

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.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА КОМПРЕСІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ КОНДИЦІОНЕРІВ

У роботі наводяться результати порівняльного аналізу термоелектричних та компресійних теплових насосів в умовах їх використання у індивідуальних кондиціонерах для людини. Описані залежності коефіцієнта перетворення енергії та ваги кондиціонерів від величини створюваних ними теплових потоків для різних перепадів температур та визначено найбільш раціональні області їх використання.

Ключові слова: термоелектричний тепловий насос, компресійний тепловий насос, кондиціонер для людини.

This paper presents the results of comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for their use in individual air conditioners. Dependences of air-conditioners' energy conversion coefficient and weight on the value of heat fluxes created for various temperature differences are described and the most rational areas of their use are determined.

Key words: thermoelectric heat pump, compression heat pump, human air conditioner.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. У літературі згадується про можливість кондиціонування тіла людини різними методами [1 – 8]. Особливий інтерес становлять методи, засновані на використанні компресійних та термоелектричних теплових насосів. Це зумовлено їх перевагами – високою ефективністю перетворення енергії та можливістю функціонування як в режимі охолодження, так і нагріву. В роботі [9] наведена класифікація індивідуальних кондиціонерів для людини та запропоновано нові перспективні варіанти використання термоелектричних і компресійних теплових насосів.

Мета пропонованої роботи є визначення можливостей подальшого покращення якості індивідуальних кондиціонерів для людини на основі термоелектричних та компресійних теплових насосів шляхом проведення їх порівняльного аналізу.

Енергетичні характеристики термоелектричних теплових насосів

Фізична модель термоелектричного теплового насоса

В більшості випадків для визначення ефективності термоелектричних теплових насосів (ТТН) використовуються властивості термоелектричних модулів в режимах охолодження і

нагріву. Значення холодильного ε та опалювального μ коефіцієнтів для них визначаються із загальновідомих рівнянь [10 – 12]:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W_{TE}} = \frac{\alpha IT_c - 0.5I^2R - \lambda(T_h - T_c)}{\alpha I(T_h - T_c) + I^2R}, \quad (1)$$

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

Де Q_c – холодопродуктивність, W_{TE} – потужність живлення термоелектричного модуля, Q_h – теплопродуктивність, T_h – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, T_c – температура холодної сторони термоелектричного модуля, α – диференціальний коефіцієнт Зеебека матеріалу, I – сила струму, R – електричний опір термоелектричного модуля, λ – середній питомий коефіцієнт теплопровідності віток термоелектричного модуля.

Типова залежність холодильного коефіцієнту ε від струму живлення для різних перепадів температур між сторонами модуля ($\Delta T = T_h - T_c$) наведена на рис. 1 (використано експериментальні характеристики термоелектричних модулів АЛТЕК 127 2.0 × 2.0 × 2.5 на основі *Bi-Te* [13] при $T_h = 30$ °С).

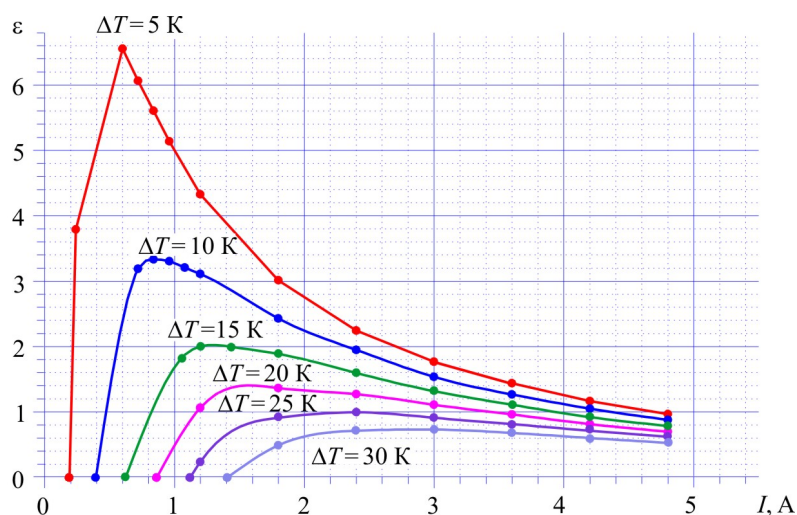


Рис. 1. Залежність холодильного коефіцієнта термоелектричних модулів охолодження АЛТЕК 127 2.0 × 2.0 × 2 від струму живлення для різних значень перепаду температур між гарячою і холодною стороною модулів.

Графіки демонструють досить значні величини холодильного коефіцієнта ε при відносно невеликих перепадах температур ΔT властивих кондиціонерам. Ще вищим є опалювальний коефіцієнт термоелектричних перетворювачів μ ($\mu = \varepsilon + 1$).

Однак в реальних умовах ефективність теплових насосів є дещо нижчою, ніж самих модулів. Це пов'язано із додатковими втратами перепаду температур в теплообмінниках та контактних теплових опорах між теплообмінниками і термоелектричними модулями. Крім того, при визначенні реальних значень енергетичних характеристик ТТН слід також враховувати додаткові витрати електричної енергії на переміщення носіїв тепла через теплообмінники.

Фізична модель термоелектричного теплового насоса з врахуванням наведеного вище показано на рис. 1. Вона складається із термоелектричних модулів 1, гарячого 3 та холодного 6

теплообмінників, теплових контактних опорів між ними 4, 5 та рідинних насосів 2, 7, що забезпечують рух теплоносіїв через теплообмінники (W_1, W_2).

Розглянемо характеристики теплових насосів згідно наведеної моделі, в якій перепади температур вздовж теплообмінників вважаємо незначними і їх наявністю можна знехтувати.

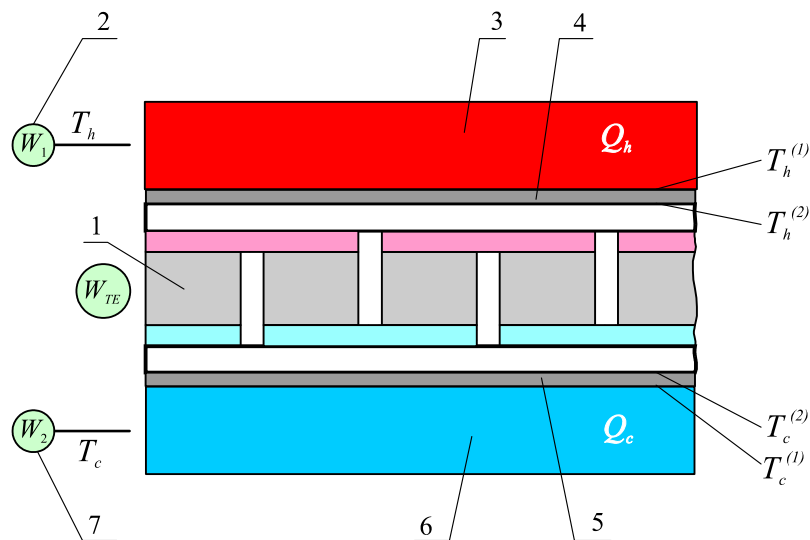


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного теплового насоса.

Система рівнянь для опису холодильного та опалювального коефіцієнтів в залежності від параметрів елементів фізичної моделі визначається із рівнянь теплового балансу в тепловому насосі:

$$\begin{cases} Q_c = \chi_1(T_c^{(1)} - T_c) \\ Q_c = \chi_2(T_c^{(2)} - T_c^{(1)}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_h = \chi_3(T_h^{(2)} - T_h^{(1)}) \\ Q_h = \chi_4(T_h^{(1)} - T_h) \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_h = Q_c + W_{TE} \quad (5)$$

Тут χ_1 – тепловий опір холодного теплообмінника 6, χ_2 – тепловий контактний опір 4, χ_3 – тепловий контактний опір 5, χ_4 – тепловий опір гарячого теплообмінника 3, Q_c – холодопродуктивність теплового насоса, Q_h – його теплопродуктивність.

Із врахуванням (3) – (5), а також потужності, що витрачається на забезпечення системи теплообміну, вираз для реального холодильного коефіцієнта термоелектричного теплового насосу перепишеться у вигляді:

$$\varepsilon_r = \frac{Q_c}{W_{TE} + W_1 + W_2} = \frac{\alpha I(T_c + Q_c N_1) - 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE} + W_1 + W_2} \quad (6)$$

$$\text{де } N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}, \quad N_2 = \frac{(\chi_3 + \chi_4)}{\chi_3 \chi_4}.$$

Опалювальний коефіцієнт в такому випадку матиме вигляд:

$$\mu_r = \frac{Q_h}{W_{TE} + W_1 + W_2} = \frac{\alpha I(T_h + Q_h N_2) + 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_c N_1))}{W_{TE} + W_1 + W_2}. \quad (7)$$

Розрахунок енергетичних характеристик термоелектричного теплового насоса

Виходячи із фізичної моделі, наведеної на рис. 2, здійснено комп'ютерну оптимізацію термоелектричного теплового насоса із врахуванням енергетичних втрат на функціонування системи теплообміну. При моделюванні використано конструктивні параметри термоелектричного теплового насоса, що використовується в приладах космічного призначення [14, 15]. Такий вибір пов'язаний із тим, що рівень холодильного та опалювального коефіцієнтів, досягнутий із його використанням, переважає відомі світові аналоги. Крім того, описаний в [14, 15] ТТН складається із ідентичних блоків, що забезпечує можливість його модифікації для отримання необхідного нам рівня теплових потоків без втрати його ефективності.

Методика комп'ютерного моделювання

В роботі використовуються комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання та чисельні методи для пошуку оптимальних значень цільових функцій – холодильного та опалювального коефіцієнтів термоелектричного теплового насоса. Ці 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 [16].

На кожній ітерації головного циклу програми розв'язується система нелінійних рівнянь (3–5) 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 [17].

Результати комп'ютерного моделювання

Отже, вхідними параметрами моделі є: кількість термоелектричних модулів – 80; їх розміри – $50 \times 50 \times 5$ мм; параметри термоелектричних перетворювачів задаються емпіричними залежностями між холодильним коефіцієнтом, перепадом температур та струмом живлення для модулів АЛТЕК 127 $2.0 \times 2.0 \times 2.5$ на основі *Bi-Te* [13] (рис. 1); тепловий контактний опір між теплообмінниками і термоелектричними модулями – $\chi_{2,3} = 0.035$ К/Вт. Система теплообміну являє собою 90 алюмінієвих рідинних теплообмінників габаритними розмірами $55 \times 55 \times 10$ мм з 6 паралельно увімкнутими каналами внутрішнім діаметром 4 мм та рідинними насосами.

Для визначення максимального холодильного коефіцієнта ТТН здійснено його оптимізацію в залежності від потужності, що витрачається на забезпечення системи теплообміну. На рис. 3 наведено залежність холодильного коефіцієнта термоелектричного теплового насоса від потужності живлення рідинних насосів для різних перепадів температур на його сторонах. Видно, що ця залежність має максимум. Він пов'язаний із тим, що зростання потужності рідинних насосів хоча й призводить до покращення ε_r (шляхом зменшення втрат перепаду температур на теплообмінниках), проте до певної межі, після чого ε_r зменшується (оскільки потужність живлення рідинних насосів знаходиться в знаменнику співвідношення (6)). Отже, із рис. 3 видно, що холодильний коефіцієнт ТТН набуває максимального значення при $W_n = 8$ Вт.

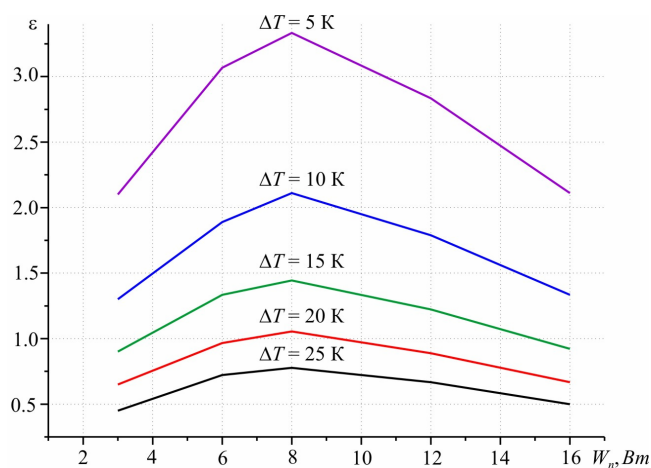


Рис. 3. Залежність холодильного коефіцієнта термоелектричного теплового насоса від потужності живлення рідинних насосів.

На рис. 4 наведено результати моделювання ТТН у вигляді залежностей холодильного коефіцієнта термоелектричного теплового насоса від струму живлення для різних перепадів температур між сторонами ТТН (рис. 4).

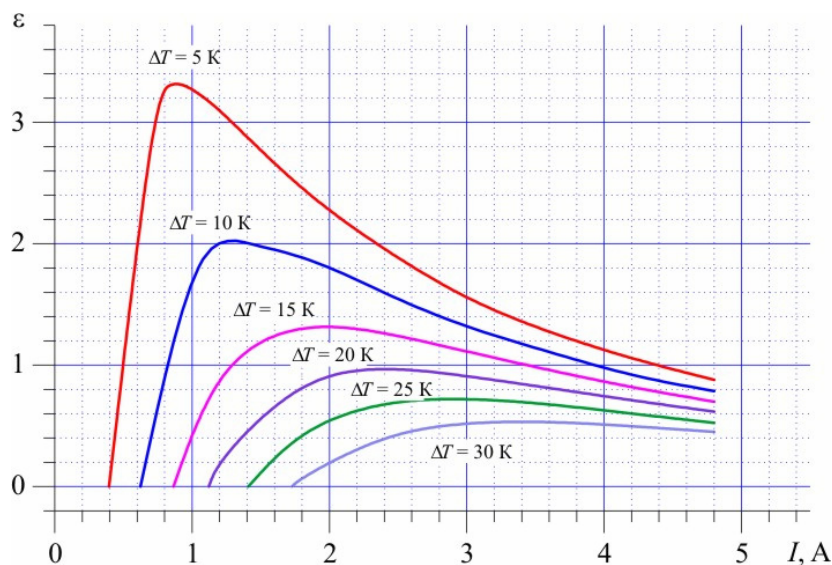


Рис. 4. Залежність холодильного коефіцієнта ТТН від струму живлення для різних значень перепаду температур між його гарячою і холодною сторонами.

Таким чином, значення холодильного коефіцієнта термоелектричного теплового насоса з врахуванням реальних перепадів температур на його сторонах та енергетичних затрат на функціонування системи теплообміну досягає 3.3 за $\Delta T = 5$ К, що корелює з експериментальними даними для ТТН [24].

Порівняння термоелектричних та компресійних індивідуальних кондиціонерів для людини

Значення тепловиділення із тіла людини становлять від 100 Вт у спокійному стані до 800 Вт під час сильних фізичних навантажень організму людини [18]. У відповідності до цього

кондиціонером для людини має забезпечуватися відвід такої теплової потужності. Це зумовлює вимоги до діапазону теплових потужностей індивідуальних кондиціонерів для людини.

Зроблено аналіз літератури про компресійні теплові насоси з метою визначення їх енергетичних та масогабаритних характеристик в діапазоні температур і теплових потоків, що відповідають умовам функціонування індивідуальних кондиціонерів.

У табл. 1 – 2 [19 – 25] подано характеристики компресійних теплових насосів для різних умов функціонування та рівня теплових потоків.

Для наочності побудуємо графічно порівняльну характеристику залежності холодильного коефіцієнта компресійних (визначеного з табл. 1, 2) і термоелектричних (зображеного на рис. 4) теплових насосів від рівня холодопродуктивності (рис. 5).

Таблиця 1

Характеристики низькотемпературних компресорів

Модель	Споживана потужність, Вт	Холодопродуктивність (Вт) за температури кипіння, °С / холодильний коефіцієнт						Вага, кг
		-30	-25	-20	-15	-10	-5	
С-К100Н5	92	58/0.6	92/1	130/1.4	169/1.8	212/2.3	267/2.9	7.4
С-К120Н2	123	116/0.9	157/1.2	203/1.6	262/2.1	337/2.7	430/3.5	7.7
С-К140Н5	147	109/0.7	145/1	186/1.2	271/1.8	300/2	483/3.2	7.9
С-К160Н5	147	107/0.7	152/1	265/1.8	271/1.8	336/2.2	433/2.9	8.2
С-К175Н5	184	128/0.7	167/0.9	225/1.2	284/1.5	358/1.9	457/2.5	8.5
С-К200Н5-1	184	151/0.8	201/1.2	263/1.3	331/1.8	412/2.2	533/2.9	8.6

Як видно з рис. 5, холодильний коефіцієнт компресійних теплових насосів має різну залежність від холодопродуктивності, досягаючи високих значень за великих потужностей. Холодильний коефіцієнт термоелектричних теплових насосів (червона пунктирна лінія на графіку) не залежить від холодопродуктивності і визначається лише значенням перепаду температур на термоелектричних перетворювачах. Таким чином, термоелектричні теплові насоси мають безперечну перевагу перед компресійними в області невеликих холодопродуктивностей (до 500 Вт), що відповідають режимам роботи індивідуальних кондиціонерів для людини.

Важливим параметром для індивідуальних кондиціонерів є їх вага. На рис. 6 наведено залежність ваги термоелектричних і компресійних теплових насосів від холодопродуктивності. На відміну від енергетичних характеристик, маса термоелектричних перетворювачів (червона пунктирна лінія) залежить від холодопродуктивності, адже для збільшення теплових потоків, що перекачуються ними, необхідно використати більше термоелектричних модулів з відповідними теплообмінниками. Порівняння засвідчує переваги термоелектричних теплових насосів перед компресійними по вазі в області потужностей теплових потоків до 500 Вт.

Таблиця 2

Характеристики середньо- та високотемпературних компресорів

Модель	Температура кипіння, °С	Температура конденсації, °С	Споживана потужність, Вт	Холодопродуктивність, Вт	Холодильний коефіцієнт	Вага, кг
AE 41ZF11 H	-15	36.7	279	413	1.5	17
	-10	38.5	298	476	1.6	
	-5	41.8	322	565	1.7	
	0	43.6	349	667	1.9	
	5	47.2	382	762	2	
	10	48.6	423	872	2	
	15	50.6	472	989	2.1	
TRK 5480 Y	-15	45	616	1028	1.7	11.2
	-10	45	626	1235	2	
	-5	45	639	1506	2.3	
	0	45	653	1840	2.8	
	5	45	670	2239	3.3	
	10	45	689	2702	3.9	
	15	45	709	3229	4.5	
TRK 5450 Y	-15	45	388	643	1.6	11.2
	-10	45	401	760	1.9	
	-5	45	414	920	2.2	
	0	45	426	1124	2.6	
	5	45	437	1370	3.1	
	10	45	448	1660	3.7	
	15	45	458	1992	4.3	
AE5465	-15	35	500	605	1.2	12.6
	-10	35	545	835	1.5	
	-5	35	578	1110	1.9	
	0	35	599	1431	2.4	
	5	35	608	1798	2.9	
	10	35	604	2211	3.6	
	15	35	589	2669	4.5	

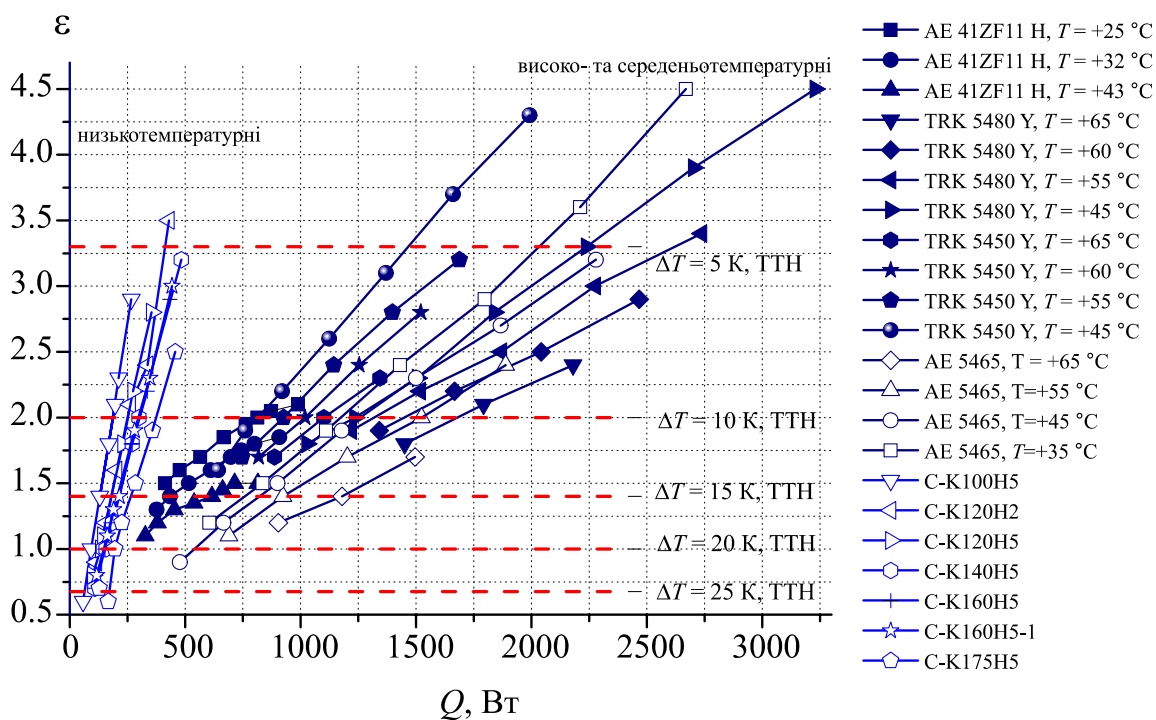


Рис. 5 Залежність холодильного коефіцієнта компресійних (сині лінії) та термоелектричних (червоні пунктирні лінії) теплових насосів від їх холодопродуктивності.

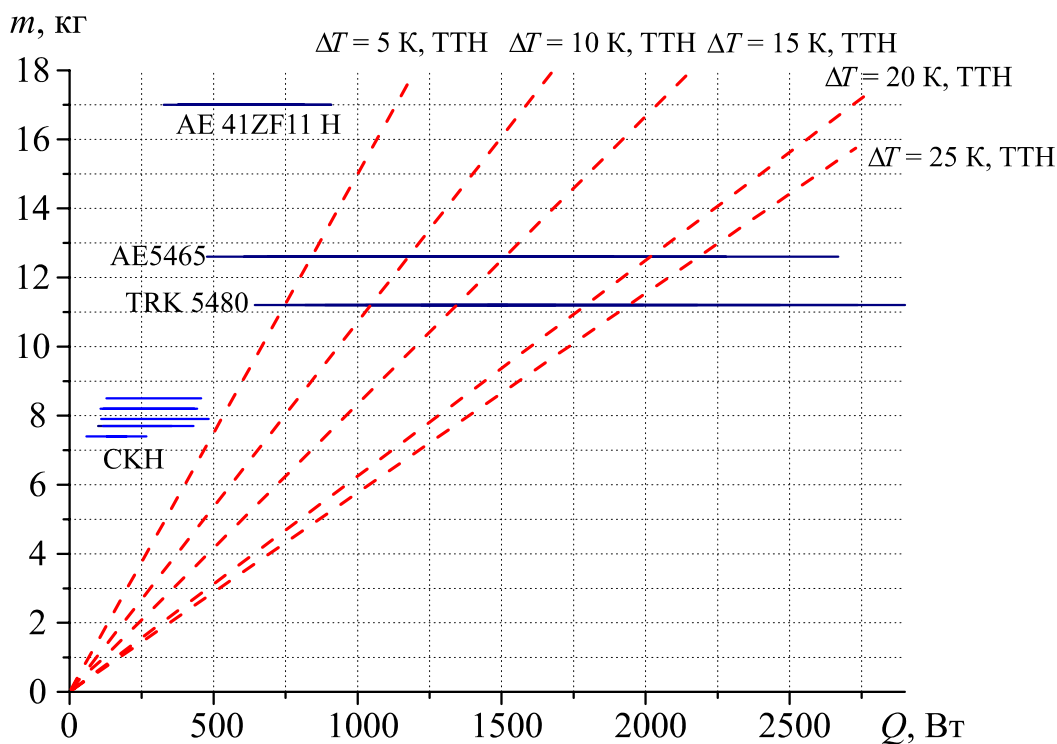


Рис. 6 Залежність ваги компресійних (сині прямі) та термоелектричних (червоні пунктирні лінії) теплових насосів від їх холодопродуктивності.

Таким чином, порівняльний аналіз енергетичних та масогабаритних характеристик (рис. 5, 6) термоелектричних та компресійних теплових насосів засвідчує переваги ТТН в діапазоні

холодопродуктивностей, що найбільше відповідають умовам функціонування індивідуальних кондиціонерів для людини.

Висновки

1. Розраховано холодильний коефіцієнт термоелектричного теплового насоса для індивідуальних кондиціонерів, що досягає 3.3 за $\Delta T = 5$ К.
2. Визначено оптимальну електричну потужність живлення системи теплообміну ТТН, що дорівнює 8 Вт для наведених конструктивних параметрів теплового насоса.
3. Виконано порівняння компресійних і термоелектричних теплових насосів та встановлено, що термоелектричний тепловий насос має вищі значення холодильного коефіцієнта в діапазоні холодопродуктивностей до 500 Вт, що найбільше відповідають умовам функціонування індивідуальних кондиціонерів для людини.
4. Порівняння ваги термоелектричних і компресійних теплових насосів у діапазоні холодопродуктивностей до 500 Вт засвідчує переваги термоелектричних теплових насосів, що робить доцільним їх використання у кондиціонерах для людини.

Література

1. Пат. 66389 Україна, МПК 2011.01. Одяг для захисту від перегрівання / Мороз Л.В.; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24.
2. Pat. US 3950789.- Dry ice cooling jacket / Stephan A. Konz, Jerry R. Duncan.- Pub. Date: Apr. 20, 1976.
3. Pat. CN 203633537 U.- Fan type cooling human body air conditioning clothes / Tian Weiguo.- Pub. Date: June, 11, 2014.
4. Pat. US 20060191270 A1.- Air conditioning system for a garment / Ray Warren.- Pub. Date: Aug, 31, 2006.
5. Pat. US 20020073481 A1.- Cooling garment / Christopher Creagan, Charles Bolian, Irwin Singer.- Pub. Date: June, 20, 2002.
6. Нойтель К.-Х.- Системы рабочей одежды для экстремально холодных условий труда.- Горный информационно-аналитический бюллетень.- № 2.- 2002.
7. Pat. US3524965 A.- Electric heating element for apparel / Stanley Arron.- Pub. Date: Aug. 18, 1970.
8. Pat. US 2010/0107657 A1.- Apparel with heating and cooling capabilities / Kranthi K. Vistakula.- Pub. Date: May. 6, 2010.
9. Прибила А.В. Фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини (частина перша) // Термоелектрика. – № 1. – 2016.
10. Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств / А.И. Бурштейн. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 135 с. – Библиогр.: с. 134–135.
11. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. Volume II. Thermoelectric energy converters. Institute of Thermoelectricity, Kyiv, Chernivtsi, 2005. – 348 p.
12. Булат Л.П., Бузин Е.В. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Методические указания для студентов специальности 070200 “Техника и физика низких температур”.– СПб.: СПбГУНиПТ, 2001.– 41 с.
13. <http://www.ite.inst.cv.ua>.
14. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость-жидкость для приборов очистки воды космического назначения // Термоэлектричество. – 2015.– №4. – С. 43 – 47.

15. Анатичук Л.І., Прибыла А.В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2015.– №6. – С. 59 – 64.
16. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): Учеб. пособие для вузов / В.М. Вержбицкий – М.: «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2005. – 432 с.
17. Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Прибыла А.В. Про вплив системи теплообміну на ефективність термоелектричного кондиціонера // Термоелектрика. – 2013.– №1. – С. 75 – 81.
18. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. – Киев: Госмедиздат, 1956. – 148 с.
19. http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_4_2005_Compressors_hermetic_Atlant.htm.
20. <http://www.aholod.ru/upload/docs/tabl-compr.pdf>.
21. <http://www.eurobi.ru/zapchasti/kompressory/rotary/tecumseh.html>.
22. <http://www.rembittex.ru/holod/remholod.pdf>.
23. <http://holodprom.com.ua/sites/default/files/Catalog.pdf>.
24. Анатичук Л.І., Прибыла А.В. Экспериментальные исследования термоэлектрического теплового насоса // Термоэлектричество. – 2015. №5.
25. <http://www.garantzelremont.ru/images/remont-holodilnikov.pdf>.

Надійшла до редакції 11.05.2016.