

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ПРАЦІВНИКА В ЗАХИСНОМУ ОДЯЗІ

Вступ

Основна функція спеціального одягу – захист працівників від шкідливого впливу виробничого навколишнього середовища. Спеціальний захисний одяг – головний вид засобів індивідуального захисту, який використовують практично в усіх виробничих галузях. Він забезпечує захист персоналу під час виконання щоденних, регламентних, ремонтно-профілактичних робіт, а також у разі аварійних і післяаварійних робіт. За типами конструктивного виконання захисний одяг (ЗО) поділяють на герметичний, ізолювальний, фільтрувальний і негерметичний технологічний [1].

Застосування нових матеріалів, сучасних технологій проектування і виготовлення дає змогу створити ЗО, який може забезпечити високий рівень захисту, надійності та комфортності під час експлуатації. Одяг повинен забезпечити відповідний мікроклімат у підодежному шарі, захист працівника від впливу несприятливих чинників зовнішнього середовища та не створювати негативних умов для нормальної життєдіяльності. Під час розроблення сучасних систем індивідуального захисту необхідно враховувати мікрокліматичні характеристики промислового середовища, основні робочі рухи і положення тіла працівника, рівень важкості та напруженості його праці. Це зумовлює необхідність аналізу багатофакторної моделі “Промислове середовище – захисний комплект – процес і результат діяльності – самопочуття та здоров’я працівника”. Ухвалення рішення про використання того або іншого виду ЗО необхідно здійснювати з урахуванням взаємозв’язків між виробом, працівником та умовами праці.

Захисний комплект створює навколо тіла людини мікроклімат, який залежить від кількох факторів: теплового стану людини, який обумовлено рівнем енерговитрат та індивідуальними властивостями; параметрів мікроклімату – температури, вологості, тиску, швидкості зміни повітря; властивостей одягу – конструкції, фізико-механічних і гігієнічних характеристик матеріалу; умов застосування – пакета матеріалів і одягу. У процесі трудової діяльності відбуваються постійні зміни зовнішніх кліматичних чинників, виду та рівнів впливу шкідливих і небезпечних факторів, характеру виконуваних робіт. Залежно від умов використання та забезпечення необхідного рівня захисту приймають рішення про використання того або іншого виду ЗО. Термін перебування в ізолювальному або герметичному ЗО, які виготовляють з полімерних матеріалів, зазвичай обмежений, зважаючи на можливе перегрівання або переохолодження людини. Загальною вадою, недоліком полімерних матеріалів є їхня незначна паро- і повітропроникність. Волога пара скупчується на внутрішньому боці матеріалу, а потім конденсується. Утворений конденсат зволожує внутрішній шар одягу, що різко знижує його теплозахисні властивості та створює дискомфортне відчуття у людини.

Наприклад, під час робіт на атомних електричних станціях (АЕС) України застосовують ЗО кількох видів: костюми та комбінезони з бавовни і поліпропілену; одно- і багатошаровий ізолювальний одяг з полівінілхлорид (ПВХ)-пластикату; герметичний з примусовою вентиляцією [2].

Параметри зовнішнього середовища такі: діапазон температур у приміщеннях АЕС становить від 18 до 60°C, зовні – від -20 до +40°C, вологість – від 30 до 98%, швидкість повітря, що обдуває людину в костюмі, може становити 0,1...0,4 м/с. Ступінь важкості робіт за рівнем енергетичних витрат і, відповідно, тепловиділення коливається від легких (менш як 200 Вт) до граничних навантажень (від 400 до 800 Вт), які можуть існувати під час аварійних ситуацій [2]. Проведення натурних випробувань на всьому діапазоні зміни впливових чинників – складна і затратна процедура. Для отримання характеристик теплообмінних процесів для окремого виду ЗО кількість таких натурних випробувань може досягати до кількох сотень. Нині висновок про придатність ЗО роблять на підставі результатів лабораторних досліджень і дослідного носіння під час нормальних атмосферних умов.

Розробка математичної моделі

Для вирішення проблеми з урахуванням багатофакторності ефективним є використання структурних математичних моделей і методів багатоцільової та крокової оптимізації, які дають змогу отримати обґрунтовані та однозначні рішення під час проектування і конструкторської розробки ЗО. Нині відома низка підходів і методів вирішення завдань з урахуванням кількох критеріїв. Найбільш перспективним є метод, який реалізує в рамках моделі “людина – комп’ютер” процедуру прийняття рішень. Відмінна риса такого методу полягає в тому, що для вирішення тих проблем, які не вдається здійснити математично, використовують знання про фізичну сутність процесів, що розглядаються. Такий підхід уможливує проведення частини випробувань за допомогою моделювання (обчислювальних “випробувань”).

Виробничий персонал може перебувати в різних умовах навколишнього середовища, які постійно змінюються. У цьому зв’язку теплообмінні процеси розраховують за ймовірних граничних умов довкілля та для всього діапазону комфортних і граничних температур тіла людини.

Підтримка температури тіла в межах норми відбувається за рахунок природних механізмів терморегуляції: звуження або розширення судин, потовиділення і довірних м’язових скорочень так, щоб компенсувати надлишок або недостачу теплоти, що виділяється в ядрі. У внутрішніх

органах і м'язах людини внаслідок процесів природного метаболізму відбувається виділення теплоти, залежне від інтенсивності виконуваних робіт.

Мета статті – розробка і верифікація математичної моделі теплового стану працівників під час застосування ізолювального захисного одягу.

Об'єктом досліджень є теплообмінні процеси організму людини, яка виконує роботи з різними рівнями важкості, із зовнішнім середовищем.

Предмет досліджень – розробка моделі для чисельного розрахунку динаміки зміни температури тіла людини під час роботи в захисному одязі.

Для досягнення окресленої мети необхідно розробити модель, яка адекватно відображає теплові процеси, що відбуваються в організмі людини. Моделювання теплових процесів людського організму є досить складним завданням, що пов'язано з аналізом складних процесів метаболізму і терморегуляції.

У працях [3–6] розглянуто питання побудови моделі і моделювання теплових процесів людського організму. Ці моделі різні за складністю, але в цілому мають один і той же підхід до проблеми. Моделювання здійснюється за окремими ділянками тіла людини і відображає основні властивості (об'єм, щільність, теплоємність) певної частини тіла людини. Взаємозв'язок між ділянками в моделях (назвемо їх розрахунковими вузлами) забезпечується тепловими зв'язками, які моделюють реальні умови теплообміну теплопровідністю, конвекцією і масообміном між окремими частинами тіла, шарами одягу, а також на лінії поділу одяг – зовнішнє середовище. Складність таких моделей визначається кількістю вузлів і теплових зв'язків, а міра деталізації моделі залежить від конкретного завдання і точності, з якою має бути отримано її рішення. Так, у [3] людський організм моделюється за допомогою 51-го вузла, в [4] за допомогою 15 вузлів, у [5] – всього 2-х вузлів. Надмірне уточнення математичної моделі не завжди має сенс. Особливість таких моделей – використання статистичних параметрів, отриманих експериментально за обмеженої кількості дослідних даних, що пов'язано з певною неоднозначністю, невизначеністю та неточністю вихідної інформації. Якщо математична модель складна, то доводиться вдаватися до різних обчислювальних методів, що призведе до неминучих похибок. Такі два чинники можуть нівелювати всі ті переваги, які досягають під час створення дуже точної математичної моделі.

Пропонується математична модель з багатоструктурною побудовою, кількість вузлів якої визначають залежно від комплектності засобів захисту, пакета одягу, його конструктивного і технологічного виконання. Обрано середній рівень складності моделі, в якій враховано середні температури ядра і шкіри людини та детальну структуру одягу, оскільки аналіз типів і структури одягу буде головним завданням цієї моделі. Модель передбачаємо використовувати для оцінки тривалості роботи людини в ЗО у певних діапазонах параметрів зовнішнього середовища та різних рівнях важкості робіт.

Процеси в організмі людини моделюють двома вузлами, що умовно ділять на дві частини – теплове ядро, в якому відбувається основне виділення теплоти, і поверхня тіла. Теплота, що виділяється від ядра, переноситься до поверхні за рахунок теплопровідності і масообміну. Теплота, отримана від ядра, виділяється у підкостюмний простір, взуття, рукавички, лицьові маски респіраторів, прошарки повітря між шарами одягу та інші захисні засоби і зрештою – докільця (рис. 1). На поверхні одягу і на лінії поділу одяг – зовнішнє повітря умови теплопередачі суттєво змінюються. Температура на цій ділянці змінюється стрибкоподібно. Певна частина теплоти також віддається організмом під час нагрівання повітря і випарювання вологи в легенях під час дихання.

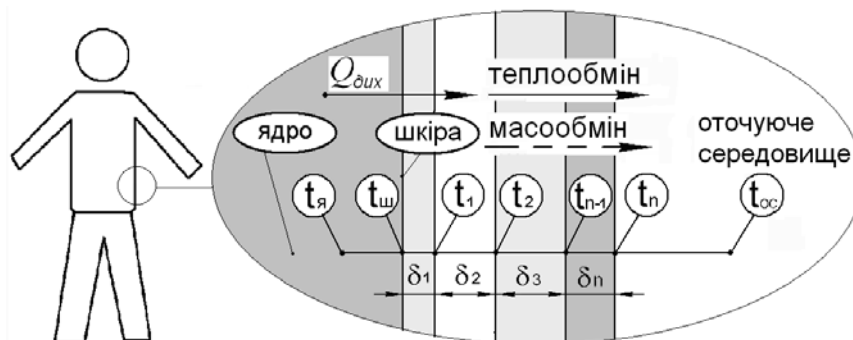


Рис. 1. Схема теплообміну людини у ЗО із зовнішнім середовищем

Відомо [7], що для комфортного самопочуття людини температура ядра повинна підтримуватися в рамках вузького діапазону температур 37,2–38°C, а підвищення її на величину близько півтора градусів може призвести до суттєвого погіршення самопочуття і втрати працездатності. Механізми терморегуляції під час моделювання враховують при встановленні взаємозв'язків між розрахунковими вузлами за допомогою параметрів термічного опору, який є функцією температури ядра.

Таким чином, формуємо розрахункову математичну модель тепломасообміну між працівником і зовнішнім середовищем, яка встановлює взаємозв'язок між середньою температурою ядра та поверхні тіла людини, властивостями ЗО та їхнім впливом на самопочуття людини.

Для попередніх розрахунків за цією моделлю приймаємо такі допущення: температура ядра і всієї поверхні тіла людини однакова по всьому об'єму і поверхні; тепловиділення рівномірно розподілено всередині тіла людини.

Для 1-го вузла (теплове ядро людини) з температурою t_j рівняння балансу теплоти між ядром і поверхнею шкіри t_{ju} має вигляд:

$$C_j \frac{dt_j}{d\tau} = Q_{v1} + Q_{oux} + \frac{1}{R_{juu}}(t_j - t_{ju}), \quad (1)$$

де Q_{v1} – теплота, що виділяється в тепловому ядрі тіла людини, яка залежить від рівня важкості робіт, Вт;

Q_{oux} – теплота, що віддається диханням, Вт;

R_{juu} – термічний опір зв'язку між ядром і поверхнею шкіри, К/Вт.

Загальну кількість теплоти, яка витрачається на підігрівання вдихуваного повітря до температури тіла та на випарування вологи з легень, визначаємо за формулою:

$$Q_{oux} = G_{oux} \cdot [m_{нас} (100\% - v_{вд}) \cdot r_n + c_p \rho (t_j - t_{oc})], \quad (2)$$

де G_{oux} – об'ємна витрата повітря, що проходить через легені, м³/с;

$m_{нас}$ – маса води, що міститься в одному м³ насиченого вологого повітря, кг/м³;

r_n – теплота пароутворення води, Дж/кг; $v_{вд}$ – відносна вологість повітря, %;

c_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг К); ρ – густина повітря, кг/м³.

Для вузла поверхні людини (шкіри) з температурою t_{ju} рівняння балансу теплоти між ядром, поверхнею шкіри і першим шаром одягу запишемо:

$$c_u \rho_u v_u \frac{dt_{ju}}{d\tau} = \frac{1}{R_{juu}}(t_{ju} - t_j) + \frac{1}{R_{ju1}}(t_{ju} - t_1), \quad (3)$$

де R_{ju1} – термічний опір тепловому зв'язку між поверхнею шкіри і першим шаром одягу з температурою t_1 .

Передбачається, що кількість шарів одягу може бути різною (n шарів, див. рис. 1), у загальному випадку вираз для температури i -го внутрішнього шару одягу ($i = 2, 3 \dots (n-1)$) запишемо:

$$c_i \rho_i v_i \frac{dt_i}{d\tau} = \frac{1}{R_{ii-1}}(t_i - t_{i-1}) + \frac{1}{R_{ii+1}}(t_i - t_{i+1}), \quad (4)$$

де c_i – питома теплоємність, Дж/(кг К); ρ_i – щільність матеріалу i -го шару; v_i – об'єм i -го шару;

t_{i-1} та t_{i+1} – температури попереднього і наступного шарів відповідно;

R_{ii-1} – термічний опір між i -м та $(i-1)$ шарами одягу;

R_{ii+1} – термічний опір між i -м та $(i+1)$ шарами одягу.

Термічний опір i -го шару одягу визначаємо за формулою:

$$R = \frac{\delta}{\lambda S}, \quad (5)$$

де δ – товщина шару, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м К);

S – площа поверхні теплообміну, м².

Коефіцієнт теплопровідності для бавовняних матеріалів змінюється в діапазоні від 0,038 до 0,081 Вт/(м К), для полімерних матеріалів (поліетилену, ПВХ-пластикату) – 0,276...0,285 Вт/(м К). Величина коефіцієнта не постійна і змінюється залежно від вологості, температури повітря, об'ємної ваги, повітропроникності матеріалу, напрямку теплового потоку. Наявність води у порах матеріалу знижує тепловий опір, що зумовлено підвищеним коефіцієнтом теплопровідності води –

0,58 Вт/(м К). Теплопровідність повітря незначна ($\lambda=0,02$ Вт/(м К), і наявність навіть дуже тонких прошарків суттєво збільшує термічний опір.

Для зовнішньої поверхні одягу з температурою t_n справедливий вираз :

$$c_n \rho_n v_n \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{1}{R_{m-1}} (t_n - t_{n-1}) + \left(\frac{1}{R_{\text{конв}}} + \frac{1}{R_{\text{пром}}} \right) (t_n - t_{oc}), \quad (6)$$

де $R_{\text{конв}}$ та $R_{\text{пром}}$ – термічні опори конвекції і радіаційного теплообміну поверхні одягу з довкіллям, які обчислюються за формулами:

$$R_{\text{конв}} = \frac{1}{S \cdot 1,66 \cdot \sqrt[3]{(t_n - t_{oc})} + 60 \frac{v_e^2}{l}}, \quad (7)$$

$$R_{\text{пром}} = \frac{1}{\varphi_{ij} \cdot S \cdot 5,67 \cdot \left(\left(\frac{t_i + 273}{100} \right)^2 \left(\frac{t_j + 273}{100} \right)^2 \right) \cdot \left(\left(\frac{t_i + 273}{100} \right) \left(\frac{t_j + 273}{100} \right) \right) \cdot \frac{1}{100}}, \quad (8)$$

де S – площа поверхні костюма, м²; v_e – середня швидкість повітря в поверхні костюма, м/с;
 l – характерний розмір, м;
 φ_{ij} – кутовий коефіцієнт радіаційного теплообміну поверхні костюма.

Таким чином, система рівнянь (1) – (8) описує математичну модель нестационарного теплообміну працівника в багат шаровому ЗО із зовнішнім середовищем. Розв'язання системи диференціальних рівнянь здійснено чисельно за допомогою методу кінцевих різниць. У результаті розрахунку отримано значення температур і теплових потоків у всіх вузлах моделі – ядрі, на поверхні шкіри людини, у шарах одягу і на лінії поділу одяг – зовнішнє повітря.

З метою попередньої верифікації математичної моделі здійснено експерименти для двох режимів:

- робота людини в ізолювальному ЗО з помірним рівнем навантаження. У процесі першого експерименту працівник виконував роботу (переміщення вантажів сходами) упродовж 24 хвилин за температури зовнішнього середовища 23°C. Температуру вимірювали під пахвою людини, яка на 0,6...0,8°C нижча за температуру ядра людини [7]. Пакет одягу для захисту від рідких радіоактивних забруднень складався з п'яти шарів – натільна білизна, комбінезон з бавовни, куртка з ПВХ-пластикату і два прошарки повітря;
- охолодження людини в бавовняному костюмі під час виконання легкої роботи за умов зниженої температури зовнішнього середовища.

У результаті експериментів отримано часовий діапазон зміни температури тіла та шкіри людини.

Під час моделювання було задано такі значення параметрів моделі: потужність тепловиділення становила 270...315 Вт; товщина шарів комбінезона і куртки – 0,1 і 0,5 мм відповідно; коефіцієнт теплопровідності для обох шарів 0,05 і 0,285 Вт/(м К); повітропроникність ПВХ-пластикату – 17,0 дм³/(м² с); паропроникність ПВХ-пластикату – 0,2 мг/(см² с). Повні термічні опори (з урахуванням площ) становили: шкіра – перший шар – 0,00216 (К/Вт); другий шар – 0,00541 (К/Вт). У рівнянні (2) об'ємна витрата повітря, що проходить через легені, змінювалася залежно від інтенсивності роботи [7] і перебувала в межах 2,5...2,8 м³/год. Газообмін між людиною та зовнішнім середовищем унаслідок незначної паропроникності куртки не враховувався. Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні куртки в зовнішнє середовище, що входить в (7), становив 4...5 Вт/(м² К), температура на поверхні одягу на 0,5...1°C вища від зовнішньої і становила 23,5...24,5°C.

Динаміку зміни температури тіла працівника, отриману в результаті експерименту та під час моделювання, наведено на рис. 2.

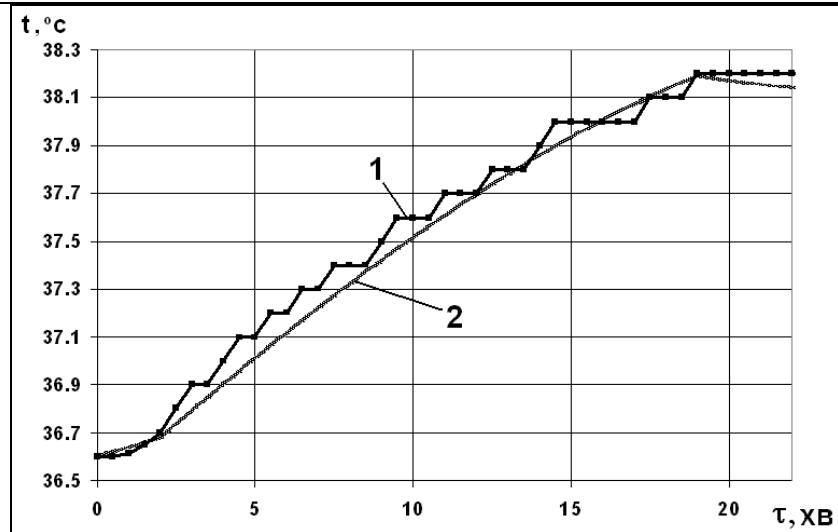


Рис. 2. Залежність середньої температури тіла працівника від часу під час нагрівання
1-експериментальна; 2 – розрахункова

Максимальне відхилення експериментальних даних від розрахункових складає близько $0,11^{\circ}\text{C}$, що свідчить про добрий збіг результатів.

У процесі другого експерименту замірювали температуру на поверхні шкіри працівника, одягнутого в костюм з бавовняного матеріалу, під час виконання легкої роботи (людина перебувала в положенні сидячи). Температура зовнішнього повітря становила 15°C , швидкість вітру – $0,1$ м/с. Під час експерименту та моделювання отримано результати, наведені на рис. 3.

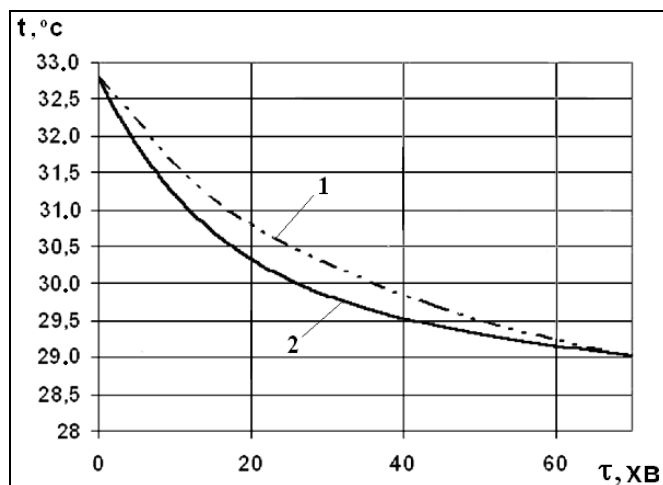


Рис. 3. Залежності середньої температури поверхні тіла працівника від часу під час охолодження
1 – експериментальна; 2 – розрахункова

З рис. 3 випливає, що запропонована методика моделювання прийнятна й до процесів охолодження організму працівника під час виконання робіт в умовах знижених температур.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель теплового стану працівників, які виконують роботу в шкідливих і небезпечних умовах із застосуванням комплектів засобів індивідуального захисту.
2. На основі запропонованої моделі, яка враховує середні температури ядра і поверхні шкіри людини, детальну структуру ЗО, отримано аналітичні залежності теплового стану людини від рівня важкості праці та параметрів зовнішнього середовища.
3. Здійснено верифікацію моделі порівнянням результатів моделювання з експериментальними даними. Зіставлення динаміки зміни температури в часі показало адекватність розробленої моделі.

Література

1. Средства индивидуальной защиты работников (классификация, качество, гармонизация нормативных документов) / [Воробьев В.Д., Карнаух Н.Н., Рурикевич В.Б., Сорокина Т.Ю. и др.]; под ред. Н.А. Лысюка и Ю.Г.Сорокина. – К.: ННИОТ, 2005. – 83 с.
2. Литвиненко Г.Е., Третьякова Л.Д. Засоби індивідуального захисту: виготовлення та застосування. – К.: Лібра, 2008. – 317 с.
3. Edward A. Kurmazenko, Timofey V. Matjushev, Nikolay V. Soloshenko. A detailed simulation model of the human organism thermoregulation system. Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, Noordwijk, Netherlands, 20–22 May, 1997.– SP-400, 1997. – p. 815 – 821.
4. Dusan Fiala, Kevin J. Lomas, and Martin Stohrer. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system; J. Appl. Physiol. 1999. – № 87.– p. 1957 – 1972.
5. Matjaz Prek. Thermodynamical analysis of human thermal comfort. Energy, 2006. – 31.– p. 732 – 743.
6. Anne M.J. Claessens-van Ooijen, Klaas R. Westerterp, Loek Wouters, Paul F.M. Schoffelen, Anton A. van Steenhoven and Wouter D. van Marken Lichtenbelt. Heat Production and Body Temperature During Cooling and Rewarming in Overweight and Lean Men. Obesity (2006) 14, doi: 10.1038/oby, 2006.– 223 p.
7. Литвинова Г.О. Гігієна з основами екології. – К.: Здоров'я, 1999. – 368с.