

В. А. Глива, М. О. Довгановський

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ ОДЯГУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ТЕРМІЧНИХ ВПЛИВІВ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ТЕПЛА

Анотація. На основі фундаментальних співвідношень теплопровідності розроблено модель теплопередачі крізь декілька шарів текстильного та захисного матеріалу. Враховано наявність повітряних прошарків між окремими шарами матеріалів. Отримано зміни температур окремих шарів матеріалу, що дозволяє визначити номенклатуру текстильних матеріалів та захисних шарів у залежності від поставлених задач термоізоляції. Розроблена методологія дозволяє проєктувати одяг для захисту людей від зовнішніх термічних впливів та запобігати негативних змін у термічному режимі тіла людини. Отримані залежності щодо зміни температури зовнішньої поверхні захисного матеріалу з часом. Це дозволяє визначити проміжки часу, за які захисний одяг виконує свої функції на прийнятному рівні. Проведено верифікацію результатів досліджень. Реальний матеріал на основі скловолокна обстежувався за допомогою стандартного тепловізора у реальних умовах. Показано, що принаймні за градієнту температури у 20 К матеріал повністю ізолює людину від впливу зовнішнього середовища. Зазначено, що частинки скловолокна шкідливі для людей, тому у процесах виготовлення та експлуатації скловолокно повинне бути ізольовано за допомогою декоративного покриття.

Ключові слова: теплоізоляція, захисний одяг, моделювання, скловолокно.

Вступ

Не дивлячись на велику увагу, що приділяється розробленню спеціального одягу для працівників служб надзвичайних ситуацій, металургійної промисловості тощо, такі розробки стосуються або одного конкретного впливу, або мають загальний характер не враховуючи можливі значні коливання температур та фізичне навантаження людини. На сьогодні розроблені загальні засади проєктування багатошарових теплоізолюючих конструкцій. Але ці розробки мають дещо абстрактний характер, оперуючи набором констант без прив'язки до конкретних матеріалів та градієнтів температур. У багатьох випадках необхідний одяг, який буде захищати людину від впливів високих температур та забезпечувати термоізоляцію в умовах низьких температур зовнішнього середовища. Для цього необхідно дослідити процеси проходження теплової енергії крізь шари одягу з різними теплофізичними властивостями, і визначити ефективність теплового захисту. Це дозволить раціонально обрати теплофізичні параметри звичайного одягу та матеріалу, який забезпечує термоізоляцію людини. Такий підхід може забезпечити захист від впливу високих та низьких температур, а також проєктувати засоби інфрачервоного камуфляжу.

Огляд літературних джерел. Аналіз доступних досліджень з розроблення захисного одягу, зокрема для працівників служб з надзвичайних ситуацій, свідчить, що їх недоліком є застосування застарілих текстильних матеріалів [1]. Значною мірою це обумовлене обмеженнями на публікації таких матеріалів через їх застосування при розробленні інфрачервоного камуфляжу. Дослідження щодо створення такого камуфляжу [2] на основі наноструктур мають високу ефективність але складні у виготовленні і мають високу вартість. Дослідження [3] розглядає захист від теплового випромінювання з використанням рідкої суміші на основі серійного лаку з наповнювачами з нітриду бору та оксиду хрому.

Такі наповнювачі мають великі теплоємності і забезпечують поглинання теплової енергії на певний час, але вони наносяться на тканину, яка стає жорсткою і незручною для виготовлення одягу. Більш придатні для виготовлення захисного шару матеріали з напиленими на поверхні сплавів германію, сурми, телуру. Але такі матеріали занадто дорогі [4]. Це ж стосується захисного матеріалу з монокульок полістиролу [5]. У роботі [6] показано можливість застосування скловолокна у якості засобу поглинання інфрачервоного випромінювання. Теоретичні міркування свідчать, що такий підхід перспективний. Скловолокна мають поглинання властивості у довжинах хвиль 9–14 мкм, що відповідає більшості частот інфрачервоного випромінювання. Загальний недолік більшості досліджень – розроблення і визначення захисних властивостей одного визначеного матеріалу. Це обумовлене тим, чинні міжнародні нормативи, наприклад [7], вимагають вимірювання теплового потоку крізь захисний шар без врахування інших шарів, які можуть впливати на цей показник. В той же час важливими є зміни цього показника внаслідок проходження тепла крізь шкіру людини, звичайний одяг та наявність певних повітряних проміжків між шарами. Це обумовлює актуальність дослідження.

Викладення основного матеріалу

У загальному випадку для розроблення засобів термоізоляції за умови захисту людини від зовнішніх термічних впливів та захист від втрат тепла використовуються однакові підходи. Ці задачі є прямою та зворотною, а кінцевий результат обумовлений виключно спрямованістю градієнту температури.

Для дослідження процесу теплопередачі (теплогового потоку) від тіла людини до зовнішньої поверхні матеріалу спеодягу використовується наступне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

де T – температура, λ – коефіцієнт теплопровідності, t – час.

В моделі приймається, що область дослідження складається з різних шарів, а саме: тіло людини, білизна, спецодяг (комплект одягу), куртка, що відрізняються теплофізичними властивостями.

Розрахункова схема показана на рис. 1.

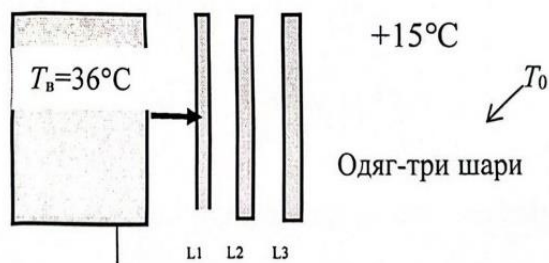


Рис. 1. Розрахункова схема шарів моделі

Таким чином, фізична модель складається з трьох шарів одягу та трьох шарів повітря:

джерело теплогенерації – тіло людини має такі фізичні параметри:

товщина шару шкіри тіла $l = 3,2$ мм;

теплоємність $C_T = 3350$ Дж/(кг*К);

щільність $\rho = 1056$ кг/м³;

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

Між тілом людини та трьома шарами одягу враховуємо параметри повітря:

коефіцієнт теплопередачі $\lambda_p = 0,02$ Вт/м*К;

теплоємність $C_p = 1000$ Дж/(кг*К);

щільність $\rho_p = 1,226$ кг/м³.

$L_1 = 1$ мм – відстань між тілом людини та першим шаром одягу (натільна білизна);

$d_1 = 1,0$ мм – товщина матеріалу білизни;

$\lambda_1 = 0,03$ Вт/м*К – коефіцієнт теплопередачі;

$C_1 = 1$ кДж/кг*К – теплоємність тканини білизни;

$\rho_1 = 100$ г/м² – щільність;

$L_2 = 2$ мм – відстань першим та другим шаром одягу (камуфляж);

$d_2 = 1,5$ мм – товщина матеріалу спецодягу;

$\lambda_2 = 0,04$ Вт/м*К – коефіцієнт теплопередачі;

$C_2 = 1,9$ кДж/кг*К – теплоємність тканини камуфляжу;

$\rho_2 = 220$ г/м² – щільність;

$L_3 = 5$ мм – відстань між другим шаром (камуфляж) та підкладкою куртки;

$d_3 = 3,5$ мм – товщина матеріалу спецодягу;

$\lambda_3 = 0,05$ Вт/м*К – коефіцієнт теплопередачі;

$C_2 = 2,1$ кДж/кг*К – теплоємність тканини верху куртки;

$\rho_3 = 350$ г/м² – щільність;

Температура зовнішнього середовища $+15$ °С. Тобто, постає задача визначення:

часу досягнення температури на поверхні матеріалу верху куртки $\geq +15,1$ °С при навантаженні 120 Вт; параметрів температурного режиму в підкостюмному просторі;

часу досягнення температури на поверхні матеріалу верху куртки $\geq +15,1$ °С при навантаженні 400 Вт.

Коефіцієнт температуропровідності для кожного шару визначається як:

$$a_n = \lambda_n / (\rho_n C_n), \quad (2)$$

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

– на лівій межі (зі сторони навколишнього середовища) задається значення температури $T = 36$ °С.

– на правій межі (на поверхні матеріалу верху верхнього одягу) задається значення температури $T_0 = 15$ °С. При проведенні розрахунків гранична умова з часом має вигляд:

$$T_{n-1} = T_n, \quad (3)$$

де T_n – температура в останній розрахунковій комірниці, T_{n-1} – температура в попередній розрахунковій комірниці. Початкова умова при $t = 0$ в усій розрахунковій області приймається $T = 36$ °С.

Для проведення розрахунків використовується прямокутна різницева сітка. Значення температури визначається в центрах різницевих комірок. Для чисельного розв'язання моделюючого рівняння (1) використовується явна різницева схема:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x^2}, \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}, \quad (5)$$

$$a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i}. \quad (6)$$

Залежності (4) та (5) використовуються для розрахунку значення коефіцієнта температуропровідності на границі шарів з різними теплофізичними параметрами. Усього 50 розрахункових вузлів по осі Ox , крок сітки 7.7/50 мм. Було розраховано температури кожного шару захисного одягу та температуру зовнішньої поверхні одягу за різні проміжки часу (рис. 2).

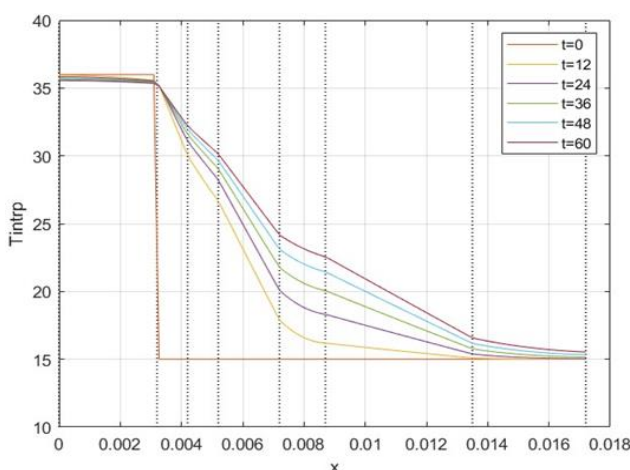


Рис. 2. Температури окремих шарів та зовнішньої поверхні захисного одягу у залежності від часу передачі тепла

Розрахунки виконані за умови наявності прошарків повітря завтовшки 1–2 мм між усіма шарами

одягу. Встановлено, що принаймні за обраних умов зміна фізичного навантаження людини суттєво не впливає на параметри теплоізоляції. Було проведено верифікацію результатів розрахунків з використанням матеріалу, який у межах похибки товщин окремих шарів відповідає параметрам модельного захисного матеріалу. Вимірювання здійснювалися з використанням тепловізора OTS-XLT 160 2-8X. Результати вимірювань наведено на рис. 3.

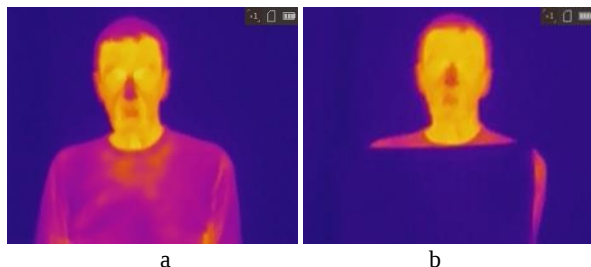


Рис. 3. Перевірка ефективності захисного одягу у реальних умовах експлуатації:
а – зображення об'єкта без захисту;
б – об'єкт захищений теплоізоляційним матеріалом;
синій колір відповідає температурі 16°C

Отриманий результат свідчить, що скловолокно є достатньо ефективним матеріалом для виготов-

лення захисного одягу. Слід враховувати, що у процесі його виготовлення у повітря потрапляють частинки скловолокна. Тому навіть у процесі експлуатації скловолокно необхідно покривати захисним шаром.

Висновки

1. Виконані розрахунки щодо проектування захисного термоізоляційного одягу. Показано, що наведений підхід придатний для визначення ефективності захисту від зовнішніх термічних впливів та підтримання теплового режиму людини. Отримані зміни температури у окремих шарах одягу з урахуванням наявності повітряних зазорів між окремими шарами. Це дозволяє обрати найбільш придатні матеріали для забезпечення необхідних параметрів теплоізоляції у залежності від умови експлуатації.

2. Проведено натурні випробування матеріалу на основі скловолокна. Встановлено, що принаймні за градієнту температури у 20 К розроблений матеріал надійно теплоізолює людину. Враховуючи малу товщину матеріалу, він може бути використаний для забезпечення інфрачервоного камуфляжу. Зазначено, що у процесі вироблення і експлуатації матеріалу на основі скловолокна його частинки можуть негативно впливати на людей, скловолокно повинне бути ізолюванням від людей захисним декоративним шаром.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Токарський О. Методичні засади визначення оптимального часу роботи рятувальника. ВІСТІ Донецького гірничого інституту. Донецький національний технічний університет, м. Покровськ., 2022. Т. 1, № 50. С. 14–20.
2. Diao, Z., Kraus, M., Brunner, R., Dirks, J. H., & Spatz, J. P. (2016). Nanostructured Stealth Surfaces for Visible and Near-Infrared Light. *Nano letters*, 16(10), 6610–6616. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03308>
3. Glyva, V., Krasnianskyi, G., Dovhanovskyi, M., & Krasnianskyi, T. (2024). Розроблення і дослідження захисних властивостей матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(77), 203-205. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.20>
4. Qu, Y., Li, Q., Cai, L. et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST. *Light Sci Appl* 7, 26 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5>
5. Ho Kun Woo, Kai Zhou, Su-Kyung Kim, Adrian Manjarrez, Muhammad Jahidul Hoque, Tae-Yeon Seong, Lili Cai (2022). Visibly Transparent and Infrared Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*. V. 32, (38). <https://doi.org/10.1002/adfm.202201432>
6. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskyi, M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>
7. ISO 15831:2007 Clothing — Physiological effects — Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin. (EN ISO 15831:2004), ID.

Received (Надійшла) 28.11.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

Designing clothing for protection against thermal effects and heat retention

V. Glyva, M. Dovhanovskyi

Abstract. Abstract. A model of heat transfer through several layers of textile and protective material is developed based on the fundamental relations of thermal conductivity. The presence of air gaps between individual layers of materials is taken into account. The temperature changes of individual material layers were obtained, which allows us to determine the range of textile materials and protective layers depending on the thermal insulation tasks. The developed methodology makes it possible to design clothing to protect people from external thermal influences and prevent negative changes in the thermal regime of the human body. Dependencies on the temperature change of the outer surface of the protective material over time were obtained. This makes it possible to determine the time intervals during which protective clothing performs its functions at the required level. The research results were verified. A real fibreglass-based material was examined using a standard thermal imager in real-world conditions. It is shown that at least at a temperature gradient of 20 K, the material completely isolates a person from the influence of the external environment. It is noted that glass fibre particles are harmful to humans, so in the processes of manufacturing and operation, glass fibre should be isolated by means of a decorative coating.

Keywords: thermal insulation, protective clothing, modelling, glass fibre.