



Прибила А.В.

**Прибила А.В.**

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ КОНДИЦІОНЕР ДЛЯ ЛЮДИНИ З РІВНОМІРНО РОЗПОДІЛЕНИМИ МОДУЛЯМИ**

*В роботі представлено результати розрахунків конструкції термоелектричного кондиціонера з рівномірно розподіленими модулями. Розроблені фізична, математична та комп'ютерна моделі кондиціонера. Визначено його ефективність для різних значень термічного опору і умов його експлуатації.*

**Ключові слова:** термоелектричний модуль, комп'ютерне моделювання, кондиціонування одягу.

*The results of computations of a thermoelectric (TE) conditioner with the uniformly distributed modules design are presented in this paper. The physical, mathematical and computer models of the TE conditioner were developed. Its efficiency for different thermal resistance values and conditions for its exploitation were determined.*

**Key words:** thermoelectric module, computer simulation, clothing TE conditioning.

### **Вступ**

*Загальна характеристика проблеми.* Перебування людини в різних температурних умовах оточуючого середовища часто супроводжується перегрівом або переохолодженням, що негативно впливає на її фізіологічний стан [1]. Це, в першу чергу, стосується людей, які змушені знаходитися у таких умовах протягом тривалого часу, виконуючи свої професійні обов'язки. Зокрема, до такої групи людей слід віднести військових, робітників в гарячих цехах, спортсменів тощо.

Вирішення проблеми забезпечення комфортних умов функціонування людини в різних умовах можливе шляхом створення спеціальних кондиціонерів для одягу. В роботі [2] наведено їх детальну класифікацію та виділено найбільш перспективні для реалізації фізичні моделі таких кондиціонерів. Особливий інтерес викликають кондиціонери для одягу, що використовують термоелектричне охолодження та нагрів [3]. Це пов'язано із їх перевагами – можливістю забезпечення як охолодження, так і нагріву, надійністю у роботі, екологічністю (відсутні шкідливі холодоагенти), високою ефективністю та низькими масогабаритами [4, 5].

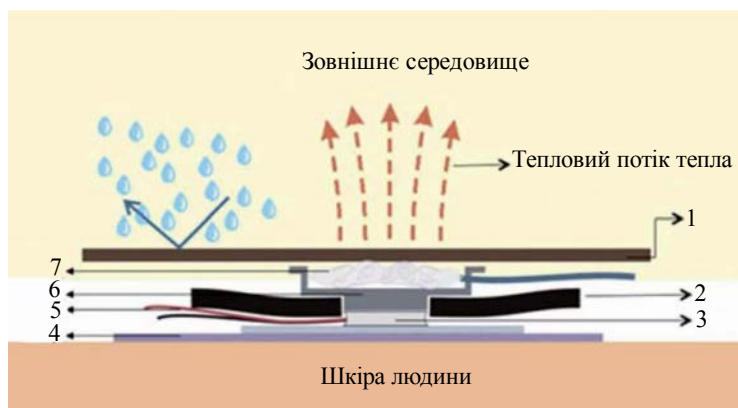
Найбільш простою і наочною моделлю термоелектричного кондиціонера для людини є модель із рівномірно розподіленими по поверхні одягу термоелектричними модулями. Однак оскільки розміри модулів значно менші від поверхні теплообміну, то в таких кондиціонерах слід використовувати теплопідводи і розсіювачі тепла. Такий кондиціонер запропоновано в роботі [4] (рис. 1). З рис. 1а видно, що кондиціонер містить 22 термоелектричні модулі, а зі схеми зображеної

на рис. 1б зрозуміло, що в ньому використані теплопідводи і теплорозсіюючі пластини. На жаль, в роботі [4, 6] не приводяться енергетичні характеристики такого кондиціонера. Тому, для визначення ефективності такої моделі були проведені її комп'ютерні дослідження, що є предметом даної роботи.

Отже, метою даної роботи є перевірка можливостей застосування термоелектричного кондиціонера для одягу із рівномірно розподіленими модулями шляхом комп'ютерного моделювання його конструкції.



а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд а) та фізична модель б) термоелектричного кондиціонера для одягу компанії Dhama Innovations [6]: 1 – теплорозсіююча тканина; 2 – ізоляція; 3 – термоелектричні модулі; 4 – теплопровідна тканина; 5 – провoda; 6 – теплові концентратори; 7 – теплопровідний матеріал.

### Фізична модель термоелектричного кондиціонера для одягу

Для проведення розрахунків індивідуального кондиціонера для бронежилета була використана фізична модель, представлена на рис. 2.

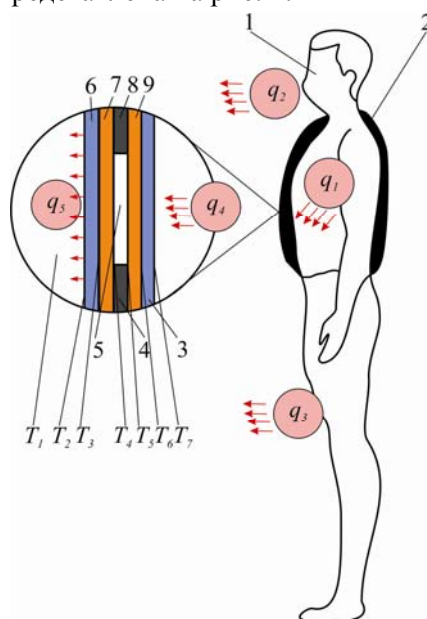


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного кондиціонера для одягу із рівномірно розподіленими модулями: 1 – тіло людини; 2 – жилет з кондиціонером; 3 – тканина, що проводить тепловий потік від тіла людини та теплового колектора 9; 4, 8 – теплоізоляційні прошарки; 5 – термоелектричний модуль; 6 – тканина, через яку тепловий потік відводиться у оточуюче середовище, 7 – теплопровідна пластина.

Вона побудована на основі моделі зображеної на рис. 1б і складається з тіла людини 1, яке виділяє тепловий потік  $q_1$ . В залежності від стану, в якому перебуває організм (спокій, фізичні навантаження різної інтенсивності, тощо), він виробляє тепловий потік від 100 до 800 Вт [7]. Цей потік відводиться у оточуюче середовище за допомогою механізмів терморегуляції (теплопровідність, конвекція, випромінювання та випаровування води (з поверхні шкіри та слизових оболонок)) через дихання ( $q_2$ ), теплову ізоляцію (одяг) ( $q_4$ ) та незахищені ділянки організму ( $q_3$ ). В залежності від умов навколишнього середовища та теплового опору одягу процентний внесок кожного із цих механізмів теплообміну різний (рис. 3) [8].

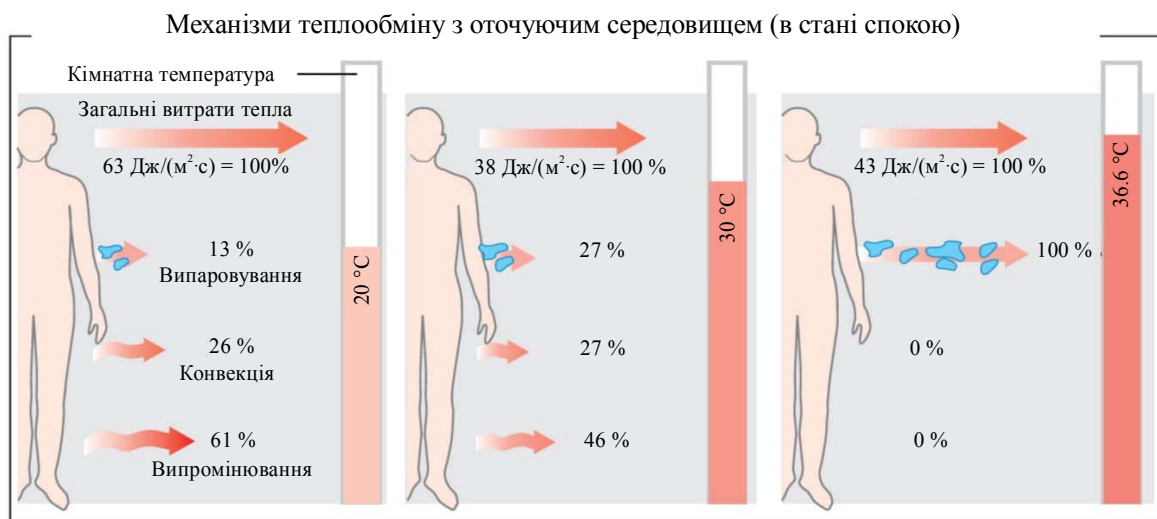


Рис. 3. Типова залежність співвідношення між механізмами теплообміну людини від температури оточуючого середовища [7].

На тіло одягнений жилет з кондиціонером 2 та нижній одяг 3, через який тепловий потік  $q_4$  передається до теплозбирального колектора 9, а від нього до термоелектричних модулів 5. Поверхня колектора, що не закрита термоелектричними модулями, теплоізольована 4, 8. Тепловий потік від термоелектричних модулів  $q_5$  відводиться у оточуюче середовище через металеву теплопровідну пластину 7 та тканину 6. Зрозуміло, що тепловий опір матеріалів жилета впливає на енергетичні властивості термоелектричного кондиціонера та теплові умови в ньому. Тому важливою задачею є розрахунок енергетичних властивостей термоелектричного кондиціонера в залежності від теплового опору матеріалу жилета і умов навколишнього середовища.

### Математична та комп'ютерна моделі термоелектричного кондиціонера для бронезилета

Система рівнянь для розрахунку енергетичних характеристик термоелектричного кондиціонера в залежності від параметрів елементів фізичної моделі визначається із рівнянь теплового балансу:

$$\begin{cases} Q_c = \chi_1(T_7 - T_6) \\ Q_c = \chi_2(T_6 - T_5) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_h = \chi_3(T_3 - T_4), \\ Q_h = \chi_4(T_2 - T_3), \\ Q_h = hS(T_1 - T_2), \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_h = Q_c + W_{TE}. \quad (3)$$

Тут  $\chi_1$  – тепловий опір матеріалу жилета 6,  $\chi_2$  – тепловий опір пластини 7,  $\chi_3$  – тепловий матеріалу 9,  $\chi_4$  – тепловий опір тканини 3,  $Q_c$  – холодопродуктивність кондиціонера,  $Q_h$  – його теплопродуктивність,  $W_{TE}$  – електрична потужність живлення термоелектричних модулів 5,  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $S$  – площа, з якої відбувається тепловіддача.

Із врахуванням (1) – (3), вираз для холодильного коефіцієнта термоелектричного кондиціонера наступний:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W_{TE}} = \frac{\alpha I(T_c + Q_c N_1) - 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE}}, \quad (4)$$

де  $N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}$ ,  $N_2 = \frac{(\chi_3 + \chi_4 + hS)}{\chi_3 \chi_4 hS}$ ,  $I$  – сила струму,  $R$  – електричний опір,  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС термоелемента,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності термоелемента.

Опалювальний коефіцієнт в такому випадку матиме вигляд:

$$\mu = \frac{Q_h}{W_{TE}} = \frac{\alpha I(T_h + Q_h N_2) + 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE}}. \quad (5)$$

Для розрахунків в роботі використані комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання та чисельні методи для пошуку значень цільових функцій – холодильного та опалювального коефіцієнтів термоелектричного кондиціонера. Це функції нелінійні, що залежать від сукупності параметрів, які в свою чергу виражені неявно, за допомогою множини емпіричних рівностей. Тому немає можливості використання методів пошуку екстремуму першого та другого порядків (через неможливість визначення похідних). Для реалізації пошуку оптимального значення холодильного коефіцієнта був застосований безградієнтний метод нульового порядку – модифікований метод Хука-Дживса [9].

На кожній ітерації головного циклу програми розв'язується система нелінійних рівнянь (1 – 3) та визначається холодопродуктивність. У програмі розраховуються коефіцієнти апроксимуючих поліномів, за допомогою яких визначаються емпіричні співвідношення між фізичними параметрами задачі оптимізації. Детально методика моделювання описана в [10].

## Результати моделювання

Отже, вхідними параметрами моделі є: теплова потужність, що необхідно відвести від організму людини через термоелектричні модулі і яка є функцією від температури оточуючого середовища (рис. 3) і фізіологічного стану організму (використано значення тепловідлень людини  $Q = 100$  Вт, що відповідає спокійному стану людини); температура оточуючого середовища  $T_1 = 20, 30, 36.6, 40$  °С; площа зовнішньої поверхні жилета, з якого відбувається теплообмін  $S = 0.5$  м<sup>2</sup>; параметри термоелектричних перетворювачів на основі *Bi-Te* [11] –  $20 \times 20$  мм з розмірами кристалів  $2.0 \times 2.0 \times 1.5$  мм, кількість термоелектричних модулів – 50 шт.

В результаті моделювання розраховано залежність електричної потужності, що необхідна для забезпечення постійної температури тіла людини ( $T = 36.6$  °С), від температури оточуючого середовища і теплового опору матеріалів жилета (рис. 4).

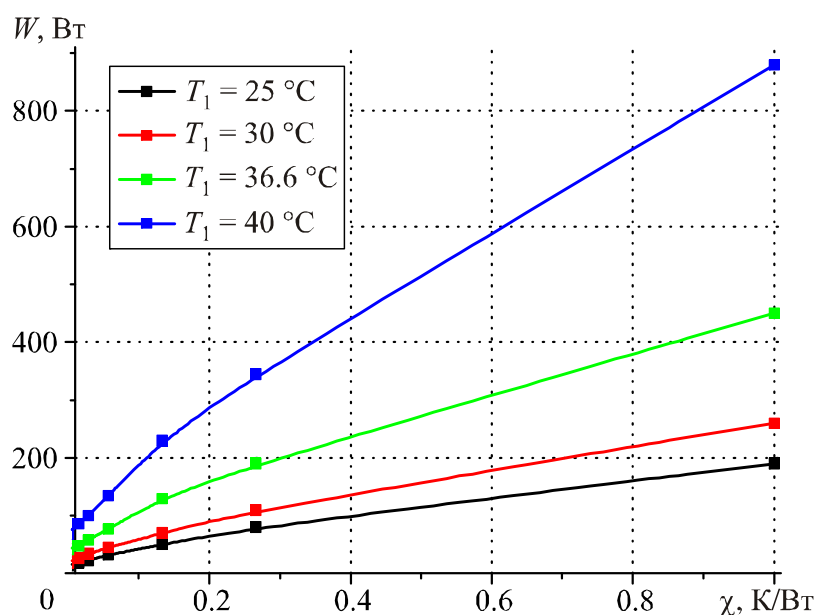


Рис. 4. Залежність електричної потужності термоелектричних модулів від теплового опору матеріалів жилета і для різних температур оточуючого середовища.

Із рис. 4 видно, що потужність, необхідна для забезпечення постійної температури тіла людини ( $T = 36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), сильно залежить від теплового опору матеріалу одягу. Так, наприклад, для живлення кондиціонера з тепловим опором матеріалів жилета на рівні  $\chi = 0.4\text{ К/Вт}$ , що відповідає використанню тканин на основі хлопку (коефіцієнт теплопровідності  $\kappa \approx 0.05\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) та при температурі оточуючого середовища  $T_1 = 36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає нормальній температурі поверхні тіла людини, необхідна потужність  $W = 250\text{ Вт}$ . Зменшення теплового опору жилета в 5 разів, що відповідає використанню тканин з підвищеною теплопровідністю ( $\kappa \approx 0.01\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) [12], веде до підвищення його ефективності в 2.5 рази і зменшення потужності термоелектричних модулів до  $W = 100\text{ Вт}$ .

Проте із проведених досліджень видно, що використана модель термоелектричного кондиціонера для людини із рівномірно розподіленими модулями є недостатньо ефективною і потребує подальшого вдосконалення, зокрема, шляхом інтенсифікації теплообміну примусовим обдувом повітряними вентиляторами, тощо.

Крім того, для зменшення енергетичних затрат при використанні індивідуальних кондиціонерів для людини важливим залишається пошук і розробка нових матеріалів із підвищеною теплопровідністю.

## Висновки

1. Підтверджено можливість створення термоелектричного кондиціонера для людини на основі моделі із рівномірно розподіленими модулями, проте її використання є недостатньо ефективним і потребує подальшого вдосконалення.
2. Розраховано залежність електричної потужності, що необхідна для забезпечення постійної температури тіла людини ( $T = 36.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), від температури оточуючого середовища і теплового опору матеріалів жилета.
3. Визначено, що для живлення кондиціонера для людини з тепловим опором матеріалів жилета на рівні  $\chi = 0.4\text{ К/Вт}$ , що відповідає використанню тканин на основі хлопку, та при

температурі оточуючого середовища  $T_1 = 36.6 \text{ }^\circ\text{C}$  необхідна електрична потужність  $W = 250 \text{ Вт}$ .

4. Зменшення теплового опору матеріалів жилета в 5 разів, що відповідає використанню тканин з підвищеною теплопровідністю ( $\kappa \approx 0.01 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) [13], веде до зростання його ефективності в 2.5 рази.

## Література

1. Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. [и др.] Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов под общ. ред. С.В. Белова. Москва. 1999.
2. Прибила А.В. Фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини (частина перша) *Термоелектрика*. 2016. № 1. С. 16 – 41.
3. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Сравнительный анализ термоэлектрических и компрессионных тепловых насосов для индивидуальных кондиционеров. *Термоэлектричество*. 2016. № 2. С. 35 – 44.
4. Pat. US 2010/0107657 A1. – Apparel with heating and cooling capabilities / Kranthi K. Vistakula. – Pub. Date: May. 6, 2010.
5. Pat. US 2002/0156509 A1. Thermal control suit / John A. Baker. Pub. Date: Oct. 24, 2002.
6. <http://dhamainnovations.com/>.
7. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. К.: Госмедиздат, 1956. 148 с.
8. Despopoulos A., Silbernagl S. Color Atlas of Physiology. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1986. 356 p.
9. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения). Учеб. пособие для вузов. М.: «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2005. – 432 с.
10. Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В. О влиянии системы теплообмена на эффективность термоэлектрического кондиционера. *Термоэлектричество*. 2013. №1. С. 76 – 83.
11. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
12. Назарова М.В., Бойко С.Ю. Исследование теплозащитных свойств неразрезной двухполотной основоворсовой ткани. *Современные проблемы науки и образования*. 2009. № 5. С. 113 – 117.

Надійшла до редакції 05.09.2016