Технічні науки

УДК 519.7:612.59:615.849:681.5

Стасевич Сергій Павлович
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності
Національний університет "Львівська політехніка"
Стасевич Сергей Павлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности и природоохранной деятельности
Национальный университет "Львовская политехника"
Stasevych Sergiy
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity
Lviv Polytechic National University

Казимира Ірина Ярославівна
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності
Національний університет "Львівська політехніка"
Казимира Ирина Ярославовна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности и природоохранной деятельности
Национальный университет "Львовская политехника"
Kazymyra Iryna
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity
Lviv Polytechic National University

Кузь Ольга Назарівна
кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності
Національний університет "Львівська політехніка"
Кузь Ольга Назаровна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности и природоохранной деятельности
Национальный университет "Львовская политехника"
Kuz Olga
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity
Lviv Polytechic National University

БАГАТОСЕГМЕНТНІ МОДЕЛІ ТІЛА ЛЮДИНИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЇЇ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ: КОРОТКИЙ ОГЛЯД
МНОГОСЕГМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ: КРАТКИЙ ОБЗОР
MULTISEGMENT MODELS OF A HUMAN BODY FOR MODELING ITS THERMAL FIELD: A SHORT OVERVIEW

Анотація. *Розглядаються багатосегментні моделі тіла людини, призначені для дослідження її теплового поля. Проведено аналіз різних моделей, наведено переваги та недоліки цих моделей при моделюванні теплового поля.*

Ключові слова: *Теплова модель тіла людини, теплове поле людини, теплопровідність, метаболічне генерування тепла, терморегуляція людини.*

Аннотация. *Рассматриваются многосегментные модели тела человека, предназначенные для исследования ее теплового поля. Проведен анализ различных моделей, приведены преимущества и недостатки этих моделей при моделировании теплового поля.*

Ключевые слова: *Тепловая модель тела человека, тепловое поле человека, теплопроводность, метаболическое генерирования тепла, терморегуляция человека.*

Summary. *The multi-segment models of the human body designed for the investigation of its thermal field have been considered. The analysis of different models was carried out, the advantages and disadvantages of these models for thermal field modeling were presented.*

Key words: *Thermal model of a human body, human thermal field, thermal conductivity, metabolic heat generation, human thermoregulation.*

Вступ. Багатошарові теплові моделі тіла людини (такі як модель Лефевра – сфера, модель Гадже – циліндр) представляють тіло людини як багатошарову систему, що має складний теплообмін з навколишнім середовищем. Тіло людини представлене як генератор тепла, який через зовнішній шар – шкіру виділяє тепло у зовнішнє середовище конвекцією, випаровуванням, випромінюванням, диханням. Зрозуміло, що з розвитком інформаційних технологій теплові моделі стають складнішими, до моделі вводяться додаткові вузли (модель Харді-Столвіка) «нижні кінцівки» (ноги, стопи), «верхні кінцівки» (руки, долоні) [7]. Такі багатоелементні чи багатосегментні моделі краще описують просторовий розподіл тепла в окремих елементах тіла.

У багатоелементній моделі, людське тіло зображується як кілька частин, таких як голова, тулуб, дві руки, дві ноги. Своєю чергою кожен елемент складається із кількох шарів.

Першою багатоелементною моделлю стаціонарного стану є модель Вісслера, розроблена в період між 1961 і 1985, яка складалася з 6 (а пізніше з 15) елементів, з'єднаних судинною системою [8]. Вісслер розширив модель передпліччя Пенне, щоб отримати розподіл температури всього

тіла. На доповнення до моделі Пенне, Вісслер взяв до уваги втрати тепла через дихання і теплообмін протилежних потоків між великими артеріями і великими венами. Судинна система складається з артерій, вен і капілярів, а також температури крові артерій і вен вважаються однорідними. Кров циркулює від серця (у верхній частині тулуба) через артерії до артеріального басейну кожного елемента і далі в капіляри кожного елемента. З капілярів, кров циркулює у венозний басейн елемента і назад до серця. Зв'язок між елементами був тільки через макроциркуляцію.

Модель складається зі з'єднаних між собою циліндрів. Тіло людини поділяється на шість циліндрів: голова, тулуб, дві руки і дві ноги. Передбачається, що кожен елемент має рівномірно розподілене генерування метаболічного тепла, рівномірну подачу крові, однорідні та ізотропні циліндри. Елементи складаються з чотирьох концентричних шарів: кісток, м'язів, жиру і шкіри. Стійкий стан біо-теплового рівняння вирішено аналітично для кожного циліндра. У шарах шкіри, втрата тепла відбувається за рахунок конвекції, випромінювання та випаровування [1].

У 1963 році Вісслер розробив другу версію своєї моделі. Вона є складнішою, ніж попередня. Друга версія моделі Вісслера враховувала багато важливих чинників, таких як мінливість швидкості локального кровотоку, теплопровідність, швидкість локального виробництва тепла метаболічних реакцій, геометрію людського тіла, втрати тепла через дихальну систему, пітливість. Ці фактори не розглядалися попередніми дослідниками. Ця нестаціонарна модель є продовженням моделі Уіндхема і Аткіна, яка представлена тільки одним елементом. Вона була розроблена в 1963 [5]. На відміну від першої версії, друга версія містила додаткові умови, що описують теплообмін між кров'ю і тканиною як в капілярах, так і у великих кровоносних судинах.

Метод кінцевих різниць, який використовується в другій версії, дозволив Вісслеру значно розширити свою модель. Тіло розділено на 15

елементів для подання голови, грудної клітки, черевної порожнини, проксимальних, медіальних і дистальних відділів рук і ніг. Кожен елемент розділений на чотири шари: ядро, м'язи, жирова тканина і шкіра. Крім того, кожен елемент має три частини судинної системи, серед яких є артерії, вени, і капіляри. Великі артерії та вени моделюються за допомогою басейну артеріальної крові і басейну венозної крові, відповідно. Метаболічні реакції вважаються основним джерелом тепла [6].

У другій версії моделі Вісслера, рівняння енергетичного балансу записані для кожної тканини в кожному елементі і включають в себе збереження тепла, метаболічне генерування тепла, конвективний перенос тепла за рахунок кровотоку в капілярах, артеріальні і венозні басейни, кондуктивну теплопередачу в радіальному напрямку або напрямку нормалі до середньої лінії тіла. Провідність через поздовжню і тангенціальну осі знехтувані. Ідеальна передача тепла передбачається між капілярами і навколишньою тканиною. Явна і прихована втрата тепла за рахунок дихання діляться порівну між головою і грудною кліткою. Процеси теплообміну з навколишнім середовищем за допомогою конвекції, випромінювання та випаровування вологи включені в якості граничних умов на поверхні шкіри [6].

Вісслер використав у цій моделі неявний метод скінчених різниць Кранка-Ніколсона. Радіальна відстань від кожного елемента була розділена на 15 точок і спільні рівняння кожного елемента були вирішені шляхом багаторазового використання методу виключення Гаусса.

Друга версія моделі Вісслера має багато переваг у порівнянні з попередніми моделями. По-перше, автор покращує моделі Гадже і Столвіка в ряді способів. Пасивна система, яка використовується, є деталізованим поданням температурних профілів в людському тілі. Кровоносна система, яка складається з поділу кровоносних судин на артерії, капіляри і вени, є більш реалістична, ніж в будь-якій іншій моделі.

Крім того, кожен елемент взаємодіє з сусіднім елементом через потік крові, на відміну від моделі Столвіка, де кожен шар тканини, взаємодіє тільки з центральним басейном крові. Крім того, модель Вісслера призначена для широкого спектру застосувань, наприклад, глибоководних занурень. І, нарешті, розв'язок системи рівнянь для контролю швидкості потоку крові і показників метаболізму ґрунтується на потребі кисню організму. Цей підхід є більш точним, ніж будь-який попередній метод.

Тим не менш, він також обмежений у застосуванні тим, що включає однакові умови навколишнього середовища, що оточують кожну окрему частину тіла. Іншим недоліком є те, що залишається неясним, які методи були використані для визначення значень змінних і констант, які використовуються в моделі Вісслера [6].

Аркін і Шітцер розробили ще одну модель терморегуляції в людському тілі. Вони змоделювали пасивну і активну системи теплової системи людини. У цій моделі тіло ділиться на 14 циліндрів, які в свою чергу поділяються на чотири радіальні шари. Ця модель є двовимірною моделлю в радіальному і тангенціальному напрямках. Модель бере до уваги швидкість повітря, втрати при випромінюванні тепла, теплообмін шляхом конвекції і випаровування поту.

Модель Фіала та ін., яка розроблена у 1999 р. складається з 2 частин: пасивної та активної. Пасивна частина моделює явища теплопередачі і перерозподілу тепла в організмі, у тому числі теплових ефектів кровообігу, теплової енергії, накопичення і перенесення у шарах тканини. Модель взаємодіє з навколишнім середовищем шляхом конвекції, короткохвильового і довгохвильового випромінювання, дихання, випаровування шкіри і дифузії водяної пари. У вихідній моделі, ізоляційний ефект одягу був розглянутий за допомогою адаптації місцевого коефіцієнту теплопередачі відповідно до методу [1].

Пасивна модель людської теплової системи являє собою

багатосегментне багатошарове представлення людського тіла з просторовими підрозділами. У моделі Фіала тіло людини розділене на 15 циліндрів, що представляють нижню і верхню частину тулуба, шиї, плечей, та нижні і верхні кінцівки, і поєднання циліндра для обличчя та сфери для голови. Кожен циліндр і сфера побудовані з п'яти (обличчя, грудна клітка і живіт) або чотирьох шарів (інших елементів тіла), які представляють 7 різних матеріалів тканин: головний мозок, легені, внутрішні органи, кістки, м'язи, жир і шкіру.

Шкіра моделюється як два шари: внутрішній і зовнішній шар. Метаболічне генерування тепла, а також перфузія крові відбувається у внутрішньому шарі шкіри. Зовнішній шар шкіри імітує паровий бар'єр для дифузії вологи через шкіру. Крім того, циліндри розділені просторово на три сектори: передній, задній і боковий, за допомогою яких можуть бути змодельовані асиметричні граничні умови (наприклад, неоднорідні радіаційні поля). Передні і задні сектори дозволяють лікування бічних навколишніх асиметрій. Бокові сегменти представляють сторони тіла, які «приховані» іншими частинами тіла і, отже, скорочують променевий теплообмін з навколишнім середовищем.

Система кровообігу складається з трьох основних компонентів: центральний басейн крові, обмін тепла протилежних потоків, і капіляри в окремих вузлах тканини. Кров тече з центрального басейну по великих артеріях до частин тіла. По дорозі кров охолоджується через втрату тепла протилежних потоків крові в сусідніх судинах. Артеріальна кров обмінюється теплом конвекцією в капілярних руслах. Венозна кров збирається в основних венах і повторно нагрівається теплом від суміжних артерій, коли вона тече назад в центральний басейн крові. Вона змішується з кров'ю інших елементів для отримання нової температури крові в центральному басейні. При розрахунку перфузії крові передбачається (перший принцип Фіка), що теплообмін відбувається з тканиною в

капілярних руслах і тепло не акумулюється в кровотоці.

Інша дуже складна математична багатосегментна теплова модель людини розроблена Саллум та ін. [4]. Пасивна модель ділить тіло на 15 циліндричних сегментів. Кожен сегмент тіла складається з чотирьох вузлів: ядро, шкіра, артеріальна кров і венозна кров. У будь-якому елементі тіла, кров, що виходить з артерії і тече в капіляри ділиться на кров, яка тече в ядрі (теплообмін шляхом перфузії в ядрі) і кров, що протікає в шарі шкіри (теплообмін шляхом перфузії в шкірі). Модель розраховує швидкість потоків кровообігу на основі точних фізіологічних даних та реальних розмірів і анатомічних позицій артерій в організмі.

Висновки. Зроблено огляд багатосегментних моделей тіла людини, що використовуються в процесі моделювання її теплового поля. У таких моделях виконано розбиття на сегменти: голова; тулуб; верхня кінцівка (ліва, права): плече, передпліччя, кисть; нижня кінцівка (ліва, права): стегно, гомілка, стопа. За рахунок цього багатосегментні моделі тіла людини дозволяють точніше (порівняно з багатошаровими) моделювати просторовий розподіл тепла у людському тілі.

Література

1. Fiala D. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system / D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohrer. – J Appl Physiol 87, 1999. – pp. 1957-1972.
2. Fiala D. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature response to a wide range of environmental conditions / D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohrer. – International Journal of Biometeorology, Vol. 45, 2001. – pp. 143–159.
3. Katic K. Thermophysiological models and their applications: A review / Katarina Katic, Rongling Li, Wim Zeiler // Building and Environment, 2016, Vol.106, pp. 286-300.

4. Salloum M. A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models / M. Salloum, N. Ghaddar, K. Ghali. – International Journal of Thermal Sciences, 46(4), 2007. – pp. 371-384.
5. Shitzer A. Thermal protective garment using independent regional control of coolant temperature / A. Shitzer, J.C. Chato, B.A. Hertig. – Aerospace Medicine, 44(1), 1973. – pp. 49-59.
6. Smith C. A transient, three-dimensional model of the human thermal system / C.A. Smith. – International conference on human-environment system, Tokyo, 1991. – pp. 287-290.
7. Stolwijk J. A. J. A mathematical model of physiological temperature regulation in man / J. A. J. Stolwijk. – Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1971. – 77 p.
8. Wissler E.H. A review of human thermal models. Environmental Ergonomics / E.H. Wissler. – Taylor & Franics, London. 1988. – pp. 267–285.