

**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**

*Ph.D., Associate Professor  
Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity  
Lviv Polytechnic National University*

**Казимира Ирина 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**

*Ph.D., Associate Professor  
Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity  
Lviv Polytechnic 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**

*Ph.D., Associate Professor  
Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity  
Lviv Polytechnic National University*

**ОГЛЯД БАГАТОШАРОВИХ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ТІЛА ЛЮДИНИ  
ОБЗОР МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА  
OVERVIEW OF MULTILAYER THERMAL MODELS OF A HUMAN BODY**

**Анотація.** Зроблено огляд багат шарових моделей тіла людини для дослідження її теплового поля. Проведено аналіз моделей різних дослідників, наведено переваги та недоліки цих моделей.

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

**Аннотация.** Сделан обзор многослойных моделей тела человека для исследования ее теплового поля. Проведен анализ моделей различных исследователей, приведены преимущества и недостатки этих моделей.

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

**Summary.** An overview of the multilayer models of the human body for the study of its thermal field was made. The analysis of models of different researchers was carried out; advantages and disadvantages of these models are presented.

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

**Вступ.** Математичне моделювання завжди застосовувалося в наукових дослідженнях і поступово охоплювало все нові області наукових знань: технічне конструювання, будівництво і архітектуру, астрономію, фізику, хімію, біологію, медицину. Моделювання використовують тому, що більшість об'єктів важко або взагалі неможливо досліджувати безпосередньо інструментально, або ж це дослідження потребує багато часу і засобів дослідження.

В медичних дослідженнях вчені були зацікавлені фізіологічними системами людини і їх частинами. Вони намагалися знайти найбільш точну модель теплового поля людини для моделювання реакцій при різних умовах навколишнього середовища. Математичне моделювання теплового поля людини розвивалося від простого до більш складного.

Розглянемо розвиток теплових моделей людини, починаючи від найпростішої, яка моделювала тіло людини як двошарову сферу, до сучасних моделей як багатошарових багатосегментних складних структур зі складним теплообміном із навколишнім середовищем.

Перша спроба представлення людського тіла з термодинамічної точки зору була зроблена Лефевром у 1911 році [3]. Лефевр представив тіло як сферу, в якій ядро виділяє тепло, а оболонка передає тепло в навколишнє середовище. Перша математична теплова модель, яка включала анатомію тіла і функцію управління була опублікована Бертоном в 1934 році [3].

Теплові моделі людини еволюціонували від одновузлової моделі до багатошарових циліндрів, що представляють окремі частини тіла, з'єднані циркулюючим потоком крові. Найбільш ранні теплові моделі, як правило, мали дуже наближену модель кровеносної системи, яка відповідала за приблизно 85% від внутрішнього теплообміну людини. Також у них була неправильна геометрія людського тіла.

**Історія розвитку багатошарових моделей.** Одним з найбільш ранніх дослідників в області математичного моделювання теплового поля людини був Пенне [8]. Він вперше змоделивав один з елементів людського тіла і розробив так зване рівняння теплопроводності для того, щоб розрахувати стаціонарний розподіл стану

температури в руці людини в 1948 р. Людське передпліччя було схоже на циліндр. Модель включала в себе провідність тепла в радіальному напрямку циліндра, метаболічне генерування тепла в тканині, конвекцію тепла через кровотік, втрату тепла через поверхню шкіри шляхом конвекції, випромінювання та випаровування. Важливість цього моделювання полягає в тому, що воно може бути застосовано до будь-якого елементу тіла у формі циліндра.

З 1960-х років дослідники почали створювати моделі всього тіла людини. У зв'язку з розвитком комп'ютерних технологій було зроблене вже більш складне моделювання людського тіла. Найбільш відомим є багатошарове моделювання тіла людини. До нього відносять моделі Уіндхема і Аткина, Кросбі та Гадже [8].

Першою із таких моделей була модель Уіндхема і Аткина, розроблена у 1960 р. [2]. У цій моделі людське тіло представлене одним циліндром, який розділений на ряд тонких концентричних шарів. Для розв'язання рівняння використано метод кінцевих різниць. Систему отриманих диференціальних рівнянь першого порядку вирішено за допомогою аналогового комп'ютера. На поверхні циліндра швидкість втрати тепла в навколишній простір розраховано сумою втрат тепла за рахунок конвекції, випромінювання та випаровування.

Недоліком цієї моделі є те, що Уіндхем і Аткін порівняли результати, отримані при застосуванні цієї моделі, з даними, опублікованими на той час, які мали обмежену точність. Крім того, ці роботи не включали в себе вплив кровотоку на передачу тепла всередині тканини.

Інша багатошарова модель розроблена Кросбі та ін. в 1963 році [2]. Однак, на відміну від інших моделей, Кросбі є першим вченим, який імітував фізіологічне регулювання температури всього тіла на аналоговому комп'ютері. Він апроксимував значення коефіцієнта теплопроводності тканини, швидкості обміну речовин, а також швидкості втрати тепла шляхом випаровування в залежності від середньої температури тіла. Крім того, Кросбі передбачив, що потік тепла відбувається в одному лише напрямку — від ядра до шкіри. Ця одномірною модель розділена на три шари: ядро, м'язовий шар і шар шкіри. Ядро є джерелом основного обміну,

а м'язовий шар є джерелом підвищеного метаболізму, викликаного фізичними вправами або тремтінням. На шарі шкіри, тепло втрачається через випромінювання, конвекцію і випаровування. У ядрі розглядаються тільки базальний рівень метаболізму і теплопровідності. Рівняння енергетичного балансу написані для кожного шару окремо [1].

Іншою відомою моделлю з зображенням людського тіла, як багатшарової системи, є модель Гадже (також називають модель Пірса), яка була розроблена в 1971 році [4]. Тіло представлено як один циліндр, який розділений на дві концентричні оболонки: зовнішній — шар шкіри і внутрішній — ядро, що представляє внутрішні органи, кістки, м'язи і підшкірну клітковину. Тому її називають моделлю «ядра і оболонки». Гадже припустив, що температура кожного шару є однорідною, тепло генерується всередині ядра і переноситься на шкіру через кров і провідність тканин.

Рівняння енергетичного балансу, написане для ядра і шкіри включає ефект зберігання тепла, теплообмін між сусідніми шарами тканини і конвективне перенесення тепла за рахунок кровотоку. У енергетичному балансі ядра розглядаються явна і неявна втрата тепла, викликана диханням і впливом метаболічного генерування тепла, що виділяється під час фізичних вправ і тремтіння. У шарах шкіри, відбувається теплообмін між поверхнею шкіри і навколишнім середовищем за рахунок конвекції, випромінювання та випаровування вологи. Всі вони включені в енергетичний баланс шкіри.

Гадже покращив модель в 1986 [4], додавши функції управління швидкістю кровотоку, швидкістю поту, швидкістю метаболізму при тремтінні і частину загальної маси призначену для шару шкіри (рис. 1).

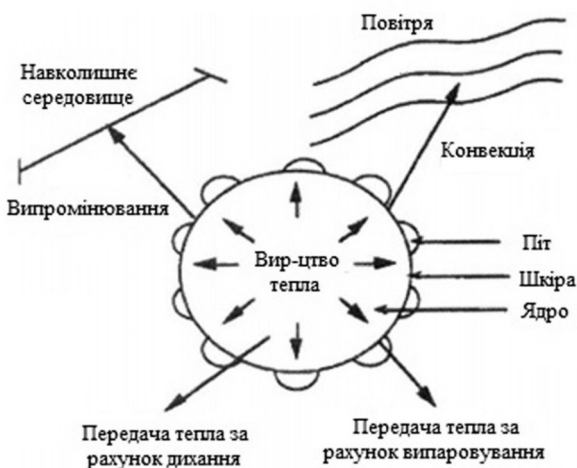


Рис. 1. Схематичний вигляд моделі Гадже [4]

Гадже розробив програму для розв'язування рівнянь енергетичного балансу для ядра і температури шкіри

в залежності від часу, використовуючи супроводжуючі рівняння управління, які є похідними від активної моделі. Умови навколишнього середовища і рівні активності визначаються користувачем. Ця програма передбачала тепловий відгук людини для моделювання протягом 15–60 хвилин. Це, як правило, застосовується під час помірних рівнів активності і рівномірних умов навколишнього середовища, описаних за допомогою сухого термометру при температурі в діапазоні від 5 °С–45 °С і відносній вологості до 10%. Модель Гадже є простою і легкою у використанні, але вона може бути застосована лише до ситуацій з помірним рівнем активності і однаковими умовами навколишнього середовища [6].

Одна з найвідоміших багатовузлових моделей є теплова модель Столвіка, створена у 1966 р. [7]. У моделі Харді-Столвіка розрізняють дві окремі системи терморегуляції: керуюча система і керована система, які на практиці дуже тісно переплітаються. Керована система є представленням тіла за допомогою теплових характеристик різних його частин. Керована система у цій моделі складається з шести сегментів, кожен з яких має чотири концентричні шари (шкіра, жир, м'язи, серцевина). Центральний басейн крові передає тепло між усіма іншими компонентами за допомогою конвективного теплообміну, що відбувається з потоком крові до кожного компонента. Кожен з двадцяти п'яти компонентів представлений рівнянням теплового балансу, яке обраховує теплообмін, що відбувається між сусідніми компонентами, тепло метаболізму, конвективний теплообмін з центральним басейном крові, втрати тепла випаровуванням і теплообмін з навколишнім середовищем, якщо компоненти знаходяться в безпосередньому контакті з навколишнім середовищем. У моделі Харді-Столвіка голова тіла людини представлена у вигляді сфери, а циліндрами представлені тулуб, руки, долоні, ноги, стопи. Обидві руки, долоні, ноги і ступні представлені одним циліндром кожен.

Схематичне зображення одного сегмента наведено на рис. 2, який показує взаємозв'язок між чотирма концентричними шарами.

Індекс I відноситься до сегменту, I=1 — це голова, I=2 — тулуб, I=3 — руки, I=4 — долоні, I=5 — ноги і I=6 — ступні. Індекс N використовується для позначення окремих компонентів так, що N=4\*I-3 завжди ідентифікує внутрішній шар із сегмента I, N=4\*I-2 представляє м'язовий шар, N=4\*I-1 шар підшкірного жиру і N=4\*I — це компонент шкіри сегмента I. Центральний басейн крові представлений N = 25.

На рис. 2 введено такі позначення: Q(N) — загальний обсяг виробництва метаболічного тепла в N; C(N) — теплоємність компонента N; TC(N) — теплопровідність між N та N+1; BF(N) — загальний потік ефективної крові N [7].

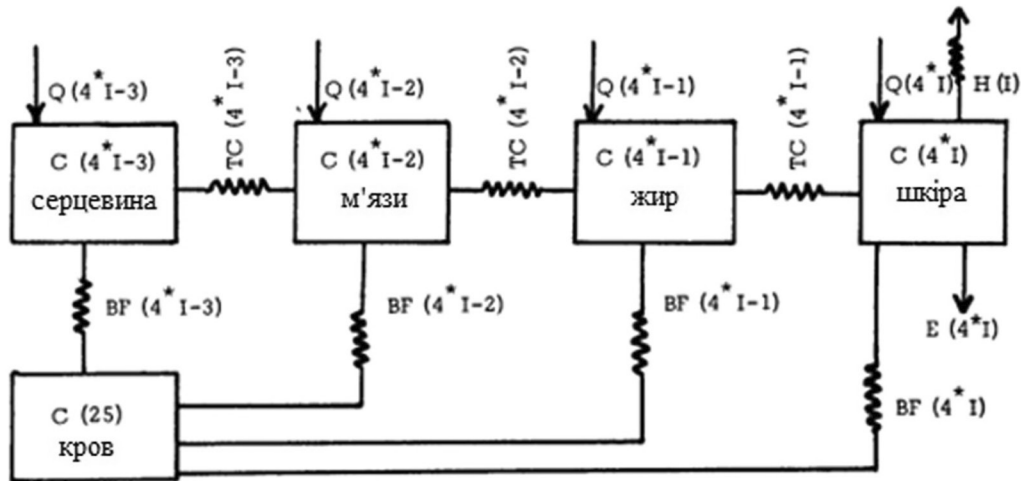


Рис. 2. Схематична діаграма чотирьох компонентів сегмента I [7]

Модель Столвіка сильна в багатьох аспектах. По-перше, вона здатна розрахувати просторовий розподіл температури в окремих елементах тіла. По-друге, модель Столвіка пов'язує ці окремі елементи через кровотік в артеріях, венах, і, таким чином, пропонує покращене представлення системи кровообігу і його вплив на розподіл тепла всередині тіла. За допомогою цих удосконалень, модель Столвіка дає інформацію, що описує загальну теплову реакцію організму, а також місцеві реакції в різних умовах навколишнього середовища та фізичної активності.

Однак, крім цих переваг, існує ряд недоліків в описі моделі Столвіка. Ця модель не враховує вплив швидкості зміни температури шкіри на регулюючі системи. Крім того, місцевий вплив описується, як правило, без будь-якої теоретичної і експериментальної перевірки. І, нарешті, кондуктивний теплообмін розглядається тільки

в радіальному напрямку, або в напрямку, перпендикулярному до середньої лінії тіла. Нехтуючи градієнтами просторової температури тканини в кутових і осьових напрямках, він обмежив використання цієї моделі для моделювання тіла, включаючи однакові умови навколишнього середовища.

**Висновки.** Зроблено огляд багат шарових моделей теплового поля тіла людини. Перша модель, яку розробив Лефевр, представляє тіло як двох шарову сферу. В результаті проведеного аналізу виявлено, що перші з наведених моделей мають основний недолік — використання цих моделей обмежене однаковими умовами навколишнього середовища. Зокрема, це відноситься до моделей Уіндхема і Аткина, Кросбі, Гадже, Столвіка та Віслера. Інші складні моделі, такі як моделі Фіала та Саллум можуть застосовуватися в різних умовах навколишнього середовища і давати точні результати.

### Література

1. Cena, K. Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort / Cena, K. & Clark, J. A. // Elsevier Scientific Publishing Co., 1981. — 288 p.
2. Fan, L.T. A review on mathematical models of the human thermal system / Fan, L.T., Hsu, F.T., & Hwang, C.L. // IEEE Trans. Biomed. Eng., 1971, 18, pp. 218–234.
3. Fu, G. A Transient, 3-D Mathematical Thermal Model for the Clothed Human / Fu, G. // Kansas: Kansas State University, 1995. — 276 p.
4. Gagge, A.P. A standard predictive index of human response to the thermal environment / Gagge, A.P., Fobelets, A.P., & Berglund, L.G. // ASHRAE Transactions, 1986, 92(Part 2B, No.1), pp. 709–731.
5. Katic K. Thermophysiological models and their applications: A review / Katarina Katic, Rongling Li, Wim Zeiler // Building and Environment, 2016, Vol.106, pp. 286–300.
6. Smith, C. A transient, three-dimensional model of the human thermal system / Smith, C. // 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 / Stolwijk, J. A. J. // Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1977. — 82 p.
8. Wissler, E.H. A review of human thermal models / Wissler, E.H. // Environmental Ergonomics, 1988, pp. 267–285.