

**Л.І. Анатичук<sup>1</sup>, Г.В. Книшов<sup>2</sup>, О.А. Крикунов<sup>2</sup>,  
Р.Р. Кобилянський<sup>1</sup>, В.А. Тюменцев<sup>1</sup>, І.А. Москалик<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Інститут термоелектрики НАН та МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна, тел. +38 (03722) 4-44-22, факс +38 (03722) 4-19-17

<sup>2</sup> Національний Інститут серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України,  
вул. М. Амосова, 6, Київ, 03110, Україна, тел. +38 (044) 275-43-22

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД «АЛТЕК-7012» ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ



*Наведено результати комп'ютерного моделювання теплофізичних процесів голови людини при заданих теплових потоках на її поверхні. Виявлено недоліки існуючих комп'ютерних моделей голови людини та запропоновано шляхи їх вдосконалення. Розроблено конструкцію та виготовлено експериментальний зразок термоелектричного приладу «АЛТЕК-7012» для охолодження голови людини. Прилад перспективний для гіпотермії головного мозку людини.*

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

Однією з актуальних проблем у медичній практиці є гіпоксія головного мозку [1–8]. Вона спостерігається при порушеннях мозкового кровообігу, шоківих станах, гострій серцево-судинній недостатності, повній поперечній блокаді серця, травмах голови, отруєнні окисом вуглецю та при асфіксії різного походження. Гіпоксія головного мозку може також виникати як ускладнення при операціях на серці та магістральних судинах, а також у ранньому післяопераційному періоді. При цьому розвиваються різноманітні неврологічні синдроми та психічні розлади.

При тривалості кисневого голодування більше 3–4 хв відновлення діяльності мозку стає неможливим. Однак відомо, що локальна гіпотермія мозку знижує його потребу в кисні, підвищує стійкість до гіпоксії, а також зменшує або навіть усуває небезпеку тимчасової ішемії

мозку, чим збільшує допустиму тривалість кисневого голодування [9–10]. Так, наприклад, охолодження лише на 5 °С збільшує час життя мозку у кілька разів. Гіпотермія рекомендована у випадках різного роду травм голови, оперативних втручань на серці, а також у післяопераційний період — при гіпоксичних набряках головного мозку, інтоксикації і травмах центральної нервової системи.

Як правило, існуюча апаратура для охолодження голови людини — це габаритні стаціонарні прилади на основі компресорних холодильних агрегатів [11–17]. Хоча останнім часом з'являються розробки приладів на основі термоелектричного охолодження, які попри очевидні переваги не досягли широкого практичного використання [18–20].

Тому метою даної роботи є визначення перспективності використання термоелектрики для охолодження голови та розробка термоелектричного приладу для гіпотермії мозку людини.

### ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ

Фізична модель голови людини створена на основі існуючих моделей та представляє 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  $\omega_{bi}$ . При цьому мозок є біологічною тканиною з високою перфузією крові, а температура крові є незмінною  $T_b = 37^\circ\text{C}$ . Температури на границях відповідних шарів складають  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Теплофізичні властивості цих біологічних шарів наведені в табл. 1 [21].

Верхня поверхня напівсфери знаходиться в стані теплообміну з оточуючим середовищем (шляхом випромінювання та конвекції) або з охолоджуючим шоломом (із заданим інтегральним коефіцієнтом теплопередачі). При цьому  $q_1$  – це густина теплового потоку, що розсіюється з голови людини в оточуюче середовище. Нижня поверхня напівсфери має температуру  $T_5 = 37^\circ\text{C}$ .

### МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ

Загальне рівняння теплообміну в біологічній тканині має такий вигляд [21–26]:

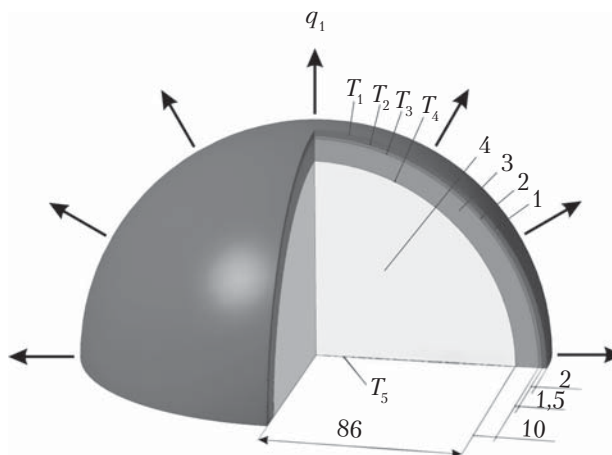


Рис. 1. Фізична модель голови людини

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

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

Доданок у лівій частині рівняння (1) представляє собою швидкість зміни теплової енергії, що міститься в одиниці об'єму біологічної

Таблиця 1

Теплофізичні властивості біологічних шарів голови людини [21]

Анатомічна структура голови людини	Теплопровідність $k$ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	Густина $\rho$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Питома теплоємність $C_p$ , $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	Перфузія $W_b$ , $\text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$	Метаболізм $q_{met}$ , $\text{Вт}/\text{м}^3$
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	—	—

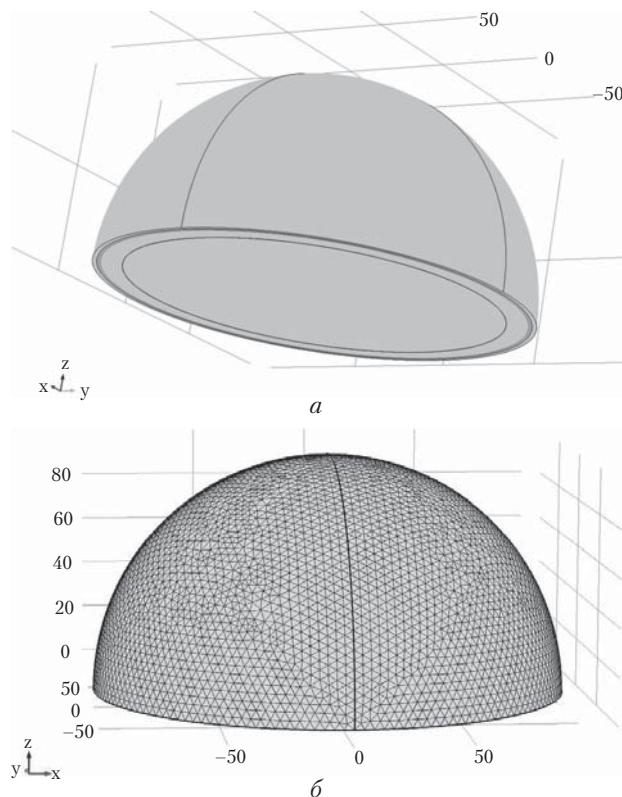


Рис. 2. Сітка методу скінченних елементів у комп'ютерній програмі COMSOL MULTIPHYSICS

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):

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

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

де  $q_1$  — густина теплового потоку, що розсіюється з голови людини в оточуюче середовище;  $q_{rad}$  — густина теплового потоку шляхом випромінювання;  $q_{conv}$  — густина теплового потоку шляхом конвекції;  $\varepsilon$  — ступінь чорноти;

$\sigma$  — стала Больцмана;  $T$  — абсолютна температура;  $T_0$  — температура оточуючого середовища;  $h_{conv}$  — коефіцієнт конвективного теплообміну;  $h_{fluid}$  — коефіцієнт конвективного теплообміну з рідиною;  $T_{fluid}$  — температура рідини.

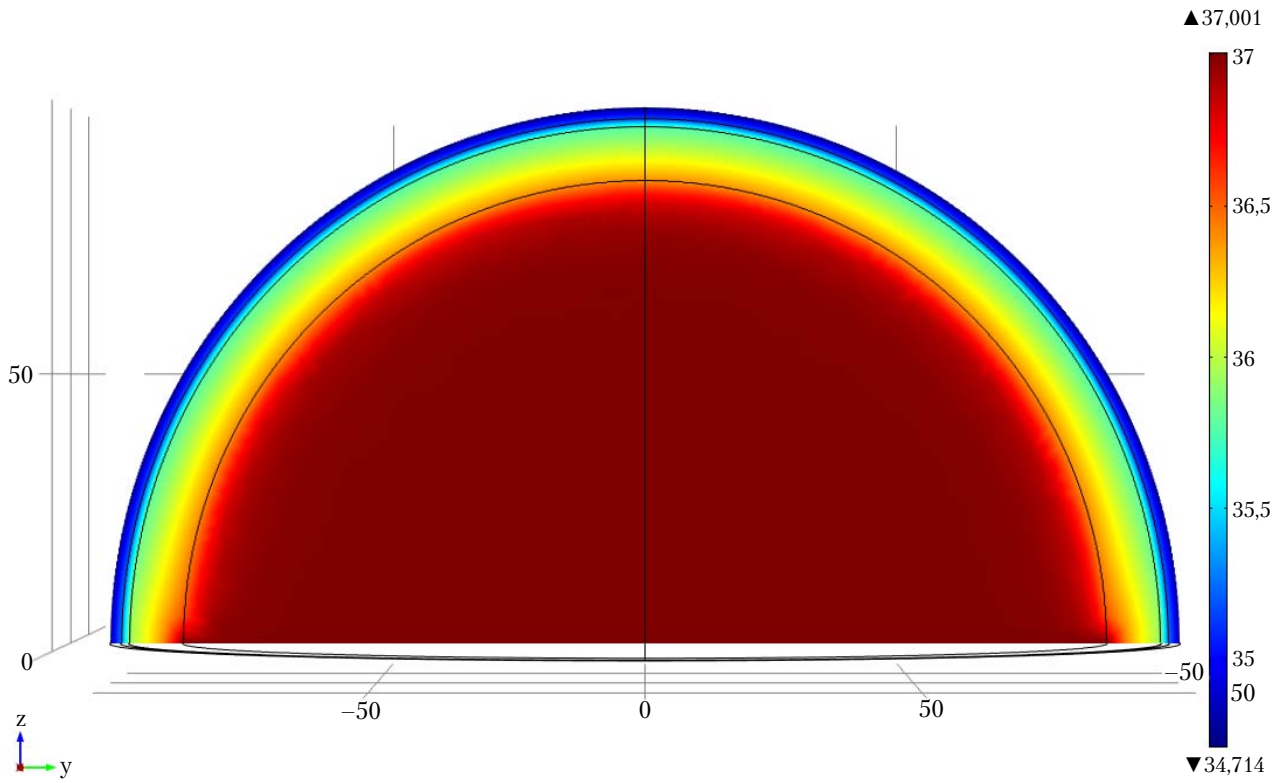
## РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

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 [27], що дає можливість проводити моделювання теплофізичних процесів у біологічній тканині тіла людини з врахуванням кровообігу та метаболізму. Розрахунок розподілів температур та густини теплових потоків всередині голови людини здійснювався методом скінченних елементів (рис. 2).

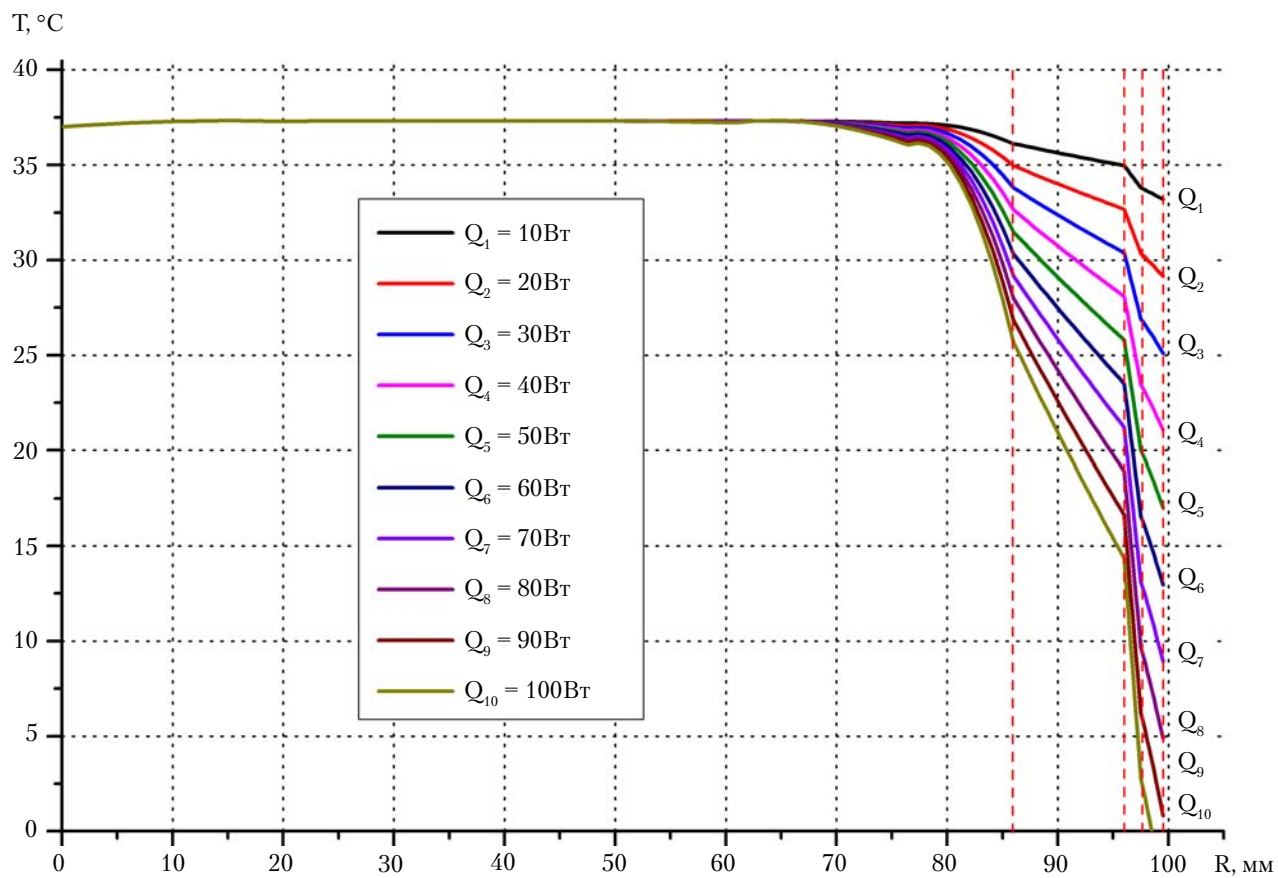
За допомогою об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання було визначено розподіл температури всередині голови людини. Як приклад на рис. 3 (див. кольорову вклейку) наведено розподіл температури в осьовому перерізі голови людини при загальному тепловому потоці з її поверхні  $Q = 10$  Вт.

Діапазон значень теплових потоків з поверхні голови людини складає  $Q = 10 \div 100$  Вт, що обмежено мінімально допустимою температурою поверхні голови на рівні  $+2$  °С. Для зручності порівняння вказаних теплових режимів на рис. 4 (див. кольорову вклейку) наведено розподіл температури вздовж радіуса півсфери голови при відповідних значеннях теплових потоків з поверхні голови людини.

З рис. 4 видно, що за умови дотримання мінімально допустимої температури зовнішніх покривів голови ( $+2$  °С) до необхідної температури  $+32$  °С можна 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



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



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

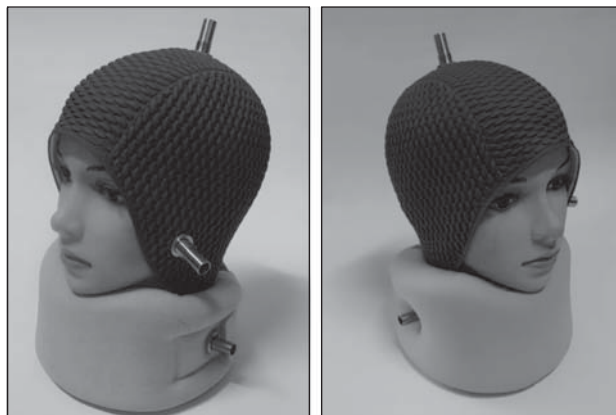


Рис. 5. Охолоджуючі шолом для голови та манжет для шиї

Рис. 6. Термоелектричний блок охолодження ►



Рис. 7. Термоелектричний прилад для охолодження голови людини «АЛТЕК-7012»

Вт тепла, що згідно з [28] становить 90 % теплопродукції всього організму людини. Але насправді повинно мати місце охолодження головного мозку, оскільки тепловідведення на рівні 90 Вт у 6 разів перевищує загальну теплопродукцію голови людини. Внаслідок цього кров, що пройшла через голову, повинна охолоджуватися, а проходячи через тіло людини — охолоджувати весь організм людини.

Після повернення до голови кров повинна мати дещо нижчу температуру, ніж  $+37^{\circ}\text{C}$ , яка в існуючих моделях задається константою. Очевидно, що саме ця обставина і є основним недоліком існуючих фізичних та комп'ютерних моделей голови людини.

Отже, існуючі підходи щодо створення фізичних моделей та комп'ютерного моделювання голови людини, в яких температура артері-

альної крові є незмінною  $T_{\text{крові}} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ , потребують вдосконалення шляхом врахування поступового охолодження циркулюючої крові та теплоємності всього організму людини.

У роботах [29–30] було встановлено, що для підвищення ефективності охолодження головного мозку людини термоелектричний прилад повинен містити і охолоджуючий шолом для голови, і охолоджуючий манжет для шиї. Такі прилади потенційно можуть бути перспективними у медицині в екстрених ситуаціях (при інсультах, інфарктах, порушеннях мозкового кровообігу, гострій серцево-судинній недостатності, травмах голови та гіпоксії головного мозку людини).

### ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ ТА ЙОГО ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Термоелектричний прилад для охолодження голови людини «АЛТЕК-7012» (рис. 5–7) було розроблено в Інституті термоелектрики НАН та МОН України в рамках договору про співробітництво з Національним Інститутом

Таблиця 2

#### Технічні характеристики приладу

Технічні характеристики	Значення
Діапазон робочих температур	$(-5 \div +40)\text{ }^{\circ}\text{C}$
Стабільність підтримання температури	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Дискретність відліку вимірюваної і заданої температури	$\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$
Похибка вимірювання температури	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Холодопродуктивність приладу	250 Вт
Напруга живлення: мережа змінного струму 50 Гц мережа постійного струму	$220 \pm 10\text{ В}$ $12-14\text{ В}$
Загальна споживана потужність	450 Вт
Габарити термоелектричного блоку охолодження	$(305 \times 250 \times 360)\text{ мм}$
Вага термоелектричного блоку охолодження	6 кг

серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України.

Прилад призначений для охолодження голови людини при гіпоксії головного мозку, порушеннях мозкового кровообігу, шоківих станах, гострій серцево-судинній недостатності, поперечній блокаді серця, а також при операціях на серці та магістральних судинах, у ранньому післяопераційному періоді та в екстрених ситуаціях (гіпоксія, інфаркт, інсульт, травми голови тощо). Технічні характеристики приладу наведено в табл. 2.

Прилад складається з термоелектричного блоку охолодження (рис. 6), охолоджуючої шапки для голови (рис. 5), охолоджуючого манжету для шиї (рис. 5), медичної каталки (рис. 7) та датчика температури головного мозку людини. В свою чергу, блок охолодження містить розроблений в Інституті термоелектрики вузол термоелектричного охолодження, блок керування на основі 4-канального мікропроцесорного регулятора температури, модульне джерело живлення та циркуляційний насос.

Вузол термоелектричного охолодження містить 20 термоелектричних модулів Алтек-127–1,8×1,8×2,5, розміщених між рідинними теплообмінниками і колекторами, які утворюють два окремих рідинних контури: в «холодному» контурі під дією циркуляційного насоса циркулює теплоносій, що відводить тепло від тіла людини, а «гарячий» контур під'єднаний до системи центрального водопостачання.

За допомогою шлангів до термоелектричного блоку охолодження послідовно під'єднані охолоджуюча шапка для голови та охолоджуючий манжет для шиї. Запас холодопродуктивності блоку охолодження дозволяє під'єднання за необхідності охолоджуючої ковдри для тіла людини. Для зручності транспортування пацієнта разом з приладом для охолодження голови в комплект приладу додана медична каталка. Зовнішній вигляд термоелектричного приладу для охолодження голови людини в повній комплектації приведений на рис. 7.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що існуючі підходи щодо створення фізичних моделей та комп'ютерного моделювання голови людини, в яких температура артеріальної крові є незмінною  $T_{\text{крові}} = 37^\circ\text{C}$ , потребують вдосконалення шляхом врахування поступового охолодження циркулюючої крові та теплоємності всього організму людини.

2. Встановлено, що для підвищення ефективності охолодження головного мозку людини термоелектричний прилад повинен містити охолоджуючий шолом для голови, охолоджуючий манжет для шиї і за необхідності — охолоджуючу ковдру для тіла. Такий прилад перспективний при гіпоксії головного мозку, порушеннях мозкового кровообігу, шоківих станах, гострій серцево-судинній недостатності, при операціях на серці та магістральних судинах та в екстрених ситуаціях (інфаркт, інсульт, травма голови тощо).

## ЛІТЕРАТУРА

- Неговский В.А. Оживление организма и искусственная гипотермия. — М.: Медгиз, 1960. — 302 с.
- Буков В.А. Холод и организм. Вопросы общего глубокого охлаждения животных и человека. — Л.: Изд-во Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова, 1964. — 216 с.
- Угрюмов В.М. Тяжелая закрытая травма черепа и головного мозга. — М.: Медицина, 1974. — С. — 328 с.
- Гипотермия искусственная // Большая Медицинская Энциклопедия: у 29-ти т. / глав. ред. Петровский Б.В. — 3-е изд. — М: Советская энциклопедия, 1989. — Т.5. — С. 568.
- Иващенко Е.И. Изменение УПП головного мозга у больных геморрагическим ОНМК при воздействии локальной краниocereбральной гипотермии в первые часы инсульта: Мат. лаб. возрастной физиологии мозга ГУ НИИ мозга РАМН. — М., 1995. — С. 23.
- The hypothermia after cardiac arrest study Group. Mild therapeutic hypothermia to improve the neurologic outcome after cardiac arrest // NEJM. — 2002. — Vol. 364. — № 8. — P. 549–556.
- Prandini M.N., Neves Filho A., Lapa A.J., Stavale J.N. Mild hypothermia reduces polymorphonuclear leukocytes infiltration in induced brain inflammation // Arq. Neuropsiquiatr. — 2005. — Vol. 63. — № 3B. — P. 779–784.
- Усенко Л.В., Царев А.В. Искусственная гипотермия в современной реаниматологии // Общ. реаниматол. — 2009. — Т. V., № 1. — С. 21–23.
- Белоус А.М., Грищенко В.И. Кробиология. — К.: Наук. думка, 1994. — 431 с.
- Шевелёв О.А., Бутров А.В. Технологии лечебной гипотермии в интенсивной терапии и реаниматологии // Неотложная медицина. — 2010. — № 3. — С. 45-49.
- Harris B., Andrews P.J.D., Murray G.D., Forbes J., Moseley O. Systematic review of head cooling in adults after traumatic brain injury and stroke // Health Technology Assessment. — 2012. — Vol. 16, № 45. — 175 p.
- Смирнов О. Новый способ охлаждения (или нагрева) тела и устройство для черепно-мозговой гипотермии // Биомед. — 1968. — № 2. — P. 343–347.
- Смирнов О. Способ повышения эффективности воздушной гипотермии и устройство для охлаждения мозга // Биомед. — 1969. — №3. — P. 257–260.
- Cincinnati Sub-Zero. [Электронный ресурс]: Web-сайт. — Режим доступа: <http://www.cszmedical.com/>
- Harris O.A., Muh C.R., Surles M.C., Pan Y., Rozycki G., Macleod J. and Easley K. Discrete cerebral hypothermia in the management of traumatic brain injury: a randomized controlled trial // J. Neurosurg. — 2009. — Vol. 110. — P. 1256–1264.
- Patent US 20100168825 A1. Device for cooling a body part / Ingrid Barbknecht. — 2010.
- Центрмед. [Электронный ресурс]: Web-сайт. — Режим доступа: <http://www.cmed-plus.ru/atg.html>.
- Cool-Cap System Gets FDA Nod. Medgadget.com. Retrieved 2009-10-13.
- Cool-Cap System — Children's Hospital — Scott & White — Central Texas. Sw.org. Retrieved 2009-10-13.
- Ахиска Р., Гулер И., Явуз А.Х., Топрак А. Система контролю термоелектричного охолоджувача мозку з нечітким алгоритмом // Термоелектрика. — 2008. — № 2. — С. 64–70.
- 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. — 87(5). — P. 1957–1972.
- Xiaojiang Xu, Tikuisis P. and Giesbrecht G. A mathematical model for human brain cooling during cold-water near-drowning // J. Appl. Physiol. — 1999. — 86. — P. 265–272.
- Brian H.D., Eberhar R.C., Dulikravich G.S., Radons S.W. Finite element simulation of cooling of realistic 3-d human head and neck // J. of Biomechanical Engineering. — 2004. — № 125 — P. 832-840.
- Matthew A., Konstas A-A., Choi J.H., Laine A.F., Pile-Spellman J. Brain cooling maintenance with cooling cap following induction with intracarotid cold saline



- infusion: A quantitative model // J. of Theoretical Biology. — 2008. — № 253 — P. 333-344.
25. Christiansen M., Rakhilin N., Tarakanova A., Wong K. Modeling brain cooling treatment approved for hypoxic-ischemic encephalopathy in infants to treat stroke and cardiac arrest in adult patients // Cornell University. — 2010. — 24 p.
  26. 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 J. of Anaesthesia. — 2008. — 100 (3). — P. 365–72.
  27. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. — 2010. — 804 p.
  28. 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. — P. 713–117.
  29. Кобилляньський Р.Р., Москалик І.А. Про перспективність використання термоелектрики для лікування голови людини охолодженням // Термоелектрика. — 2015. — № 4. — С. 85–94.
  30. Кобилляньський Р.Р., Москалик І.А. Про розподіл температури в голові людини при заданих теплових потоках на її поверхні // Термоелектрика. — 2015. — № 5. — С 89-95.
  8. Usenko L.V., Tsarev A.V. Artificial Hypothermia in Modern Resuscitation Science. *Obschaya Reanimatologiya*. 2009. V(1): 21–23 [in Russian].
  9. Belous A.M., Grischenko V.I. *Cryobiology*. Kyiv: Naukova Dumka, 1994 [in Russian].
  10. Shevelov O.A., Butrov A.V. Curative Hypothermia Technologies in the Intensive Therapy and Resuscitation. *Emergency Medicine*. 2010. No. 3: 45-49 [in Russian].
  11. Harris B., Andrews P.J.D., Murray G.D., Forbes J., Moseley O. Systematic review of head cooling in adults after traumatic brain injury and stroke. *Health Technology Assessment*. 2012. 16(45). 175 p.
  12. Smirnov O. New Method of Body Cooling (or Heating) and Craniocerebral Hypothermia Device. *Biomedical J.* 1968. No. 2: 343-347 [in Russian].
  13. Smirnov O. Method for Improving the Efficiency of Air Hypothermia and Brain Cooling Device. *Biomedical J.*, 1969. No. 3: 257-260 [in Russian].
  14. *Cincinnati Sub-Zero*. [Electronic Resource]: Web-сайт. Mode of access: <http://www.cszmedical.com/>. Title from the screen.
  15. Harris O.A., Muh C.R., Surles M.C., Pan Y., Rozycki G., Macleod J. and Easley K. Discrete cerebral hypothermia in the management of traumatic brain injury: a randomized controlled trial. *J Neurosurg*. 2009. No. 110: 1256–1264.
  16. *Patent US 20100168825 A1*. Device for cooling a body part. Ingrid Barbknecht. 2010.
  17. *Centermed*. [Electronic Resource]: Web-сайт. Mode of access : <http://www.cmed-plus.ru/atg.html>. Title from the screen.
  18. *Cool-Cap System Gets FDA Nod*. Medgadget.com. Retrieved 2009-10-13.
  19. *Cool-Cap System – Children's Hospital – Scott & White – Central Texas*. Sw.org. Retrieved, 2009. pp. 10-13.
  20. Ahiska R., Güler İ., Yavuz A. H., Toprak A. Neuro-fuzzy inference system for control of a thermoelectric brain cooler. *Journal of Thermoelectricity*. 2008. No. 2: 64–70 [in Ukrainian].
  21. 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.
  22. Xiaojiang Xu, Peter Tikuisis and Gordon Giesbrecht. A mathematical model for human brain cooling during cold-water near-drowning. *J Appl Physiol*. 1999. No. 86: 265–272.
  23. 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. No. 125: 832–840.
  24. Matthew A. Neimark, Angelos-Aristeidis Konstas, Jae H. Choi, Andrew F. Laine, John Pile-Spellman. Brain cooling maintenance with cooling cap following induction with

## REFERENCES

1. Negovsky V.A. *Resuscitation and artificial hypothermia*. Moscow: Medgiz, 1960 [in Russian].
2. Bukov V.A. *Cold and Organism. Issues of Deep Cooling of Animals and Humans*. Leningrad: S.M. Kirov Military Medical Academy, 1964 [in Russian].
3. Ugrumova V.M. *Heavy closed trauma of the skull and brain (diagnosis and treatment)*. Moscow: Meditsina Publ., 1974 [in Russian].
4. *Artificial Hypothermia*. Great Medical Encyclopedia in 29 volumes, Ed.by B.V. Petrovsky, 3-d ed. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1989, Vol. 5, P. 568.
5. Ivaschenko E.I. *Change in Constant Potential Level for Patients Suffering from Brain Hemorrhage on Exposure to Local Craniocerebral Hypothermia During the First Hours of Stroke*: Proc. of Age-Specific Physiology Laboratory of the Brain Research Institute of Russian Academy of Medical Sciences. Moscow, 1995. 23 p. [in Russian].
6. *The hypothermia after cardiac arrest study Group*. Mild therapeutic hypothermia to improve the neurologic outcome after cardiac arrest. *NEJM*. 2002. 364(8): 549–556.
7. Prandini M.N., Neves Filho A., Lapa A.J., Stavale J.N. Mild hypothermia reduces polymorphonuclear leukocytes infiltration in induced brain inflammation. *Arq. Neuropsiquiatr*. 2005. 63(3B): 779–784.

- intracarotid cold saline infusion: A quantitative model. *Journal of Theoretical Biology*. 2008. No. 253: 333–344.
25. 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. 24 p.
26. 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*. 2008. 100(3): 365–72.
27. COMSOL Multiphysics User's Guide. *COMSOLAB*, 2010. 804 p.
28. 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. pp.713–117.
29. Kobylianskyi R.R., Moskalik I.A. The prospects of using thermoelectricity for human head cryotherapy. *Journal of Thermoelectricity*. 2015. No. 4: 85–94 [in Ukrainian].
30. Kobylianskyi R.R., Moskalik I.A. On temperature distribution in human head at given thermal fluxes on its surface. *Journal of Thermoelectricity*. 2015. No. 5: 89–95 [in Ukrainian].

L.I. Anatyshuk<sup>1</sup>, G.V. Knyshov<sup>2</sup>, O.A. Krykunov<sup>2</sup>,  
R.R. Kobylianskyi<sup>1</sup>, V.A. Tyumentsev<sup>1</sup>, I.A. Moskalik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky Str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,  
Tel. +38 (03722) 4-44-22, Fax +38 (03722) 4-19-17,

<sup>2</sup>M.M.Amosov National Institute of Cardiovascular  
Surgery of the NAMS of Ukraine,  
6, Amosov Str., Kyiv, 03110, Ukraine,  
Tel. +38 (044) 275-43-22.

#### THERMOELECTRIC DEVICE «ALTEC-7012» FOR HUMAN HEAD COOLING

The paper presents the results of computer simulation of thermophysical processes in human head under given heat

fluxes on its surface. The disadvantages of the existing physical models of human head are revealed and the ways for their improvement are proposed. With regard to computer simulation results, an experimental sample of thermoelectric device for human head cooling «ALTEC-7012» which is promising for human brain hypothermia has been designed and manufactured.

*Keywords:* computer simulation, thermoelectric cooling, human head cooling, brain hypoxia.

Л.И. Анатъчук<sup>1</sup>, Г.В. Кнышов<sup>2</sup>, А.А. Крикунов<sup>2</sup>,  
Р.Р. Кобылянский<sup>1</sup>, В.А. Тюменцев<sup>1</sup>, И.А. Москалик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества  
НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,  
тел. +38 (03722) 4-44-22, факс +38 (03722) 4-19-17,

<sup>2</sup>Национальный институт  
сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М. Амосова  
НАМН Украины,  
ул. Н. Амосова, 6, Киев, 03110, Украина,  
тел. +38 (044) 275-43-22.

#### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР «АЛТЕК-7012» ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА

Приведены результаты компьютерного моделирования теплофизических процессов головы человека при заданных тепловых потоках на ее поверхности. Выявлены недостатки существующих компьютерных моделей головы человека и предложены пути их совершенствования. Изготовлен экспериментальный образец термоэлектрического устройства «АЛТЕК-7012» для охлаждения головы человека. Прибор перспективный для гипотермии головного мозга человека.

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

Стаття надійшла до редакції 06.06.16