

В. А. Глива<sup>1</sup>, О. В. Землянська<sup>2</sup>, О. С. Ільчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського" Київ, Україна

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ЗАХИСТУ ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ПОЗАРЕГЛАМЕНТНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

**Анотація.** Захист працюючих в умовах позарегламентних (екстремальних) температур (низьких та високих) вимагає наявності ефективних захисних матеріалів та одягу з них. Для раціоналізації термозахисту доцільне попереднє оцінювання його ефективності за тих чи інших умов, що можливо здійснити розрахунковими методами. Для цього використане базове рівняння теплопровідності у одномірному вигляді. За наявності даних про товщини, питомі теплоємності, густини та коефіцієнти теплопровідності біологічних тканин (шкіри, кістки) можливе розрахування потрібної ефективності та параметрів матеріалу захисного шару. Для цього надано метод розрахунку коефіцієнтів теплопровідності кожного з шарів, крізь які відбувається теплоперенесення. Для числового розв'язання моделюючого рівняння використано явну різницеву схему. Отримані залежності надають значення коефіцієнтів теплопровідності на межах шарів з різними теплофізичними параметрами. Кількість вузлів за обраною віссю та крок сітки обирається у кожному конкретному випадку, виходячи з потрібної точності розрахунку. Враховуючи можливі розбіжності у значеннях сталих та коефіцієнтів, а також неоднозначність зовнішніх атмосферних впливів у розрахунки необхідно закладати певний запас ефективності захисту.

**Ключові слова:** температурний вплив, теплопровідність, захист, коефіцієнт теплопровідності.

### Вступ

Температурний режим є важливим показником стану виробничого середовища. Як низькі, так і високі (екстремальні) температури негативно впливають на стан здоров'я, працездатність та розумову діяльність людини. Тому забезпечення належного теплового захисту працюючих є актуальною практичною задачею. Зокрема, вимоги щодо захисту персоналу від впливу низьких температур регламентується міжнародним стандартом ISO 15743 [1]. Забезпечення належного термозахисту є багатоплановою задачею. Крім обрання матеріалів достатньої (мінімальної) теплопровідності необхідно враховувати конкретні умови теплопередачі – градієнт температури, вологість повітря за даної температури тощо. Тому доцільно розглянути можливість простого розрахунку потрібного термозахисту. При цьому слід враховувати, що процеси теплопередачі обертові, тобто захисти людини від впливів низьких та високих температур принципово не відрізняються. Головну роль відіграють напрямки передачі теплової енергії. Це надає можливість сформулювати простий у використанні та прийнятний за похибкою математичний апарат з розрахунку потрібних параметрів елементів термозахисту.

**Огляд літературних джерел.** Більшість досліджень з регулювання теплового режиму людини стосуються захисту працюючих від впливу високих температур [2, 3]. Наведені у цих роботах моделі застосовують одномірне нестационарне рівняння теплопровідності. При цьому вважається, що теплоємності і теплопровідності є сталими величинами, що не завжди коректно. У роботі [4] досліджується вплив низьких температур на організм людини за великих експозицій, але не надано рекомендацій щодо нормалізації теплового стану. Оглядове дослідження [5] стосується температурної комфортності середовища з огляду на стать працюючого. У ґрунтовній роботі [6] розглянуто проблематику визначення комфортності середовища з точки зору процесів метаболізму.

Зокрема, розраховані прогнозовані коефіцієнти незадоволеності (PPD), усереднені показники незадоволеності умовами перебування (PMV) та їх зв'язок зі швидкістю метаболізму у спокої (RMR). Показано відмінності RMC для чоловіків і жінок. Але наведені дані отримані з емпіричних співвідношень і заздалегідь частково суб'єктивні. Тому доцільно, принаймні для працюючих у екстремальних (позарегламентних) умовах, розробити простий розрахунковий метод оцінювання потрібного термозахисту.

**Мета роботи** – розробити методологію розрахунку параметрів матеріалів, необхідних для захисту працюючих в умовах позарегламентних температурних впливів.

### Викладення основного матеріалу

У загальному випадку рівняння теплопровідності у тілі за відсутності внутрішніх джерел тепла таке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

Характер взаємодії тіла з оточуючим середовищем описується умовою:

$$a(t_1 - t_2) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінки,  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – температурний градієнт у стінці,  $a$  – коефіцієнт теплопровідності.

Приводячи рівняння (1) за стандартною процедурою до безрозмірного вигляду, можна дійти висновку, що безрозмірна температура залежить від (у даному випадку – товщина).

Аналіз рівняння (2), яке визначає умови теплообміну на межі розділу, методами теорії подібності свідчить, що подібність процесу теплообміну на межі тіла визначається критерієм Біо.

$$B_i = al/\lambda,$$

тобто, за конкретної форми тіла температурні поля  $\theta = f(x, y, z)$  будуть подібні, а температурне поле за нестационарної теплопровідності визначається узагальненим виразом:

$$\theta = f(F_0, B_i, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}),$$

де  $\bar{x} = x/l$ ,  $\bar{y} = y/l$ ,  $\bar{z} = z/l$ .

За настання у тілі регулярного режиму теплообміну, зміни температури за усією поверхнею стають однаковими для усіх точок. За будь-яких умов певні ділянки (частини) тіла можна вважати такими, що мають у кожний момент часу однакові температури. Рівномірність температурного поля підвищується зі зростанням коефіцієнта теплопровідності тіла і зі зниженням його коефіцієнта теплообміну з оточуючим середовищем. За  $B_i < 0,1$  з достатньою для практичного застосування похибкою температурне поле можна вважати рівномірним.

Для тіла об'ємом  $V$  і поверхнею контакту з зовнішнім середовищем  $S$  з рівномірним температурним полем визначено тепловий баланс за час  $d\tau$ . Надлишкова температура буде однаковою для усіх точок тіла. При цьому за  $d\tau > 0$  завжди  $d\theta < 0$ . За відсутності внутрішніх (або зовнішніх, у залежності від напрямку процесу) джерел тепла  $it_2 = \text{const}$  (2):

$$-V \rho C d\theta = a\theta S d\tau.$$

Записавши його у вигляді:  $\frac{d\theta}{\theta} = -m d\tau$ , де  $m$  ви-

значається як  $m = \frac{Sa}{V\rho C}$ , отримуємо:  $\ln \theta = -m\tau + C_i$ ,

що можна покласти у розрахунок теплового режиму тіла. Константа інтегрування  $C_i$  визначається з початкових умов у конкретних випадках. Коефіцієнт пропорційності  $m$  характеризує швидкість охолодження (або нагрівання). Вважаючи, що за  $\tau=0$

$$\theta = \theta', \quad C = \ln \theta', \quad C = \ln \theta', \quad \ln \theta = -m\tau.$$

Це співвідношення можна використовувати у практичних розрахунках для тіл будь-якої форми для  $B_i < 0,1$ . Безрозмірна надлишкова температура визначається як  $\bar{\theta} = \theta/\theta'$ .

У нерівномірному температурному полі закономірності охолодження та нагрівання мають таку ж форму, як і у рівномірному температурному полі, а особливості процесу враховуються величиною швидкості охолодження  $m$ . Якщо у будь-якій точці тіла, у якому встановився регулярний режим теплообміну, за час  $\tau$  з моменту початку процесу надлишкова температура дорівнює  $\theta_1$ , а за час  $\tau_2$  вона набула значення  $\theta_2$ , то

$$\ln \theta_1 = -m\tau_1 + C_i, \quad \ln \theta_2 = -m\tau_2 + C_i, \quad \ln \frac{\theta_2}{\theta_1} = -m\Delta\tau.$$

У більшості реальних процесів, пов'язаних з теплообміном людини з оточуючим простором, задача одномірна.

Наприклад, для дослідження процесу охолодження голови використовується наступне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}), \quad (3)$$

де  $T$  – температура;  $a_x$  – коефіцієнт температуропровідності;  $t$  – час.

Відзначимо, що в моделі приймається, що область дослідження складається з різних шарів, а саме, шкіра та кістка черепа людини, що відрізняються теплофізичними властивостями.

Розрахункова схема показана на рис. 1.

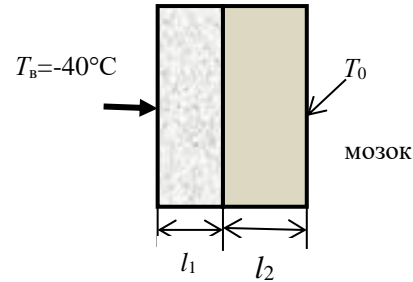


Рис. 1. Розрахункова схема шарів голови

Таким чином, фізична модель складається з двох шарів. Перший шар шкіри має такі фізичні параметри:

товщина шару  $l_1 = 3,2$  мм;

питома теплоємність  $C_1 = 3350$  Дж/(кг\*К)

густина  $\rho_1 = 1056$  кг/м<sup>3</sup>;

коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,48$  Вт/(м\*К).

Коефіцієнт температуропровідності для першого шару розраховується так:

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot C_1}.$$

Другий шар кістка черепа має такі фізичні параметри:

товщина шару  $l_2 = 4,5$  мм;

теплоємність  $C_2 = 1300$  Дж/(кг\*К);

густина  $\rho_2 = 1850$  кг/м<sup>3</sup>;

коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 0,53$  Вт/(м\*К).

Коефіцієнт температуропровідності для другого шару розраховується так:

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot C_2}.$$

Для моделюючого рівняння теплопровідності (3) ставляться такі граничні умови (рис. 1):

- на лівій межі (зі сторони навколишнього середовища) задається значення температури  $T = -40$  °С;

- на правій межі (всередині голови) задається значення температури  $T_0 = 36,6$  °С.

При проведенні розрахунків гранична умова з часом має вигляд:

$$T_{n-1} = T_n,$$

де  $T_n$  – це температура в останній розрахунковій клітинці;  $T_{n-1}$  – температура в попередній розрахунковій

комірці. Початкова умова при  $t=0$  в усій розрахунковій області приймається  $T=36.6$  °C.

Для проведення розрахунків використовується прямокутна різницева сітка. Значення температури визначається в центрах різницевих комірок. Для числового розв'язання моделюючого рівняння (3) використовується явна різницева схема [7].

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}, \quad (3)$$

де

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}, \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i}. \quad (5)$$

Залежності (4) та (5) використовуються для розрахунку значення коефіцієнта теплопровідності на межі шарів з різними теплофізичними параметрами. Кількість вузлів за віссю  $Ox$  та крок сітки обирається у кожному конкретному випадку, виходячи з необхідної точності прорахунку.

Перевагою такого підходу є можливість точного визначення потрібного теплозахисту, першого шару для отримання нормативних значень температури голови працівника.

Наявність даних про температуру зовнішнього повітря не завжди дає повне уявлення про калориметричні процеси у захисному шарі. Значний вплив на

процес теплопередачі може складати швидкість вітру, вологість повітря, від якої залежить його питома теплоємність.

Тому у розрахунках щодо захисту працюючих від температурних впливів необхідно закладати певний запас ефективності засобів захисту.

### Висновки

1. Для підвищення рівня захисту працюючих в умовах позарегламентних температурних впливів доцільне попереднє оцінювання ефективності засобів захисту. Це можливо за рахунок застосування розрахунків щодо визначення значень коефіцієнтів теплопровідності.

2. Розрахунки теплопровідності виконуються, виходячи з рівняння теплопровідності у одномірному вигляді. Для зниження похибки розрахунків необхідні дані щодо параметрів шарів, крізь які відбувається теплоперенесення. Це товщини, питомі теплоємності, густини і коефіцієнти теплопровідності кожного шару. Розрахунки надають можливість з прийнятною точністю визначити параметри захисного шару, який забезпечує нормативний тепловий режим тіла працюючого.

3. Враховуючи можливі розбіжності у значеннях необхідних констант та наявність побічних впливів на процес теплоперенесення, у розрахунки прогнозованого термозахисту необхідно додавати певний запас ефективності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. INTERNATIONAL ISO STANDARD 15743 First edition 2008-07-01 Ergonomics of the thermal environment — Cold workplaces — Risk assessment and management Ergonomie des ambiances thermiqes — Lieux de travail dans le froid — Évaluation et management des risques Reference number ISO 15743:2008(E).
2. Костенко Т. В., Костирка О. В. 2018. Пропозиції щодо покращення теплового стану в піддежному просторі рятувальника. Вісті Донецького гірничого інституту. - № 1. - С. 53-60. doi:10.31474/1999-981x-2018-1-53-60
3. Болібрux Б. В. 2017. Визначення граничного часу роботи пожежника в теплозахисному одязі на основі тривимірної моделі. Науковий Вісник ХНУ. – Хмельницький, – № 1. – С. 95-104.
4. Rintamäki H. 2007. Human responses to cold. Alaska Med.;49(2 Suppl):29-31
5. Karjalainen S. 2012. Thermal comfort and gender: a literature review. Indoor Air Apr;22(2):96-109. doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00747.x.
6. Schaudienst Falk & Vogdt, Frank. (2017). Fanger's model of thermal comfort: a model suitable just for men? Energy Procedia. 132. 129-134. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.658.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. (1977). Уравнения математической физики. «Наука». 736 с.

Received (Надійшла) 22.07.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.09.2022

### Methodology for determining the level of protection of workers in conditions of extraordinary temperature influences

V. Glyva, O. Zemlyanska, O. Ilchuk

**Abstract.** The protection of workers in conditions of non-regulatory (extreme) temperatures (low and high) requires the availability of effective protective materials and clothing made from them. To rationalize thermal protection, it is advisable to pre-evaluate its effectiveness under certain conditions, which can be carried out using calculation methods. For this, the basic equation of thermal conductivity in one-dimensional form is used. With the availability of data on thicknesses, specific heat capacities, densities and coefficients of thermal conductivity of biological tissues (skin, bones), it is possible to calculate the required efficiency and parameters of the material of the protective layer. For this purpose, a method of calculating thermal conductivity coefficients of each of the layers through which heat transfer occurs is provided. An explicit difference scheme was used for the numerical solution of the modeling equation. The obtained dependences provide values of thermal conductivity coefficients at the boundaries of layers with different thermophysical parameters. The number of nodes along the selected axis and grid step are chosen in each specific case, based on the required accuracy of the calculation. Taking into account possible discrepancies in the values of constants and coefficients, as well as the ambiguity of external atmospheric influences, it is necessary to include a certain margin of protection efficiency in the calculations.

**Keywords:** temperature effect, thermal conductivity, protection, coefficient of thermal conductivity.