

Анатичук Л.І.^{1,2}, Прибила А.В.¹



Анатичук Л.І.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна



Прибила А.В.

КОНДИЦІОНЕР ДЛЯ ЛЮДИНИ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ДАТЧИКОМ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ

В роботі приводяться результати розробки кондиціонера для людини із термоелектричним датчиком теплового потоку. Розроблені фізична, математична та комп'ютерна моделі кондиціонера. Визначено його ефективність для різних значень тепловиділень з тіла людини. Підтверджено ефективність використання термоелектричного датчика для контролю температури і тепловиділень з тіла людини.

Ключові слова: термоелектричний тепломір, комп'ютерне моделювання, кондиціонер для людини.

The paper presents the results of development of air conditioner for humans with a thermoelectric heat flux sensor. Physical, mathematical and computer models of air conditioner have been developed. Its efficiency for different values of heat release from human body has been determined. The efficiency of using thermoelectric sensor for control of temperature and heat release from human body has been confirmed.

Key words: thermoelectric heat flux meter, computer simulation, air conditioner for humans.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Використання індивідуальних кондиціонерів для людини, що розміщені у одязі, є перспективним засобом забезпечення його комфортних умов [1]. Це особливо актуально для людей, які перебувають у несприятливих температурних умовах протягом тривалого часу, виконуючи свої професійні обов'язки (військові, робітники в гарячих цехах, спортсмени, лікарі, тощо...) [2].

В роботі [1] описані фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини, що засновані на різних фізичних методах охолодження та нагріву, зокрема, використанні акумуляторів тепла, обдуві навколишнім повітрям, фазовому переході речовини, термоелектричному та компресійному перетворенні енергії. Найбільш простою є фізична модель кондиціонера, що використовує примусовий відвід тепла від тіла людини оточуючим повітрям.

Відомі конструкції таких кондиціонерів [3 – 6]. Для забезпечення відводу тепла потоком повітря в них використовуються малопотужні вентилятори, що забезпечують циркуляцію потоку повітря у своєрідних каналах, створених одягом. Така конструкція має недоліки,

зумовлені низькою ефективністю теплообміну між тілом людини і потоком повітря, пов'язаною із наявністю додаткового прошарку одягу. Це, в свою чергу, погіршує і відвід тепла потовиділенням. В даній роботі пропонується вдосконалення кондиціонера для людини, що забезпечує значне підвищення його ефективності шляхом використання теплообміну безпосередньо між тілом людини і потоком повітря. Це усуває недоліки попередніх варіантів кондиціонерів (погіршення теплообміну через наявність проміжних прошарків тканини на тілі), а також забезпечує додатковий теплообмін шляхом інтенсифікації природного процесу теплообміну тіла людини випаровуванням рідини (потовиділення).

Крім того, важливим елементом кондиціонера для людини є пристрій контролю роботи вентиляторів, що забезпечує необхідний для них режим роботи при різних рівнях тепловиділень з тіла людини [7]. З метою контролю температури тіла і його тепловиділень запропоновано використовувати спеціальний біотепломір [8, 9]. Його особливістю є наявність каналів, через які потовиділення переносяться на вільну поверхню тепломіра. Останнє дозволяє визначити відвід тепла не тільки за рахунок конвективного теплообміну, а і випаровуванням з поверхні людини.

Отже, метою даної роботи є підвищення ефективності кондиціонера для людини із термоелектричним датчиком теплового потоку.

Фізична модель термоелектричного кондиціонера для одягу

Для проведення розрахунків кондиціонера була використана фізична модель, представлена на рис. 1.

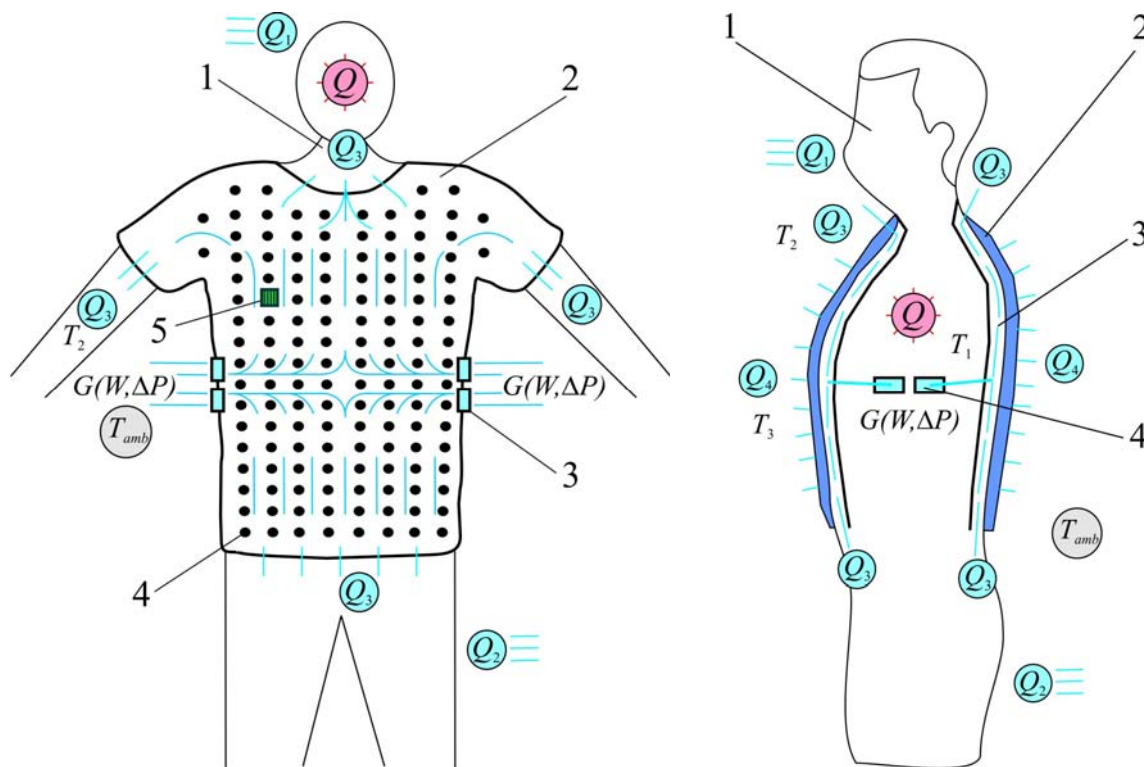


Рис. 1. Фізична модель кондиціонера для людини: 1 – тіло людини; 2 – еластична білизна; 3 – вентилятори; 4 – розпорки на внутрішній поверхні одягу, що формують повітряні проміжки, 5 – термоелектричний датчик температури і теплового потоку.

Фізична модель кондиціонера для людини складається з тіла людини 1, яке виділяє тепловий потік потужністю Q і має температуру $T_1 = 36.6$ °С. Еластична білизна 2 одягається безпосередньо на тіло людини 1. На білизні 2 закріплені плоскі вентилятори 3, що створюють потік повітря між білизною і тілом людини. Створений вентиляторами потік повітря переноситься через щілини, що утворені розпорками 4, закріпленими на внутрішній поверхні білизни.

В залежності від стану, в якому перебуває організм (спокій, фізичні навантаження різної інтенсивності, тощо), він віділяє тепловий потік потужністю $Q = 100 - 800$ Вт [7]. Частина теплової потужності від тіла Q_1 відводиться через дихання, частина шляхом теплообміну інших ділянок тіла, що не закриті білизною 2, з оточуючим середовищем Q_2 , а частина через механізми теплообміну з поверхні білизни 2 Q_4 . Створений вентиляторами 3 потік повітря з витратою G , що залежить від електричної потужності живлення вентиляторів W та перепаду тиску ΔP (створеному всередині одягу потоком повітря), відводить теплову потужність Q_3 . Потік повітря, що нагрівається у одязі до температури T_2 , відводиться у оточуюче середовище з температурою T_{amb} через отвори у одязі (як показано на рис. 1).

Зрозуміло, що для забезпечення необхідного тепловідводу важливою є інформація про розміри і розміщення розпорок на одязі, а також про потужності живлення електричних вентиляторів.

Математична та комп'ютерна моделі кондиціонера для людини

Для розрахунку енергетичних характеристик кондиціонера для людини на основі фізичної моделі, представленої на рис. 1, було використане об'єктно-орієнтоване комп'ютерне моделювання у середовищі Comsol Multiphysics. Математичний опис моделі представлено нижче.

Процеси тепло-масообміну теплоносія у повітряних проміжках в одязі, що створені розпорками, у стаціонарному випадку описується рівняннями (1-3):

$$-\Delta p - f_D \frac{\rho}{2d_h} v|\vec{v}| + \vec{F} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla(A\rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho A C_p \vec{v} \cdot \nabla T_2 = \nabla \cdot A k_2 \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{d_h} |\vec{v}|^3 + Q_2 + Q_{wall}, \quad (3)$$

де p – тиск, ρ – густина теплоносія, A – ефективний переріз каналу, по якому рухається теплоносіє, \vec{F} – сума всіх сил, C_p – теплоємність теплоносія, T_2 – температура, \vec{v} – вектор швидкості, k_2 – теплопровідність теплоносія, f_D – коефіцієнт Дарсі, $d = \frac{4A}{Z}$ – ефективний діаметр, Z – периметр стінки каналу, Q_2 – тепло, що виділяється за рахунок в'язкого тертя [Вт/м] (з одиниці довжини), Q_{wall} – тепловий потік, що надходить від теплоносія до стінок [Вт/м].

$$Q_{wall} = h \cdot Z \cdot (T_1 - T_2), \quad (4)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з рівняння

$$h = \frac{Nu \cdot k_2}{d} \quad (5)$$

Для визначення числа Нуссельта використовується рівняння Gnielinski ($3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f_d}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (6)$$

де число Прандтля $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$, μ – динамічна в'язкість, $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Для визначення коефіцієнта Дарсі f_D використаємо рівняння Churchill для усього спектра числа Рейнольдса та усіх значень e/d (e – шорсткість поверхні)

$$f_D = 8 \left[\frac{8}{Re}^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12} \quad (7)$$

$$\text{де } A = \left[-2.457 \cdot \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27(e/d) \right) \right]^{16}, \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}.$$

Розв'язуючи рівняння (1) – (3) ми отримуємо розподіл швидкостей та тиску для теплоносія.

Для визначення електричної потужності вентиляторів були використані їх реальні характеристики [11] у вигляді поліномів.

Термоелектричний датчик температури і теплового потоку

На рис. 2 представлена фізична модель термоелектричного датчика температури і теплового потоку, що складається із тіла людини 1, що виділяє тепловий потік Q , термоелектричного датчика, що містить ланцюги із віток термоелектричного матеріалу 2 та повітряні проміжки 3.

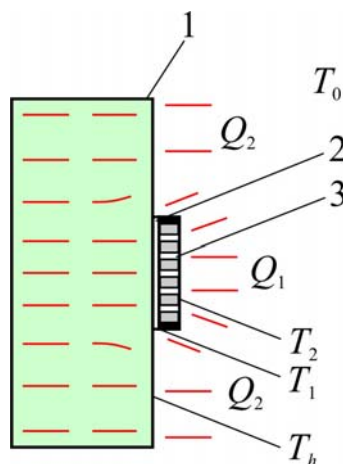


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного датчика температури та теплового потоку:
1 – тіло людини; 2 – матеріал датчика; 3 – повітряні проміжки.

Термоелектричний датчик, використаний у даній роботі, складається з 50 пар віток матеріалу на основі *Bi-Te* *n*- та *p*-типу провідності, з'єднаних між собою припоем в послідовний ланцюг, рядами по 10 пар, між якими розміщені повітряні проміжки. Його зовнішній вигляд зображено на рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд термоелектричного датчика температури та теплового потоку.

Використання такого датчика температури дозволяє точно контролювати теплові виділення з тіла людини та його температуру при мінімальному впливі самого датчика на теплообмін організму.

Визначення впливу такого датчика на тепловиділення з організму, а також його оптимізація для досягнення найвищої точності вимірювання температури і теплового потоку є предметом окремої задачі і було проведено в роботі [10].

Результати моделювання

Отже, вхідними параметрами моделі є: тепла потужність, яку необхідно відвести від організму людини через термоелектричні модулі і яка є функцією від температури оточуючого середовища і фізіологічного стану організму; температура оточуючого середовища $T_1 = 20, 25, 30$ °C; площа зовнішньої поверхні жилета, з якого відбувається теплообмін $S = 0.5$ м²; розміри і розміщення розпорок на внутрішній поверхні білизни – радіус розпорки $r = 5$ мм, її висота $h = 5$ мм, кількість розпорок $n = 136$; повітряні вентилятори розміщені відповідно до рис. 1.

В результаті моделювання розраховано залежність витрати теплоносія, що необхідний для забезпечення постійної температури тіла людини ($T = 36.6$ °C), від перепаду температур між тілом і оточуючим середовищем і тепловиділень з організму (рис. 4).

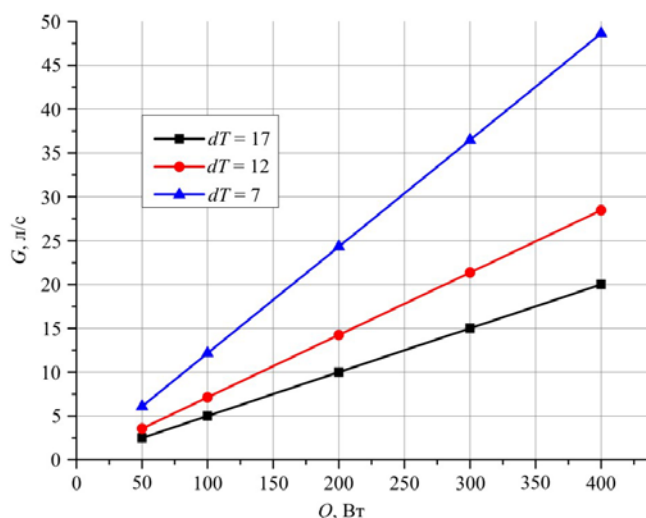


Рис. 4. Залежність витрати теплоносія, що необхідний для забезпечення постійної температури тіла людини ($T = 36.6$ °C), від перепаду температур між тілом і оточуючим середовищем і тепловиділень з організму.

Крім того, для визначення електричної потужності живлення вентиляторів, що забезпечили необхідний відвід тепла від тіла при його постійній температурі, проведено розрахунок перепаду тиску, створеного потоком повітря від вентиляторів, в залежності від витрати повітря (рис. 5). Порівняння цих результатів із реальними характеристиками вентиляторів [11], дозволило визначити реальну електричну потужність живлення такого кондиціонера для людини.

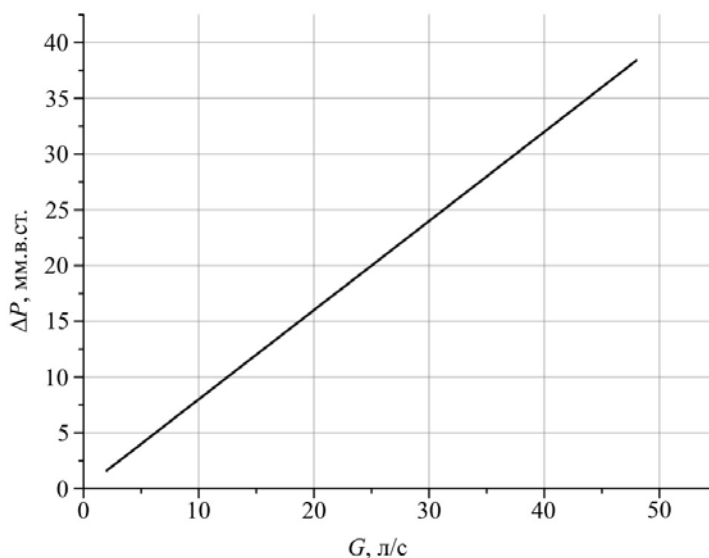


Рис. 5. Залежність перепаду тиску, створеного потоком повітря від вентиляторів, від витрати повітря.

Таким чином, для забезпечення відводу тепла від тіла людини за допомогою вентилятора, з характеристиками описаними в [11], необхідна електрична потужність 5 Вт (для тепловиділень в спокійному стані (100 Вт) і перепаді температур між тілом людини і оточуючим середовищем $\Delta T = 7$ К), що відповідає 4 вентиляторам потужністю $W = 1.25$ Вт. Для тепловиділень з тіла людини, що відповідають сильному фізичному навантаженню (800 Вт), необхідна електрична потужність зростає до 35 Вт (за перепаду температур $\Delta T = 7$ К). Збільшення перепаду температур між тілом людини і оточуючим середовищем до $\Delta T = 12$ К призводить до зменшення необхідної для відводу тепла електричної потужності в ≈ 1.7 рази, до $\Delta T = 17$ К – в ≈ 3 рази.

Таким чином, описана конструкція кондиціонера для тіла людини з термоелектричним датчиком теплового потоку підтвердила свою ефективність за температур, нижчих ніж температура тіла людини.

Висновки

1. Підтверджено можливість створення кондиціонера для людини з термоелектричним датчиком теплового потоку.
2. Розраховано, що для забезпечення відводу тепла від тіла людини за допомогою вентиляторів необхідна електрична потужність 5 Вт (для тепловиділень в спокійному стані (100 Вт) і перепаді температур між тілом людини і оточуючим середовищем $\Delta T = 7$ К).
3. Для тепловиділень з тіла людини, що відповідають сильному фізичному навантаженню (800 Вт), необхідна електрична потужність для забезпечення відводу тепла зростає до 35 Вт (за перепаду температур $\Delta T = 7$ К).
4. Збільшення перепаду температур між тілом людини і оточуючим середовищем до $\Delta T = 12$ К

призводить до зменшення необхідної для відводу тепла електричної потужності в ≈ 1.7 рази, до $\Delta T = 17 \text{ K}$ – в ≈ 3 рази.

Література

1. Прибила А.В. Фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини (частина перша) *Термоелектрика*. 2016. № 1. С. 16 – 41.
2. Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и др. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов /; Под общ. ред. С.В. Белова. – М.: Высш. шк., 1999. 616 с.
3. Pat. CN 203633537 U.– Fan type cooling human body air conditioning clothes *Tian Weiguo*. Pub. Date: 2014. June, 11.
4. Pat. US 20060191270 A1.– Air conditioning system for a garment *Ray Warren*. Pub. Date: 2006. Aug, 31.
5. <https://www.empa.ch>.
6. <http://www.kuchofuku-products.com/>.
7. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. Киев. 1956. 148 с.
8. Термоелектричний сенсор для вимірювання температури і теплового потоку: пат. 72032 Україна: МПК: 2012.01. опубл. 10.08.12, бюл. № 15.
9. Гищук В.С. Електронний реєстратор сигналів сенсорів теплового потоку людини *Термоелектрика*. 2012. №4. С. 105 – 108.
10. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Дослідження впливу термоелектричного тепломіра на визначення тепловиділення людини *Термоелектрика*. 2012. №4. С. 60 – 66.

Надійшла до редакції 20.01.2017