

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ ЛЮДИНИ У НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Стасевич С.П., Руда М.В., Ничай С.Т.

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

serhiy.p.stasevych@lpnu.ua, mariia.v.ruda@lpnu.ua, stefan.nychai.tz.2021@lpnu.ua

Організм людини є складною терморегуляційною системою, для нормального функціонування якої фізіологічні та функціональні системи органів людини повинні працювати у певній температурній стабільності. Температура тіла є показником теплового стану організму загалом і відображає складні процеси, які відбуваються у ньому. Цими процесами є теплоутворення внутрішніх органів і тканин, теплообмін між цими органами і зовнішнім середовищем. І саме завдяки системі терморегуляції організму середня температура людського тіла знаходиться у діапазоні 36.5–37.2°C, який забезпечує комфортні умови для функціонування людського організму загалом. Проаналізовано різні моделі системи терморегуляції організму людини, які можуть використовуватися для прогнозування комфортного стану перебування людини у різних середовищах (приміщення, тепло, холод). Оскільки температура тіла є показником теплового стану організму загалом і відображає складні процеси, які відбуваються у ньому, цей показник є визначним фактором під час проектування робочого середовища людини з урахуванням примусової і природної вентиляції для забезпечення його комфортного стану, а також під час розроблення спеціального одягу для пожежників, водолазів, пілотів. Завдяки процесам терморегуляції досягається сталість температури різних частин тіла за будь-яких зовнішніх впливів на організм. Система терморегуляції організму забезпечує рівновагу процесів теплоутворення в організмі і теплопередачу назовні. Математичні моделі теплової системи людини, які стрімко розвиваються за останні роки, застосовуються у різних областях. Вони використовуються для оцінки умов навколишнього середовища у будівлях, автомобілебудуванні, літакобудуванні, ракетній і військовій галузях, текстильній промисловості для пожежників і водолазів, метеорології, медицині. У цих галузях зазначені моделі можуть використовуватися для дослідження характеристик людини в умовах різного температурного навантаження (термічного та холодого). *Ключові слова:* терморегуляція, тепловий стан людини, комфортні умови організму, метаболізм, теплове поле; теплопровідність; метаболічне генерування тепла; конвекція; випромінювання; випаровування.

Mathematical models for predicting human thermal comfort in the environment. Stasevych S., Ruda M., Nychai S.

The human body is a complex thermoregulatory system and for its normal functioning physiological and functional systems of human organs must work in a certain temperature stability. Body temperature is an indicator of the thermal state of the body as a whole and reflects the complex processes that occur in it. These processes are the heat generation of internal organs and tissues and heat exchange between these organs and the external environment. And thanks to the system of thermoregulation of the body, the average temperature of the human body is in the range of 36.5–37.2°C, which provides comfortable conditions for the functioning of the human body as a whole. Various models of the thermoregulatory system of the human body, which can be used to predict the comfortable state of human existence in different environments (premises, warm, cold), are analyzed. Since body temperature is an indicator of the thermal state of the body as a whole and reflects the complex processes occurring in it, this indicator is a significant factor in designing the human working environment, taking into account forced and natural ventilation to ensure its comfort, as well as the development of special clothing for firefighters, divers, pilots. Due to the processes of thermoregulation, the stability of the temperature of different parts of the body is achieved under any external influences on the body. The body's thermoregulatory system ensures the balance of heat production processes in the body and heat transfer to the outside. Mathematical models of the human thermal system, which are developing rapidly in recent years, are used in various fields. They are used to assess environmental conditions in buildings, automotive, aircraft, missile and military industries, the textile industry for firefighters and divers, meteorology, medicine. In these areas, these models can be used to study human characteristics under conditions of different temperature loads (thermal and cold). *Key words:* thermoregulation, thermal state of a person, comfortable conditions of an organism, metabolism, thermal field; thermal conductivity; metabolic heat generation; convection; radiation; evaporation.

Постановка проблеми. Температурний стан комфорту для оголеної людини становить 28–30°C, а легко одягненої – 22–25°C. Температура тіла вище 42°C призводить до втрати свідомості, за якої відбувається порушення обміну речовин у тканинах мозку. За температури 47°C настає кома, відбувається порушення серцевої діяльності і дихання.

Завдяки фізичним і хімічним процесам теплорегуляції досягається сталість температури різних частин тіла за будь-яких зовнішніх впливів на організм. Система терморегуляції організму забезпечує рівновагу процесів теплоутворення в організмі

і теплопередачу назовні. Людина адаптується до зовнішніх умов середовища, використовуючи свою систему терморегуляції.

Тому у сучасному кліматі із різкими перепадами температур (улітку за добу – на 10–15°C) потрібні моделі теплової поведінки організму людини за таких перехідних і нерівномірних змін температури середовища (наприклад, кондиційоване приміщення – спекотна вулиця, сонце – тінь тощо).

Актуальність дослідження. Регулювання температури тіла людини є балансом між виробленням тепла організмом і його передачею у навколишнє

середовище. Зовнішні екстремальні умови середовища можуть призвести до поганої терморегуляції тіла і, відповідно, до гіпертермії або гіпотермії.

Тому дуже важливо знати, як організм людини поводитиме себе у різних умовах навколишнього середовища: під час впливу температури повітря, вологості, швидкості вітру. Існує багато моделей системи терморегуляції організму, найвідомішими з яких є моделі Столвейка, Танабе та Фіала і які продовжують удосконалюватися постійно. Тому актуальним є вибір такої моделі системи терморегуляції, яка була би найбільш узгодженою із експериментальними показниками різних авторів, і використовувалася би для моделювання комфортного стану людини у змінному середовищі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Упродовж своєї трудової діяльності людина перебуває у постійній тепловій взаємодії із виробничим середовищем, де створений свій мікроклімат. Метеорологічні умови виробничого середовища працівника (температура, відносна вологість, рух повітря, теплове випромінювання нагрітих поверхонь) суттєво впливають на стан організму та його працездатність.

Для нормального теплового самопочуття людини важливим є певне співвідношення температури, відносної вологості і швидкості руху повітря. Нормативним документом, що визначає параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [1], в якому визначені оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні приміщень для різних категорій важкості робіт у теплий і холодний періоди року.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Уперше моделювання тіла людини як теплової системи здійснив Лефевр у 1911 році [2]. Він змодельовав тіло у вигляді двохшарової сфери, ядро якої продукує тепло, а оболонка передає його у навколишнє середовище. Відтоді було розроблено багато теплових моделей, починаючи від однорідного циліндра для всього тіла до багатшарових циліндрів різних розмірів, які описують різні частини тіла, зв'язані між собою кровообігом [3; 4; 5; 6; 7]. Кожен шар зазвичай описує анатомічну структуру тіла (кістку, мозок, нутрощі, легені, м'язи, жир, шкіру). Умовно такі теплові моделі тіла людини можна розділити на 4 групи: односегментні, багатосегментні, двовузлові та багатовузлові теплові [8; 9].

Односегментні теплові моделі представляють тіло як один сегмент без системи терморегуляції. Багатосегментні теплові моделі, на відміну від багатовузлових, геометрично точніше описують тіло: тулуб, голову, шию, плече, лікоть, кисть, стегно, гомілку, стопу. Такою моделлю є модель Вісслера [10; 11], яка є однією із повних теплових моделей людини. Людське тіло розділено на 15 сегментів: голова, тулуб (грудна клітка, черевна порожнина),

верхні кінцівки (плече, лікоть, кисть), нижні кінцівки (стегно, гомілка і ступня). У цій моделі враховано зустрічний теплообмін між великими артеріями та венами і стан навколишнього середовища (температура, рух повітря, відносну вологість). Кожний сегмент тіла складається з 4-х шарів (ядра, м'язів, жирового прошарку і шкіри) та має свою судинну систему (артерії, вени та капіляри).

Модель кровоносної системи побудована таким чином. Кожен із 15 сегментів має три судинні системи: артерії, вени і капіляри. Великі артерії та вени моделюються за допомогою артеріального басейну крові та басейну венозної крові. Артеріальна кров, яка входить до кожного сегменту тіла, надходить у капіляри цього сегмента або в артерії більш дистальних сегментів. Кров, яка залишає капіляри, вливається у вени, де вона змішується з венозним поверненням із більш дистальних сегментів. Після цього змішаний венозний потік повертається до серця та легенів для подальшої рециркуляції.

К. Вісслер зробив значний внесок у модель для прогнозування швидкості кровообігу, метаболізму тепла, виділення поту. Для системи керування задаються рівняння балансу маси, зокрема баланс маси кисню, двоокису вуглецю та молочної кислоти. Із цих контрольних рівнянь можна вирахувати потребу у кисні, тоді можна отримати генерацію швидкості метаболізму.

Двовузлові теплові моделі поділяють тіло на дві концентричні оболонки із зосередженими параметрами. Серцевина такої моделі описуватиме внутрішні органи, кістки, м'язи і жирову тканину, а зовнішня оболонка – шкіру.

Найвідомішою такою моделлю є модель Гагге [12]. У цій моделі описується теплове поле тіла двома рівняннями теплового балансу – для ядра і шкіри. Модель урахує вплив мутації, фізичної роботи, теплопровідності, конвекції через моделювання кровообігу між ядром і шкірою, втрату тепла через дихання легень, конвекцію, радіацію та випаровування шкірою.

Багатовузлові теплові моделі ділять сегмент тіла на більш ніж два вузли, і для кожного такого шару температура вважається однорідною за всією товщиною. Однією із найвідоміших багатовузлових моделей є тепла модель Столвейка [13; 14; 15; 16]. У цій моделі вперше введено поняття «центрального басейну крові» як центру конвекційного теплообміну; вона стала основою для подальших досліджень моделей терморегуляції людини [3]. На основі моделі Столвейка було розроблено модель Танабе [17; 18] і модель Фіала [19; 20; 21] із більш детальною сегментацією тіла, складним теплообміном і вдосконаленою системою терморегуляції.

У моделі Фіала людський організм умовно поділено на дві взаємодіючі системи терморегуляції: пасивну, якою керують, та активну, яка керує пасивною системою.

Пасивна система – це фізична модель тіла людини (геометричні розміри тіла та його сегментів, фізіологічні параметри тканин тіла тощо) і явищ теплообміну всередині тіла та між поверхнею тіла і середовищем. Причому вважають, що метаболічне тепло виробляється безперервно і розподіляється всіма частинами тіла через кровообіг.

Активна система моделюється як модель, яка передбачає регуляторні реакції, такі як тремтіння м'язів під час холоду, потовиділення за нагрівання, вазомоторні реакції. Середня температура шкіри, температура ядра сегмента і швидкість зміни температури шкіри є вхідними сигналами від пасивної системи до активної.

Фізичну модель тіла Фіала описав так [19]: метаболічне тепло виробляється всередині тіла, яке розподіляється по сегментах тіла циркуляцією крові і переноситься кондукцією до його поверхні, звідти воно переходить у навколишнє середовище шляхом конвекції, випромінювання та випаровування. Ця модель ураховує геометричні та анатомічні параметри тіла, а також базальні фізіологічні і теплофізичні властивості тканин тіла людини.

В активній системі моделі Фіала використовуються регресійний аналіз фізіологічних реакцій організму людини (показники для регресійного аналізу моделі беруться із результатів експериментальних досліджень різних авторів) [21].

У роботі [22] здійснено експериментальне дослідження для моделей Танабе і Столвейка у змодельованих реальних умовах. Ці дослідження дозволили оцінити середню температуру досліджуваних людей і локальну температуру їх шкіри. Проведені дослідження показали, що температури, розраховані за моделями Танабе і Столвейка, добре узгоджуються з вимірними значеннями у нейтральних і високо-температурних умовах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Під час трудової діяльності у виробничому середовищі людина має постійний теплообмін із навколишнім середовищем. За нормальних мікрокліматичних умов в організмі працівника за рахунок терморегуляції підтримується постійна температура тіла (36,6°C).

Досліджені моделі системи терморегуляції організму можна використовувати для вивчення регулятивних реакцій людей у різних умовах зовнішнього середовища – від понижених температурних умов до підвищених.

Ці моделі можуть використовуватися під час проектування робочих місць із оптимальними мікрокліматичними умовами для різних виробничих підприємств.

Виклад основного матеріалу. Люди досить часто піддаються впливу неоднорідного теплового середовища, причому кожна частина людського тіла має свої фізіологічні та геометричні характеристики, а ізоляція одягом частини тіла є різноманітною

і вносить суттєві корективи у загальний теплообмін із навколишнім середовищем. Тому для оцінки теплообміну людини у закритих середовищах (кабінах автомобілів, літаків, виробничих приміщеннях із кондиціонуванням повітря тощо) та на відкритому повітрі із різними кліматичними впливами потрібна модель терморегуляції людського тіла, яка дозволяє детально розглядати неоднорідні умови.

Модель Столвейка-Харді. Однією із найбільш відомих моделей системи терморегуляції тіла людини є модель Столвейка, яка стала основою для розвитку і розширення іншими авторами.

У моделі Столвейка-Харді розрізняють дві окремі системи терморегуляції: керуюча система і керована система, які на практиці дуже тісно переплітаються. Керована система є геометричним представленням тіла за допомогою теплових характеристик різних його частин. Центральний басейн крові (25-й сегмент) передає тепло між усіма іншими компонентами за допомогою конвекційного теплообміну, що відбувається з потоком крові до кожного компонента.

Кожен із двадцяти п'яти компонентів тіла представлений рівнянням теплового балансу, яке враховує теплообмін, що відбувається між сусідніми компонентами, тепло метаболізму, конвекційний теплообмін із центральним басейном крові, втрати тепла випаровуванням і теплообмін із навколишнім середовищем, якщо компоненти знаходяться у прямому контакті із навколишнім середовищем.

У цій моделі керована (пасивна) частина тіла людини апроксимує шістьма різними сегментами: голова представлена у вигляді сфери, а тулуб, верхні кінцівки (плече, лікоть) і нижні кінцівки (стегно, гомілка) – як циліндри. Кожний сегмент тіла гео-

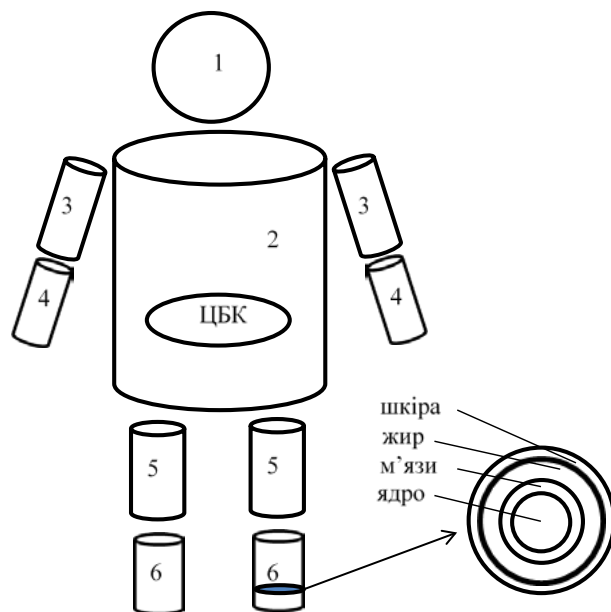


Рис. 1. Схема моделі Столвейка [16]:

ЦБК – центральний басейн крові, 1 – голова, 2 – тулуб, 3 – плече, 4 – лікоть, 5 – стегно, 6 – гомілка

метрично представлений концентричними шарами: ядро, м'язи, жир і шкіра (рис. 1) [16].

Додатковим сегментом є центральний басейн крові, який апроксимує великі артерії і вени, об'єднує всі шість сегментів через відповідну швидкість потоку крові до кожного сегмента і має з кожним сегментом конвекційний теплообмін. Ядро кожного сегменту є відповідно кісткою, нутрошами або мозком. Зовнішній шар кожного сегменту є шкірою. Басейн крові – це об'єм крові у серці та великих судинах. Кров як теплоносій у тілі має конвекційний теплообмін із кожною його частиною. Кров приходить у тканину із температурою крові центрального басейну та залишає її із температурою тканини.

Кровообіг у м'язах контролюється метаболізмом у м'язах (тремтіння м'язів під час охолодження або нагрівання від фізичних вправ) і дещо менше залежить від температури шкіри. У випадку тремтіння м'язів або фізичних вправ визначається додатковий метаболізм до базального метаболізму працюючих м'язів.

Керована система додатково характеризується конвекційним теплообміном між частинами за рахунок кровообігу. Для зручності опису керуюча система регулювання температури тіла моделі розділена на три частини. Перша частина має механізми (рецептори), які розпізнають тепловий стан контрольованої системи; друга (аферентна) – отримує інформацію про тепловий стан, підсумовує її і від-

правляє у мозок; третя (еферентна) – отримує виконавчі команди від мозку і переводить їх у еферентну відповідь організму на зовнішній подразник.

Для оцінювання поведінки терморегуляторного контролера у моделі прийнято, що терморекцептори присутні в усіх тканинах, а центральні рецептори розташовані у мозку.

Столвейк вивів рівняння керування пасивною частиною, в яких передбачені сигнали, що керують еферентною системою. Рівняння керування мають три складники: сигнал від температури мозку, інтегрований сигнал від температури шкіри і добуток температури мозку сигналу від температури шкіри.

Під впливом холоду терморегуляційною відповіддю організму людини є звуження судин і збільшення тепловиділення через тремтіння м'язів. В умовах фізичних навантажень втрати тепла відбуваються шляхом випаровування поту зі шкіри і дихання.

Модель Танабе. Організм людини здійснює теплообмін із навколишнім середовищем за рахунок процесів теплопередачі (рис. 2) [17], таких як конвекційний, радіаційне випромінювання на навколишні поверхні, під час дихання і перенесення маси тепла у разі випаровування шкірою людини.

Сам теплообмін організму із навколишнім середовищем відбувається з урахуванням багатьох чинників: стану організму (температури, емоційного стану,

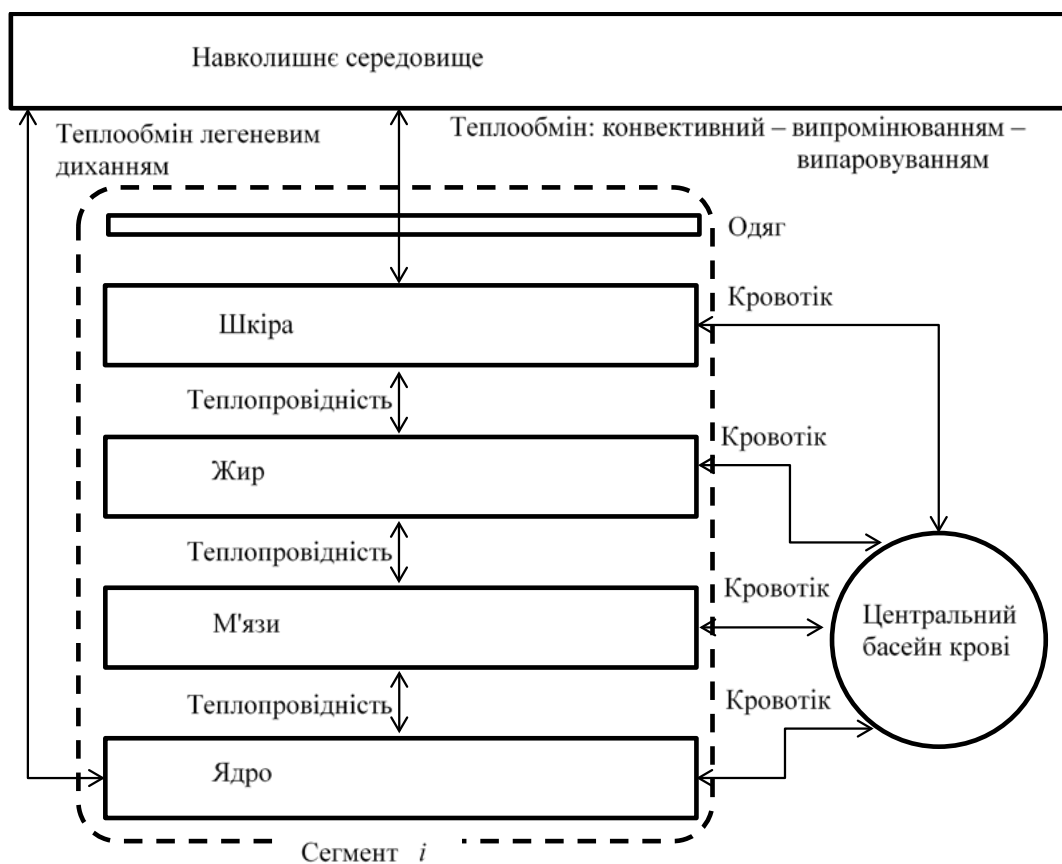


Рис. 2. Процеси теплообміну організму людини із навколишнім середовищем

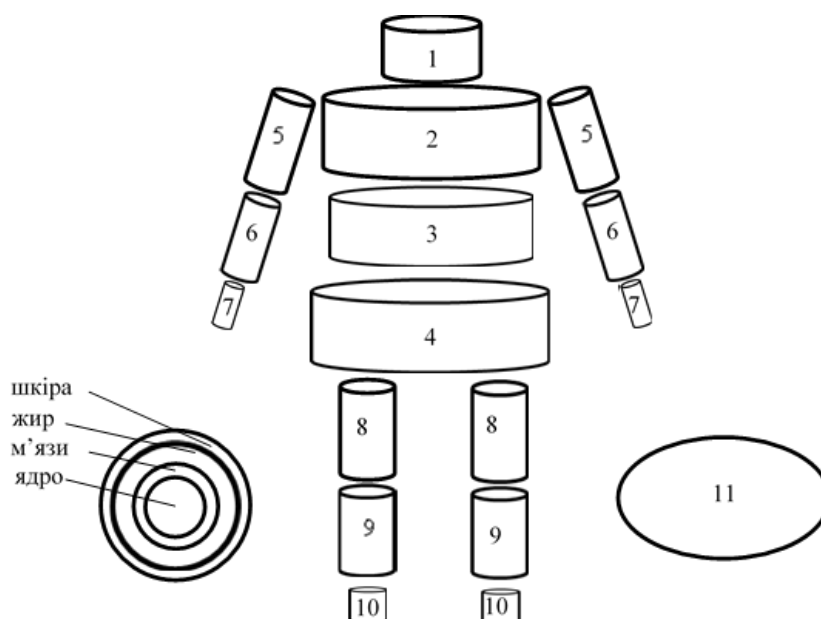


Рис. 3. Схема моделі Танабе [17]: ЦБК – центральний басейн крові,

1 – голова, 2 – грудна клітка, 3 – черевна порожнина, 4 – таз, 5 – плече,
6 – лікоть, 7 – кисть, 8 – стегно, 9 – гомілка, 10 – стопа, 11 – басейн крові

фізичного навантаження тощо), стану навколишнього середовища (температури, вологості, швидкості руху повітря тощо), одягу.

За аналогією із моделлю Столвейка модель Танабе геометрично поділяє тіло людини на такі сегменти: голова, тулуб (грудна клітка, черевна порожнина, таз); верхні кінцівки (плече, лікоть, кисть); нижні кінцівки (стегно, гомілка, стопа) і басейн крові.

Загалом тіло розділено на 16 сегментів, кожен із яких складається з 4-х шарів: ядра, м'язів, жиру та шкіри, загалом 64 сегменти. А 65-им сегментом приймається центральний басейн крові (рис. 3) [17].

Чотири шари у кожному сегменті обмінюються теплом за допомогою провідності, а шар шкіри обмінюється теплом із зовнішнім середовищем за допомогою конвекції, випромінювання та випаровування. Окрім того, всі вузли через кровотік обмінюються теплом із центральним басейном крові.

Модель системи терморегуляції організму людини, розроблену Танабе на основі моделі Столвейка, ще називають моделлю 65MN (65-ти вузловою моделлю системи терморегуляції організму людини). Результати експерименту, проведеного із використанням теплового манекену [18] і моделюванням реальних умов у приміщенні, показали достатню точність термічної моделі Танабе для використання під час моделювання комфортного стану людини.

Головні висновки. Модель Столвейка-Харді є сильною у багатьох аспектах. По-перше, вона здатна розрахувати просторовий розподіл температури в окремих сегментах тіла. По-друге, модель пов'язує ці окремі сегменти через кровообіг в артеріях, венах, і, таким чином, пропонує покращене представлення системи кровообігу і його впливу на розподіл тепла

всередині тіла. За допомогою цих удосконалень модель Столвейка-Харді дає інформацію, яка описує загальну теплову реакцію організму, а також місцеві реакції окремих частин тіла у різних умовах навколишнього середовища та фізичної активності.

Окрім цих переваг існує низка недоліків опису моделі Столвейка-Харді: ця модель не враховує вплив швидкості зміни температури шкіри на регулюючі системи, кондукційний теплообмін розглядається лише у радіальному напрямі або у напрямі, перпендикулярному середній лінії тіла.

У цій моделі, як і в моделі Гагге, температура кожного вузла береться однорідною в усьому об'ємі вузла і поширюється лише радіально між шарами, а швидкість кровообігу залежить від температури вузла. Однак це припущення не дає змоги враховувати відповідь організму на зміну навколишнього середовища. Модель добре працює в умовах високої температури, але гірше – у холодних умовах.

Наведені моделі можуть використовуватися для прогнозування комфортного стану людини у різних середовищах (проживання, роботи, відпочинку, подорожування тощо). Для підтримання теплового комфорту людина формує своє мікросередовище, використовуючи одяг і створюючи мікроклімат на робочих місцях чи вдома. Тому ці моделі допоможуть під час проектування робочого середовища людини з урахуванням примусової і природної вентиляції для забезпечення його комфортного стану, а також під час розробки спеціального одягу для пожежників, водолазів, пілотів.

Моделі системи терморегуляції людини і моделі реакції організму на теплове навантаження (холодове чи нагрівання) використовуються для прогнозу-

вання теплового комфорту людини у різних умовах виробничого середовища, для моделювання фізіологічних реакцій людського організму і складних процесів теплообміну у змінних умовах навколишнього середовища (температури повітря, середньої температури випромінювання, відносної вологості, швидкості повітря тощо) з урахуванням факторів, пов'язаних із людиною (одягу, рівня фізичної активності тощо). Результати моделювання використовуються як оптимальні параметри моніторингу для оцінки

теплових реакцій і теплового комфорту людини у різних умовах навколишнього середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. Враховуючи дослідження, проведені авторами цих моделей, і повноту наведених ними вхідних параметрів, необхідних для проведення обчислювальних експериментів, ці моделі можна використовувати для прогнозування теплового комфорту людини у змінних умовах навколишнього середовища.

Література

1. ДСН 3.3.6.042-99 "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень".
2. Lefevre J. *Chaleur Animale et Energetique*. Masson, Paris. 1911.
3. Katic K., Li R., Zeiler W. Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment*. 2016. Vol. 106. P. 286-300.
4. Cheng Y., Niu J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Build. Environ.* 2012. Vol. 47. P. 13–22.
5. Enescu D. Models and Indicators to Assess Thermal Sensation Under Steady-State and Transient Conditions. *Energies*. 2019. No 12. P. 841.
6. Fu M., Weng W., Chen W., Luo N. Review on modeling heat transfer and thermoregulatory responses in human body. *J. Therm. Biol.* 2016. Vol. 62. P. 189-200.
7. Veselá S., Kingma B.R.M., Frijns A.J.H. Local thermal sensation modeling – A review on the necessity and availability of local clothing properties and local metabolic heat production. *Indoor Air*. 2017. Vol. 27. P. 261–272.
8. Yi, L., Fengzhi, L., Yingxi, L., Zhongxuan, L. An integrated model for simulating interactive thermal processes in humaneclothing system. *J. Therm. Biol.* 2004. Vol. 29. P. 567-575. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.08.071>.
9. Qiantao Zhao, Zhiwei Lian, Dayi Lai. Thermal Comfort models and their developments: *Energy and Built Environment*. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>.
10. Wissler E.H. Mathematical simulation of human thermal behavior using whole body models. *Heat and Mass Transfer in Medicine and Biology Chapter*. 1985. No 13. P. 325-373.
11. Wissler E.H. The use of finite difference techniques in simulating the human thermal system. *Physiological and Behavioral Temperature Regulation Chapter*. 1966. No 27. P. 367-388.
12. Gagge A.P., J.A. Stolwijk, Y. Nishi. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions 77 Part I*. 1971. P. 247-262.
13. Stolwijk J.A., Hardy J. D. Temperature regulation in Man – a theoretical study. *Pflugers Archives ges Physiology*. 1966. Vol. 291. P. 129-162.
14. Stolwijk J. A. J. A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man. NASA-9-9531, 1970.
15. Stolwijk J.A. Mathematical model of thermoregulation, In: *Physiological and behavioral temperature regulation*. Chapter 48, 1970. P. 703-721.
16. Stolwijk J. A. J., Hardy J. H. Control of Body Temperature. *Handbook of Physiology Section 9: Reaction to Environmental Agents*. *Amer. Physiol. Soc.* 1977. P. 45–68.
17. Tanabe S.-I., Nakano J., Kobayashi K. Development of 65-node thermoregulation-model for evaluation of thermal environment. *J. Archit. Plan. Environ.* 2001. Vol. 541. P. 9–16.
18. Tanabe S., Kobayashi K., Nakano J., Ozeki Y. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy Build.* 2002. Vol. 34. P. 637-646.
19. Fiala D. Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort. Ph.D. Thesis. De Montfort University, Leicester, UK, 1998.
20. 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. Vol. 87. P. 1957–1972.
21. Fiala, D., Lomas K.J., Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* 2001. No 45. P. 143–159.
22. Tang Y., Yu H., Wang Z., Luo M., Li C. Validation of the Stolwijk and Tanabe Human Thermoregulation Models for Predicting Local Skin Temperatures of Older People under Thermal Transient Conditions. *Energies*. 2020. No 13(24). P. 6524. <https://doi.org/10.3390/en13246524>.