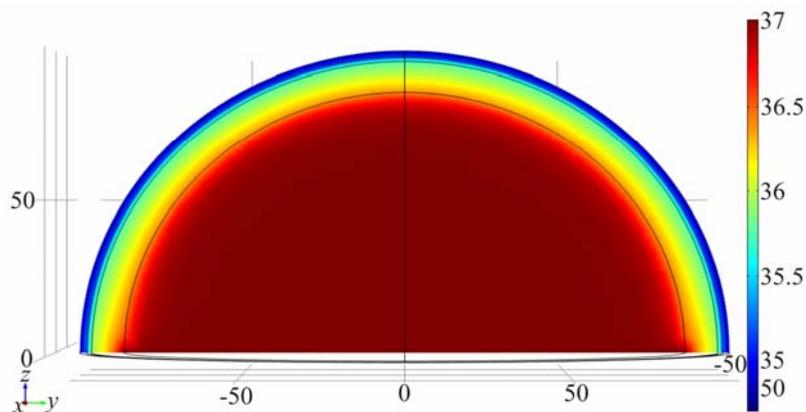


Рис. 3. Распределение температуры в осевом сечении головы человека при общем тепловом потоке с ее поверхности  $Q = 10$  Вт.

Диапазон значений тепловых потоков с поверхности головы человека составляет  $Q = 10 \div 100$  Вт, что ограничено минимально допустимой температурой поверхности головы на уровне  $+2$  °С. Для удобства сравнения указанных тепловых режимов на рис. 4 приведены распределения температуры вдоль радиуса полусферы головы при соответствующих значениях тепловых потоков с поверхности головы человека.

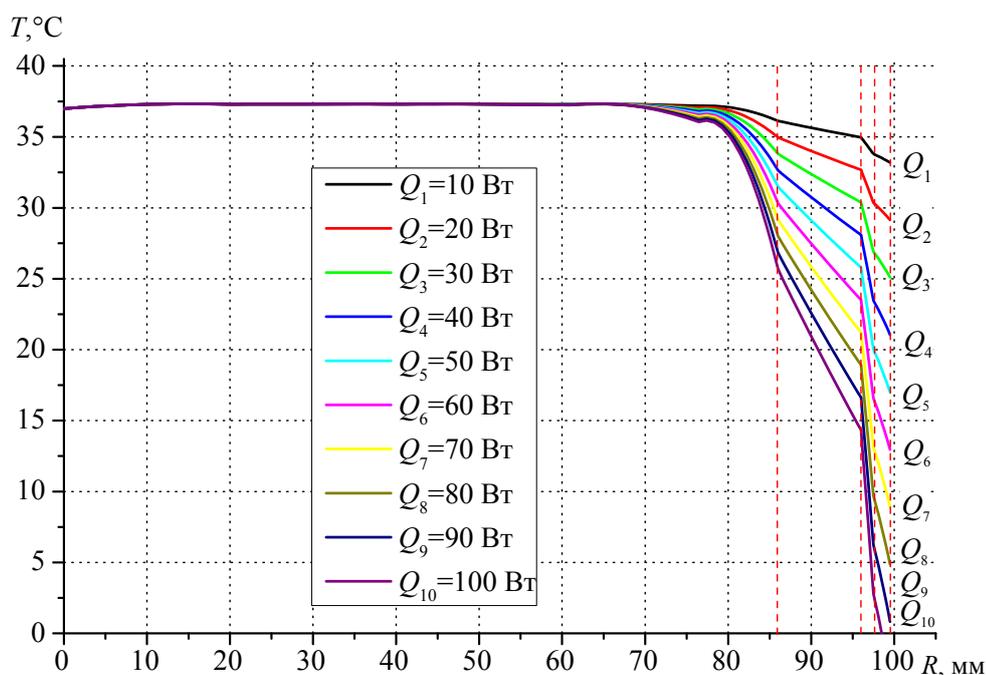


Рис. 4. Влияние мощности охлаждения  $Q$  на распределение температуры  $T$  вдоль радиуса  $R$  полусферы головы человека.

С рис. 4 видно, что при условии соблюдения минимально допустимой температуры наружных покровов головы (+ 2 °С) до требуемой температуры + 32 °С возможно охладить только 3 мм приповерхностного слоя головного мозга человека. При этом температура ядра головного мозга остается неизменной (+ 37 °С). В таком случае от головы отводится 90 Вт тепла, согласно литературным данным [13] составляет 90 % теплопродукции всего организма человека. Но на самом деле должно иметь место охлаждение головного мозга, поскольку теплоотведение на уровне 90 Вт в 6 раз превышает общую теплопродукцию головы человека. В результате кровь, прошедшая через голову должна охлаждаться, а проходя через тело человека, охлаждать весь организм и вернувшись снова к голове температура крови должна быть несколько ниже температуры + 37 °С, которая в существующих моделях задается константой. Очевидно, что именно это обстоятельство и является основным недостатком существующих физических и компьютерных моделей головы человека.

Итак, существующие подходы к созданию физических моделей и компьютерного моделирования головы человека, в которых температура артериальной крови является неизменной  $T_{\text{крови}} = + 37 \text{ }^\circ\text{C}$ , нуждаются в совершенствовании путем учета постепенного охлаждения циркулирующей крови и теплоемкости всего организма человека.

## **Выводы**

1. С помощью объектно-ориентированного компьютерного моделирования на основе существующих физических моделей определены распределения температуры в голове человека при заданных тепловых потоках на ее поверхности. Установлено, что при условии соблюдения минимально допустимой температуры наружных покровов головы (+ 2 °С) до требуемой температуры + 32 °С возможно охладить только 3 мм приповерхностного слоя головного мозга человека, а температура ядра головного мозга при этом остается неизменной на уровне + 37 °С.
2. Установлено, что существующие подходы к созданию физических моделей и компьютерного моделирования головы человека, в которых температура артериальной крови является неизменной  $T_{\text{крови}} = + 37 \text{ }^\circ\text{C}$ , нуждаются в совершенствовании путем учета постепенного охлаждения циркулирующей крови и теплоемкости всего организма человека.

## **Список литературы**

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. Криобиология. / А.М. Белоус, В.И. Грищенко // – Киев: Наук. думка, 1994. – 431 с.

3. Гипотермия искусственная. / Т.М. Дарбинян, А.Н. Зиракадзе, С.М. Зольников [и. др.] // – Москва: «Советская энциклопедия». – 1989 г.
4. Кобылянский Р.Р. О перспективности использования термоэлектричества для лечения головы человека охлаждением / Р.Р. Кобылянский, И.А. Москалик // Термоэлектричество. – № 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. Легостаев А.Д. Метод скінченних елементів / А.Д. Легостаев // 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.

Поступила в редакцию 28.10.2015.