
DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.032>

УДК: 004.942:001.57+004.03+519.85+612.5 CC BY-NC

ЄРМАКОВА І.Й., д-р біол. наук, проф.,
провід. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-9417-1120, e-mail: irena.yermakova@gmail.com

НИКОЛАЄНКО А.Ю., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-2402-2947, e-mail: n_nastja@ukr.net

БОГАТЬОНКОВА А.І., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0002-7536-5958, e-mail: bogatonkova@gmail.com

ТАДЕЄВА Ю.П., канд. техн. наук,
старш. наук. співроб.,
ORCID: 0000-0001-5418-2848, e-mail: jbest0207@gmail.com
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН України та МОН України,
відд. комплексних досліджень інформаційних технологій,
пр. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

МУЛЬТИФУНКЦІЙНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ

Вступ. На сьогодні розроблено багато математичних моделей прогнозування фізіологічних реакцій людини, але більшість з них орієнтовано на розв'язання вузького спектру виконуваних завдань і не враховують поєднання різноманітних чинників, які можуть впливати на людину.

Метою роботи є розроблення мультифункціональної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини, яка дає змогу комплексно оцінити вплив екстремальних умов на організм людини.

Результати. Запропонована інформаційна система уможливило виконання великого класу завдань, пов'язаних з оцінюванням одночасного впливу на людину різноманітних екстремальних умов: високі та низькі температури середовища, вологе та сухе повітря, пронизливий вітер, інтенсивна фізична активність, перебування у холодній воді, паронепроникний захисний одяг, довгохвильова та короткохвильова сонячна радіація, температурна неоднорідність приміщення і вплив електромагнітних полів.

Висновки. Розроблена інформаційна система надає можливість отримати попередні рекомендації щодо фізіологічних резервів організму, ризиків погіршення функціонального стану людини, часу безпечного перебування людини в заданих умовах середовища, температурного комфорту людини у приміщенні під час професійної діяльності, впливу електромагнітної гіпертермії на людину у радіочастотному діапазоні тощо.

Ключові слова: модель терморегуляції людини, інформаційна технологія, фізична активність, умови навколишнього середовища, захисний одяг, температурний комфорт, електромагнітне випромінювання.

© ЄРМАКОВА І.Й., НИКОЛАЄНКО А.Ю., БОГАТЬОНКОВА А.І., ТАДЕЄВА Ю.П., 2022

ВСТУП

Математичне моделювання фізіологічних реакцій людини є одним з основних методів їх вивчення нарівні зі спостереженнями на людях. Такий підхід дає змогу досліджувати ситуації небезпечні, а часом неприпустимі під час спостережень на людях. Гнучкість математичних моделей терморегуляції дає змогу легко вносити зміни і швидко отримувати результати розрахунків. Моделювання забезпечує краще розуміння фундаментальних механізмів та допомагає у формулюванні і випробуванні гіпотез разом з експериментальними програмами. На сьогодні розроблено багато математичних моделей прогнозування фізіологічних реакцій людини, але більшість з них орієнтовано на рішення розв'язання спектру виконуваних завдань і не враховують поєднання різноманітних чинників, які можуть впливати на людину [1].

Ця робота була виконана в Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН та МОН України і присвячується його 25-річчю.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Мультифункціональна інформаційна система моделювання термофізіологічного стану людини за екстремальних умов базується на комплексі математичних мультикомпаратментальних моделей терморегуляції і теплообміну у людини [2, 3].

Комплекс моделей описує теплопродукцію в органах і тканинах, перенос тепла кров'ю і кондукцією, теплообмін з середовищем шляхом конвекції, випромінювання і випаровування з поверхні шкіри і верхніх дихальних шляхів, аферентні та еферентні терморегуляторні ланки. Побудову таких моделей виконано на основі фактичного експериментального матеріалу, що характеризує механізми фізіологічної терморегуляції у людини у навколишніх умовах залежно від професійної діяльності.

В основі структури моделей є компартмент — елементарна одиниця, яка має джерело енергії, здатність приймати і передавати тепло сусіднім компартментам і обмінюватися енергією з середовищем. Апроксимація тіла людини визначається кількістю компартментів і зв'язками між ними. Геометричну форму тіла людини у цій роботі було апроксимовано набором з 39 компартментів. Голова у надано у вигляді двошарової сфери, зовнішній шар якої відповідає шкірі, а внутрішній — мозку. Тіло людини умовно розділено на 13 багат шарових циліндрів: тулуб, плечі, передпліччя, кисті, стегна, гомілки, стопи. Тулуб надано такими компартментами: внутрішні органи, м'язи, жир та шкіра; руки і ноги — м'язи, жир та шкіра; а кисті і стопи — м'язи та шкіра (Рис. 1). Шар циліндра або сфери – це компартмент, який відповідає певному органу або тканині організму. Кров надано окремим компартментом, який відповідає резервуару змішування теплових потоків в великих венозних судинах і серці.

Відповідно до мети дослідження можливо змінювати апроксимацію тіла людини (кількість сегментів і компартментів), анатомічні параметри, біофізичні характеристики компартментів, базові фізіологічні характеристики й адаптаційні властивості людини.

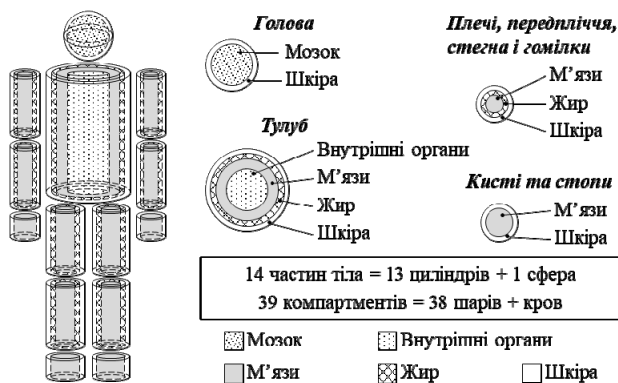
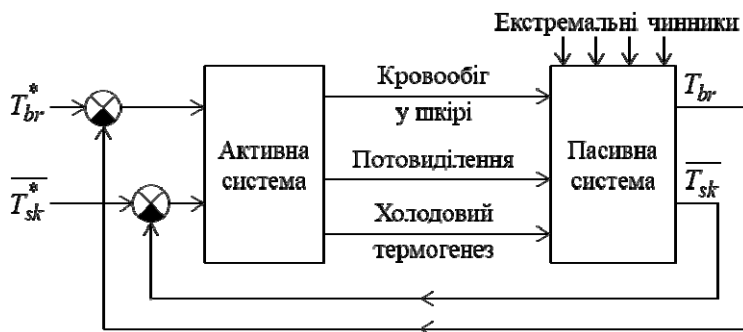


Рис. 1. Апроксимація тіла людини

Метою роботи є створення мультифункціональної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини, яка дає змогу комплексно оцінити вплив умов повітряного і водного середовищ, фізичної активності, рівня адаптації, захисного одягу і спорядження, температурної асиметрії прищиплення та електромагнітного випромінювання на організм людини.

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ТЕРМОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Призначенням фізіологічної системи терморегуляції є підтримання температури тіла в межах обмеженого діапазону у разі зміни рівня внутрішнього теплоутворення і температури навколишнього середовища. У цьому випадку терморегуляцію людини подано як взаємодію двох систем — активної і пасивної (Рис. 2). Активна система описує фізіологічні реакції терморегуляції, спрямовані на підтримку температурного гомеостазу, а також аферентні і еферентні ланки. До пасивної системи належать фізіологічні процеси, пов'язані з утворенням і перенесенням тепла всередині тіла людини та теплообміном з середовищем. Ключовою структурою в моделі є центр терморегуляції, який здійснює керування системою зі зворотнім зв'язком — за температурою мозку і середньою температурою шкіри.



T_{br} — температура мозку, T_{sk} — середня температура шкіри,
 * — початкове значення (set-point)

Рис. 2. Блок-схема терморегуляції людини

Мета системи регулювання теплообмінних потоків — забезпечення такого стаціонарного нерівноважного стану, за якого зберігається балансове співвідношення між виробленим і утилізованим теплом.

Універсальний запис рівняння розрахунку динаміки температури для будь-якого компартмента, крім крові, має вигляд:

$$c_{ij} m_{ij} \frac{dT_{ij}}{dt} = M_{ij} - Q_{ij} - a_{ij-1} \lambda_{ij-1} (T_{ij} - T_{ij-1}) - a_{ij} \lambda_{ij} (T_{ij} - T_{ij+1}) - \rho_b c_b W_{ij} (T_{ij} - T_b), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, K}, \quad (1)$$

де T — температура, °C; t — час, год.; c — питома теплоємність, ккал/(кг·°C); m — маса, кг; M — метаболізм, ккал/год; Q — тепловий потік, ккал/год; a — товщина компартмента, м; λ — коефіцієнт теплопровідності, ккал/(м·°C·год); ρ — густина, кг/м³; w — об'ємна швидкість крові. Індокси: i — номер циліндра; j — номер шару; b — кров; N — кількість циліндрів; K — кількість шарів у циліндрі.

Температура крові T_b на кожному кроці інтегрування прийнята однаковою для всіх компартментів і дорівнює температурі резервуара змішування потоків кров'ю у великих венозних судинах, серці і легенях:

$$V_b \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K w_{ij} \rho_b c_b T_{ij} - W \rho_b c_b T_b - Q^{RS}, \quad (2)$$

де V — об'єм, л; W — серцевий викид, л/год; Q^{RS} — теплові втрати з диханням, ккал/год.

Загальні теплові втрати диханням складаються з теплової взаємодії між повітрям, яке вдихається і видихається, та тепловіддачі випаровуванням води з верхніх дихальних шляхів:

$$Q^{RS} = \tilde{V} \rho^{air} L^{air} (y_{ex} - y_{in}) + \tilde{V} \rho^{air} c^{air} (T_b - T^{air}), \quad (3)$$

де \tilde{V} — швидкість легеневої вентиляції, л/год; L — питома теплота пароутворення, ккал/кг; y — вологовміст (масова кількість водяної пари в повітрі, віднесена до маси сухого повітря). Індокси: ex — повітря, яке видихається; in — повітря, яке вдихається.

Теплообмін людини з *навколишнім повітряним середовищем* відбувається за рахунок випаровування, випромінювання і конвекції. Кількість тепла, що віддається організмом кожним з цих шляхів, залежить від температури, вологості і швидкості руху повітря:

$$Q_{ij}^{air} = h_{ij}^C A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) + h_{ij}^R A_{ij} (T_{ij} - T_i^{air}) + h_{ij}^E A_{ij} \left(P_{ij} - \frac{\varphi_i}{100\%} P_i^{air} \right), \quad (4)$$

де h — коефіцієнт теплообміну; A — площа поверхні тіла, м²; P — тиск насичених і ненасичених парів, кПа; φ — відносна вологість повітря, %. Індокси: C — конвекція; R — випромінювання; E — випаровування; air — повітря.

У воді теплообмін людини відбувається тільки шляхом конвекції:

$$Q_{ij}^{water} = h_{ij}^{water} A_{ij} (T_{ij} - T_i^{water}), \quad (5)$$

Коефіцієнт теплообміну конвекцією в воді залежить від теплопровідності води, коефіцієнта Нуссельта і діаметра компартмента:

$$h_{ij}^{water} = K^{water} \cdot Nu/d_{ij}, \quad (6)$$

де K — теплопровідність; Nu — число Нуссельта; d — діаметр компартмента. Індокси: *water* — вода.

Загальна кількість метаболічного тепла складається з базового рівня, тепла, яке утворюється в організмі людини під час фізичної активності, та тепла, яке утворюється за рахунок холодового тонусу і тремтіння скелетних м'язів:

$$M = M^* + M^a + M^{sh}, \quad (7)$$

де індокси: $*$ — початкове значення; a — фізична активність; sh — холодове тремтіння скелетних м'язів.

Фізичну активність людини включено у комплекс моделей. Більша частина енергії, яка витрачається на фізичну активність, перетворюється в тепло M^a у скелетних м'язах тіла через низьку ефективність механічної роботи людини:

$$M^a = (1 - \eta) \cdot k^{eq} \cdot qO_2, \quad (8)$$

де η — коефіцієнт корисної дії, $0 \leq \eta \leq 1$; qO_2 — споживання кисню, л/год; k^{eq} — теплотворний еквівалент кисню, ккал/л.

У *приміщенні* термофізіологічний стан людини суттєво залежить від довгохвильового випромінювання. Незначна температурна неоднорідність або зміна розмірів приміщення приводить до істотних змін фізіологічного стану людини. Тому розрахунок середньої радіаційної температури приміщення є ключовим моментом у моделі для прогнозування впливу теплообміну випромінюванням. Середня радіаційна температура приміщення залежить від температурної неоднорідності поверхонь, розмірів кімнати і місцезнаходження людини. Середня радіаційна температура у певній точці простору визначається кутовими факторами проєкції від кожного елементу навколишніх предметів та поверхонь приміщень до людини:

$$T_r = \sum_l \sum_m T_{lm} \cdot F_{lm}, \quad (9)$$

$$F_{lm} = f_{max} (1 - e^{-(a_{lm}/c_{lm})/\tau}) (1 - e^{-(b_{lm}/c_{lm})/\gamma}), \quad (10)$$

$$\tau = A + B \left(\frac{a_{lm}}{c_{lm}} \right), \quad \gamma = C + D \left(\frac{b_{lm}}{c_{lm}} \right) + E \left(\frac{a_{lm}}{c_{lm}} \right), \quad (11)$$

де T_r — середня радіаційна температура, С; F — кутовий фактор проєкції поверхонь; a — довжина частини поверхні, м; b — висота частини поверхні, м; c — відстань від людини до поверхні, м; l — номер поверхні приміщення (стіна, підлога, стеля); m — номер частини поверхні; f_{max} , A , B , C , D , E — коефіцієнти, згідно з міжнародним стандартом ISO 7726:1998 [4].

Вплив *електромагнітного випромінювання* (далі – ЕМВ) радіочастотного діапазону на термофізіологічний стан людини визначається поглиненою біологічними тканинами ЕМВ. Кількість тепла, яке абсорбується в тканинах внаслідок радіочастотної гіпертермії, залежить від потужності та частоти джерела

ЕМВ, затухання енергії електромагнітної хвилі у верхніх шарах гомогенної шаруватої структури тіла, біофізичних характеристик біологічних тканин, розмірів та розташування опромінюваної ділянки тіла людини:

$$EM_{ij} = (\Psi(0) - \sum_{j=1}^K SAR_{ij-1}) \cdot B \cdot \left[1 - \exp \left[-2\sqrt{2}\pi \frac{a_{ij} \cdot f}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_{ij} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{ij}}{2\pi f \varepsilon_{ij} \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right)} \right] \right] \quad (12)$$

де EM — поглинене тепло внаслідок ЕМВ, Вт; $\Psi(0)$ — питома щільність потужності джерела ЕМВ, Вт/м²; a — товщина шару, м; SAR — поглинена доза ЕМВ, Вт/м²; B — площа грані, через яку проникає електромагнітне випромінювання, м²; f — частота ЕМВ, Гц; c — швидкість світла у вакуумі, м/с; ε — відносна діелектрична проникність біологічної тканини; ε_0 — абсолютна діелектрична проникність вакууму, Ф/м; σ — питома електропровідність біологічної тканини, См/м.

АРХІТЕКТУРА МУЛЬТИФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Мультифункціональна інформаційна система має клієнт-серверну архітектуру. Сервер системи складається з програми керування потоками даних, комплексу математичних моделей та бази даних. Клієнтську частину реалізовано як десктопні, мобільні і веб-застосунки. Клієнт дає змогу вводити, первинно контролювати і передавати дані на сервер, а потім приймати і відображати результати на екрані свого пристрою. Користувач може переглянути значення фізіологічних показників і графік зміни вибраного показника в динаміці, що дає змогу відстежувати перехідні процеси і безпечний термін перебування в заданих умовах.

Інформаційна система містить сім базових інформаційних модулів: «Людина», «Фізична активність», «Повітряне середовище», «Водне середовище», «Одяг», «Приміщення», «Електромагнітне випромінювання». Кожному модулю відповідає окремий клас характеристик, властивостей і подій. До характеристик модулів належать фізичні та біофізичні величини, константи і параметри, які можна виміряти або отримати з довідкових даних. До властивостей належать алгоритми розрахунку фізіологічних змінних і обчислюваних параметрів, до подій належать алгоритми взаємодії між модулями.

У модулі «Людина» враховано анатомічні параметри та фізіологічні характеристики: маса, зріст, площа поверхні тіла, біофізичні характеристики тканин і органів людини, швидкість регулюючих реакцій організму, рівень базового метаболізму, споживання кисню, швидкість базового артеріального і венозного кровообігу, густина і питома теплоємність крові, коефіцієнти теплопередачі і теплообміну, невідчутне випаровування, легенева вентиляція, серцевий викид у стані спокою тощо. Для моделювання адаптаційних властивостей людини є можливим змінювати пороги збудження і температурну чутливість центральної та периферичної нервової систем.

Модуль «Фізична активність» надає можливість враховувати вид, потужність і тривалість фізичної активності, а також швидкість руху людини.

Вид фізичної активності (біг, ходьба, їзда на велосипеді, плавання різними стилями тощо) задається ефективністю роботи і коефіцієнтами пропорційності, які відображають відносний розподіл фізичної активності по залучених групах скелетної мускулатури тіла.

Модуль «*Повітряне середовище*» характеризується температурою, відносною вологістю і швидкістю руху повітря, середньою радіаційною температурою, тиском насичених парів, питомою теплотою пароутворення, коефіцієнтом теплопровідності повітря.

Модуль «*Водне середовище*» характеризується рівнем занурення людини у воду, температурою води та коефіцієнтами конвективного теплообміну. Можливо моделювати різні рівні занурення, наприклад: повне занурення людини з головою у воду; людина занурена по шию у воду, а голову утримує над водою; людина по плечі у воді, а голова і руки на повітрі; людина по пояс у воді, по коліна у воді, по щиколотки у воді тощо.

Модуль «*Одяг*» дає змогу задавати конструкцію, комплект, вид та матеріал одягу і захисного спорядження. Для кожної частини тіла, яка захищена одягом, поверх шкіри вводиться додатковий компартмент. Компартментам одягу присвоюються характеристики вибраного матеріалу: товщина і щільність тканини, коефіцієнти теплоізоляції і паронепроникності, питома теплоємність, коефіцієнт, який враховує збільшення площі поверхні через одяг, індекс паропроникності. Для кожного компартмента одягу або захисного спорядження розраховується маса, коефіцієнт теплообміну між шкірою та одягом, загальний опір випаровуванню і задається його початкова температура.

Модуль «*Приміщення*» включає довгохвильову радіацію та температурну асиметрію приміщення. Він дає змогу врахувати розміри і температурну неоднорідність поверхонь, місцезнаходження і положення людини у приміщенні, одяг, рівень фізичної активності людини та наявність сонячної короткохвильової радіації. Враховується ширина, довжина і висота приміщення, відстань від стін, підлоги і стелі до людини.

Модуль «*Електромагнітне випромінювання*» дає змогу задавати локацію ділянки опромінення і характеристики електромагнітного поля. Локація ділянки опромінення визначається розмірами джерела опромінення та його розташуванням — на поверхні тіла або у внутрішніх органах. Це дає змогу моделювати загальну, регіональну або локальну дію зовнішніх або імплантованих гіпертермічних аплікаторів. Характеристики електромагнітного поля визначаються потужністю, частотою і тривалістю експозиції.

Сценарії взаємодії між *базовими модулями* чітко прописано та запрограмовано у *інтегровальному модулі*. Комбінація модулів збагачує можливості розробленої мультифункціональної інформаційної системи.

Інтегровальний модуль уможливив:

- оцінювання сумісного впливу на термофізіологічний стан людини умов повітряного та водного середовищ, видів та інтенсивності фізичної активності, ансамблів одягу та захисного спорядження;
- оцінювання ступеня адаптації людини до різних умов середовища та інтенсивної фізичної активності;

- прогнозування часу до настання перегрівання і зневоднення або переохолодження організму людини за екстремальних умов середовища;
- оцінювання температурного комфорту людини в приміщенні;
- отримання прогнозу впливу на людину характеристик електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні;
- дослідження впливу випромінювання мобільного телефона на температуру мозку людини.

До модулю аналізу даних надходять всі результати обчислень: динаміка локальних і середніх температур, метаболічних процесів і теплових потоків, об'ємної швидкості крові, серцевого викиду, ударного обсягу серця, частоти серцевих скорочень, швидкості випаровування і стікання поту, загальних втрат води організмом тощо. Динаміка цих показників є прогнозом термофізіологічного стану людини. Після оброблення та аналізування результатів моделювання формуються рекомендації і висновки щодо фізіологічних резервів організму, часу безпечного перебування в заданих умовах і можливих ризиків погіршення термофізіологічного стану людини.

Десктопні, мобільні і веб-застосунки уможливають візуалізацію результатів моделювання. Це дає змогу превентивно оцінити фізіологічні резерви організму людини в екстремальних умовах середовища, щоб вчасно вжити превентивних заходів.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЛЮДИНИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ СЕРЕДОВИЩА З НАМІРОМ УНИКНЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ.

Оцінювання впливу захисного одягу на термофізіологічний стан людини. Умови проведених модельних досліджень [5]: людина виконує фізичну роботу потужністю 300 Вт на відкритому повітрі протягом двох годин, температура повітря 40 °С, відносна вологість повітря (ϕ) 20 % і 50 %, швидкість руху повітря 1 м/с. Порівняно два ансамблі одягу: звичайний бавовняний костюм (A1) і спеціальний захисний костюм (A2). Характеристики A1: теплоізоляція 0,037 м²·С/Вт, паропроникність 0,0066 м²·кПа/Вт. Характеристики A2: теплоізоляція 0,119 м²·С/Вт, паропроникність 0,017 м²·кПа/Вт.

Для оцінювання теплового навантаження на організм людини використано індекс теплового стресу [6]:

$$HSI = e^{req} / e^{max}, \quad (13)$$

де HSI — індекс теплового стресу; e^{req} — швидкість необхідного випаровування для підтримання теплового балансу, ккал/год; e^{max} — максимально можливе в даних умовах середовища випаровування, ккал/год.

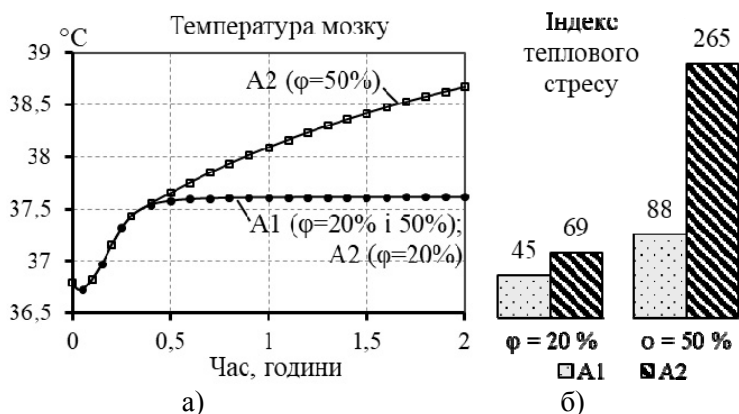


Рис. 3. Динаміка температури мозку людини (а) та індекс теплового стресу HSI (б) залежно від одягу і вологості повітря

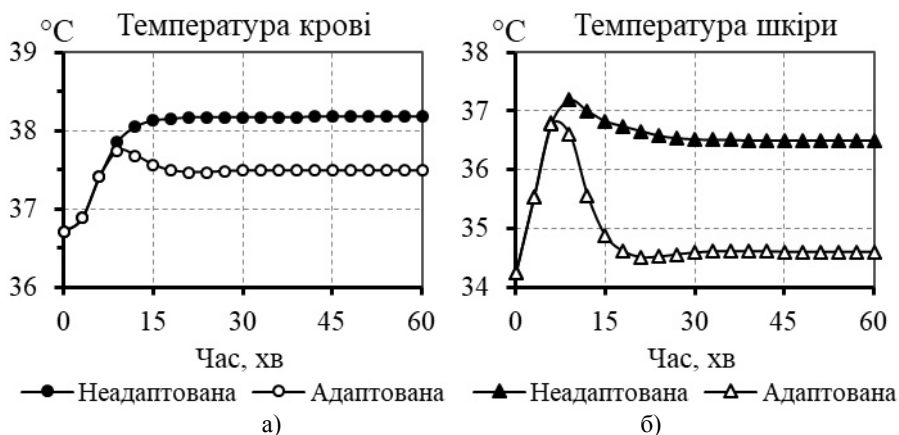


Рис. 4. Динаміка температури крові (а) і середньої температури шкіри (б) неадаптованої та адаптованої людини

За індексом теплового стресу умова A1 за $\varphi = 20\%$ є некомфортною, але стерпною; умови A1 за $\varphi = 50\%$ та A2 за $\varphi = 20\%$ є нестерпними; час безпечного для здоров'я людини перебування за умови A2 за $\varphi = 50\%$ є обмеженим (Рис. 3).

У людини за умов A1 (за $\varphi = 20\%$ і $\varphi = 50\%$) та A2 (за $\varphi = 20\%$) загальні втрати води організмом за дві години становлять 1040 г. Втрати води 1,5% від маси тіла не загрожують здоров'ю людини [7]. У людини за умови (A2) за $\varphi = 50\%$ загальні втрати води організмом складають 1700 г за дві години, що становить приблизно 2,4% від маси тіла людини.

Оцінювання ступеня адаптації людини до інтенсивної фізичної активності за високої температури повітря. Людина протягом однієї години біжить зі швидкістю 7,5 км/год, енерговитрати 600 Вт, температура повітря 45 °C.

Для адаптованої людини усталене значення температури крові становить 37,5 °C, що на 0,7 °C нижче, ніж у неадаптованої людини (Рис. 4а). В адаптованої людини усталене значення середньої температури шкіри = 34,6 °C, що теж істотно нижче, ніж у неадаптованої, де $T_{sk} = 36,5$ °C (Рис. 4б).

Перегрівання і зневоднення у спортсменів під час марафону. Під час марафону серцевий викид збільшується до 35 л/хв, ударний об'єм серця до 175 мл, швидкість крові у м'язах збільшується до 28 л/хв, що складає 80 % серцевого викиду. У розглянутому діапазоні температур повітря внутрішня температура тіла спортсмена до закінчення дистанції залишається в межах 38,5 °С, що відповідає легкому ступеню перегрівання.

Результати моделювання показують, що за температури повітря 16 °С тіло спортсмена віддає у навколишнє середовище шляхом конвекції 51 % (461 ккал/год), випаровуванням поту відводиться 43 % (386 ккал/год) тепла, а решта 6 % припадає на випромінювання. Зі зростанням температури навколишнього середовища потовиділення з подальшим випаровуванням збільшується, а тепловіддача конвекцією, навпаки, зменшується (Рис. 5а). За температури повітря 20 °С організм людини віддає в середовище шляхом випаровування близько 55 % тепла, а за температури повітря 24 °С – 68 % тепла.

Загальні втрати води організмом спортсмена за температури повітря 16 °С, 20 °С і 24 °С склали 1,4 л, 1,8 л і 2,2 л відповідно за 2,1 години, що становить 2 %, 2,5 % і 3,1 % від маси тіла (Рис. 5б). Ці втрати води не загрожують здоров'ю людини, але негативно впливають на можливість підтримання нею постійної високої швидкості бігу, чим погіршують результативність.

Прогнозування часу до настання переохолодження організму людини залежно від рівня занурення в холодну воду. Порівнювали термофізіологічний стан людини у разі трьох рівнів занурення у воду температурою 10 °С: 1 — повне занурення, 2 — по шию, 3 — голова і руки на повітрі (Рис. 6).

У холодній воді температура мозку стрімко падає для всіх трьох рівнів занурення [8].

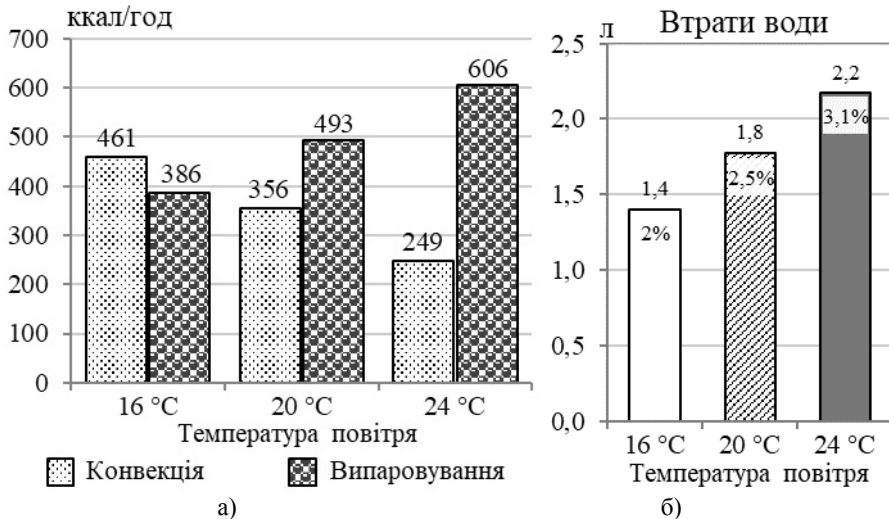


Рис. 5. Теплообмін із середовищем випаровуванням і конвекцією (а) та загальні втрати води організмом спортсмена за дистанцію (б) залежно від температури повітря

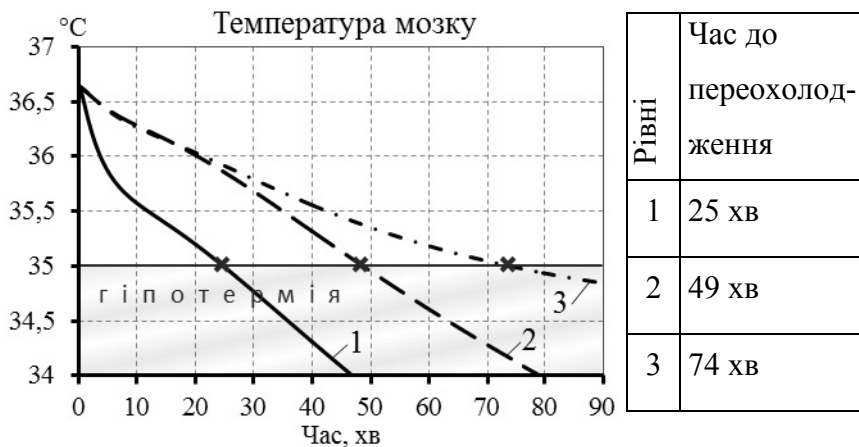


Рис. 6. Динаміка температури мозку залежно від рівня занурення людини у воду: 1 — повне, 2 — по шию, 3 — голова і руки на повітрі

Таблиця 1. Оцінювання температурного комфорту людини у приміщенні з однаковою (А) і різною (В) температурою поверхонь

Приміщення	«А»	«В»
Середня радіаційна температура	23,1 °C	10,8 °C
Середня температура шкіри	35,3 °C	32,3 °C
Індекс PMV	0	-2,8
Індекс PPD	7,5 %	87,9 %
Висновок	комфортно	дуже холодно

PMV — Predicted Mean Vote — очікуване значення теплового комфорту; PPD — Predicted Percentage of Dissatisfied — прогнозована незадоволеність у відсотках [9].

У разі непередбачуваного потрапляння людини у холодну воду за умови положення тіла, коли є змога утримувати голову і руки на повітрі, час безпечного перебування втретє більший, ніж у разі повного занурення у воду з головою.

Оцінювання температурного комфорту людини в приміщенні під час професійної діяльності. Умови проведених модельних досліджень: людина протягом 2 годин працює за комп'ютером у кімнаті висотою 3 м, довжиною 10 м і шириною 4 м, температура повітря 20°C, відносна вологість 50% і швидкість руху повітря 0,1 м/с. Проведено порівняння стану людини у приміщенні з однаковою температурою поверхонь 22 °C (А) і з температурною неоднорідністю (В): підлога = 9 °C, стеля = 11 °C, стіни = 14 °C, 12 °C, 10 °C і 8 °C.

За результатами моделювання (Табл. 1) робота людини у приміщенні «А» є комфортною. У приміщенні «В» спостерігається порушення теплового комфорту.

Прогнозування впливу на людину характеристик електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні. Інформаційна система дає змогу отримати попередній розрахунок температурного поля опромінення злоякісних новоутворень та прилеглих тканин. Основними тепловими процесами є розподіл абсорбованого тканинами тепла внаслідок електромагнітного випромінювання. Основний внесок у перенесення тепла від зони безпосереднього нагріву є процес конвективного перенесення тепла кров'ю в організмі людини. За загальної гіпертермії особливе значення має контроль температури мозку та рівня тепловіддачі випаровуванням з поверхні шкіри, а за локальної — процес кондукції [10].

ВИСНОВКИ

Застосування створеної інформаційної системи моделювання термофізіологічного стану людини забезпечує виконання великого класу завдань, пов'язаних з оцінюванням одночасного впливу на людину різноманітних екстремальних умов: високі та низькі температури середовища, вологе та сухе повітря, пронизливий вітер, інтенсивна фізична активність, перебування у холодній воді, паронепроникний захисний одяг, довгохвильова та короткохвильова сонячна радіація, температурна неоднорідність приміщення, вплив електромагнітних полів тощо.

За результатами моделювання розроблена інформаційна система надає можливість отримати попередні рекомендації щодо: фізіологічних резервів організму і небезпеки їхнього вичерпання; можливих ризиків погіршення функціонального стану людини (перегрівання, зневоднення або переохолодження організму людини); часу безпечного перебування людини у заданих умовах середовища; температурного комфорту людини у приміщенні під час професійної діяльності; впливу випромінювання мобільного телефону на температуру мозку людини; впливу загальної, регіональної та локальної електромагнітної гіпертермії на людину у радіочастотному діапазоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Enescu D. Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-State and Transient Conditions. *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 5. № 841. P. 1-43.
2. Ермакова И.И. Информационная платформа мультикомпаратментальных моделей терморегуляции человека. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2013. Вып. 174. С. 81–91.
3. Potter A.W., Yermakova I.I., Hunt A.P., Hancock J.W., Oliveira A.V.M., Looney D.P., Montgomery L.D. “Comparison of two mathematical models for predicted human thermal responses to hot and humid environments.” *Journal of Thermal Biology*, 2021, vol. 97, 102902.
4. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. *International Organisation for Standardisation*. Geneva: ISO Standard. 1998. P. 1–54.
5. Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A. Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment. *Journal of Physical Science and Application*. USA: David Publishing Company. 2013. Vol. 3. № 4. P. 238–243.
6. Belding H.S., Hatch T.F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, piping and air conditioning*. 1955. Vol. 27. № 8. P. 129–136.
7. Sawka M.N., Chevront S.N., Kenefick R. Hypohydration and human performance: impact of environment and physiological mechanisms. *Sports Medicine*. 2015. Vol. 45. № 1. P. 51–60.

8. Yermakova I., Nikolaienko A., Solopchuk Y., Regan M. Modelling of human cooling in cold water: effect of immersion level. *Extreme Physiology & Medicine* 2015, 4(Suppl 1):A132.
9. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO Standard. 2005. P. 1–52.
10. Gandhi O., Yermakova I., Tadeieva J., Nikolaienko A. Computer Modeling of Human Thermoregulation for Electromagnetic Hyperthermia. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kiev, Ukraine. April 16-28, 2019. P. 475–479.

Отримано 15.02.2022

REFERENCES

1. Enescu D. Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-State and Transient Conditions. *Energies*. 2019, Vol. 12, Iss. 5, № 841, pp. 1–43.
2. Yermakova I. Information platform of multicompartmental models of human thermoregulatory system. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*. 2013, Vol. 174, pp. 81–91. (in Russian)
3. Potter A.W., Yermakova I.I., Hunt A.P., Hancock J.W., Oliveira A.V.M., Looney D.P., Montgomery L.D. “Comparison of two mathematical models for predicted human thermal responses to hot and humid environments.” *Journal of Thermal Biology*, 2021, vol. 97, 102902.
4. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. *International Organisation for Standardisation*. Geneva: ISO Standard. 1998, pp. 1–54.
5. Yermakova I., Nikolaienko A., Grigorian A. Dynamic model for evaluation of risk factors during work in hot environment. *Journal of Physical Science and Application*. USA: David Publishing Company. 2013, Vol. 3, № 4, pp. 238–243.
6. Belding H.S., Hatch T.F. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, piping and air conditioning*. 1955, Vol. 27, № 8, pp. 129–136.
7. Sawka M.N., Chevront S.N., Kenefick R. Hypohydration and human performance: impact of environment and physiological mechanisms. *Sports Medicine*. 2015, Vol. 45, № 1, pp. 51–60.
8. Yermakova I., Nikolaienko A., Solopchuk Y., Regan M. Modelling of human cooling in cold water: effect of immersion level. *Extreme Physiology & Medicine* 2015, 4(Suppl 1):A132.
9. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO Standard. 2005, pp. 1–52.
10. Gandhi O., Yermakova I., Tadeieva J., Nikolaienko A. Computer Modeling of Human Thermoregulation for Electromagnetic Hyperthermia. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kiev, Ukraine. April 16-28, 2019. P. 475–479.

Received 15.02.2022

Yermakova I. Yo., DSc (Biology), Full Professor,
Leading Researcher,
ORCID: 0000-0002-9417-1120 , e-mail: irena.yermakova@gmail.com
Nikolaienko A. Yu., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0002-2402-2947, e-mail: n_nastja@ukr.net
Bogatonkova A.I., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0002-7536-5958, e-mail: bogatonkova@gmail.com
Tadeeva Yu.P., PhD (Engineering),
Senior Researcher,
ORCID: 0000-0001-5418-2848, e-mail: jbest0207@gmail.com
International Research and Training Center for Information Technologies
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine
and Ministry of Education and Science of Ukraine,
the Department of Complex Research of Information Technologies,
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

MULTIFUNCTIONAL INFORMATION SYSTEM FOR MODELING OF HUMAN THERMOPHYSIOLOGICAL STATE IN EXTREME ENVIRONMENTS

Introduction. *Models of human thermoregulation are used for theoretical and experimental findings. Mathematical modeling of human physiological systems is one of the main methods for studying them in parallel with physiological researches in human body. For today, many mathematical models have been developed to predict human physiological responses, but most of them are related to special task.*

The purpose of the paper is to develop multifunctional information system for modeling of human thermophysiological state that takes into account comprehensive assessment of impact of extreme conditions in humans.

Results. *The information system allows to research different tasks related to assessing the simultaneous impact on humans of various extreme conditions: cold and heat, wet and dry air, high winds, intense physical activity, immersion in cold water, waterproof protective clothing, long-wave and shortwave solar radiation, room temperature inhomogeneity and exposure to electromagnetic field.*

Proposed information system enable us to make quantitative evaluations of impact of protective clothing on human thermophysiological state; human adaptation to intense physical activity at hot environment; overheating and dehydration in athletes during the marathon; safe time of hypothermia in cold water; human temperature comfort indoors during professional activity; electromagnetic radiation in the radio frequency ranges.

Conclusions. *The information system provides preliminary recommendations to physiological reserves of human, risks of deterioration of functional state (overheating, dehydration or hypothermia), safe stay time in extreme environment, temperature comfort in room during professional activities; effects of general, regional and local electromagnetic hyperthermia in humans of radio frequency ranges.*

Keywords: *model of human thermoregulation, information technology, physical activity, environmental conditions, protective clothing, temperature comfort, electromagnetic radiation.*