

УДК 536.24



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}
Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatych@gmail.com;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна



Прибила А.В.

ПРО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ КОНДИЦІОНЕРИ ДЛЯ ТАНКІВ

У роботі наводяться результати досліджень можливостей вдосконалення термоелектричних кондиціонерів для забезпечення умов перебування екіпажу танку, що є важливою передумовою виконання ними бойових завдань. Бібл. 21, рис. 1., табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний кондиціонер, танки, ефективність.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. У сучасній бронетехніці, зокрема танках провідних країн світу, активно використовується кондиціонування повітря для забезпечення робочих умов перебування екіпажу. Особливо актуальним є використання таких кондиціонерів при підвищених температурах оточуючого середовища. Аналіз літературних джерел свідчить, що перебування людей в умовах підвищених температур оточуючого середовища протягом тривалого часу значно знижує ефективність їх роботи, а при значному збільшенні температури, виникає навіть ризик втрати свідомості. Це ставить під загрозу можливість виконання поставлених бойових завдань. З другого боку, при різкому зниженні температури повітря всередині танку виникає ризик гострих респіраторних захворювань (ГРЗ), що також знижує ефективність роботи екіпажу танку [1].

У літературі наведено дані про кондиціонування повітря у транспортних засобах, зокрема бронетанковій техніці, різними методами [2 – 8]. Особливу увагу звернено на використання компресійних кондиціонерів. Це зумовлено їх відносно високою ефективністю. Проте вони мають і низку недоліків, зокрема наявність екологічно небезпечних холодоагентів, невисока надійність, чутливість до механічних перевантажень і орієнтації у просторі, що значно знижує привабливість використання компресійних кондиціонерів. Така ситуація є особливо актуальною при використанні зазначених кондиціонерів у військовій техніці, що зумовлено наявністю підвищених вимог до їх надійності. Вказані недоліки усуваються шляхом використання термоелектричних кондиціонерів [8, 19, 20].

Аналіз літератури свідчить, що найбільшого поширення термоелектричні кондиціонери набули в Російській Федерації. Всі серійні моделі російських танків (в тому числі і експортні моделі), починаючи з Т-90М «Прорыв-3» (на озброєнні з 2018 року), обладнані термоелектричними кондиціонерами виробництва АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э. Дзержинского» (Російська Федерація) [9, 10]. Крім того, ЗАО

"Кондиционер" (Російська Федерація) здійснює серійне виробництво термоелектричних кондиціонерів для танків Т-14 «Армата» [11].

Активні дослідження термоелектричного кондиціонування танків в умовах підвищених температурних умов ведуться в Індії [12, 13]. Термоелектричний кондиціонер був інтегрований у головний індійський бойовий танк Арджун (на озброєнні з 2006 року) і успішно продемонстрований у Головній дослідницькій лабораторії в Аваді (CVRDE), Індія та на Махаджанському польовому стрільбищі в Раджастані (Індо-Пакистанська границя) у червні 2005 [13].

Розробка термоелектричних кондиціонерів для військової техніки (зокрема танків) ведеться також у компаніях провідних країн світу, зокрема у компаніях EIC Solutions Inc. (США) [14], TECA Corporation (США) [15], Marlow Industries, Inc. (США) [16], Global Thermoelectric, Inc. (Канада) [17].

Параметри термоелектричних кондиціонерів для танків наведені в таблиця.

Таблиця

Порівняння термоелектричних кондиціонерів для танків

	Холодильний коефіцієнт	Опалювальний коефіцієнт	Холодопродуктивність, Вт	Максимальна температура оточуючого середовища, °С	Споживана потужність, Вт	Вага, кг	Габаритні розміри, мм ³	Витрата повітря, м ³ /год
Т-14 (Росія)	0.7		3700	60	5500	50	-	350-600
Т-90 (Росія)	0.7		3000	60	4480	50	240x140x140	420-600
Т-90М (Росія)	1.1		3500	-	3200	98	-	-
ТЕСА (США)	0.36	1	1660	70	4600	70	-	-
ВНИИ - Холод маш (Росія)	0.86		1600	-	1830	-	358x180x220	380
	0.9		4500	-	5000	-	390x160x281	950

З таблиці видно, що характеристики кондиціонерів істотно відрізняються. Наприклад, основний параметри – ефективність, що визначається холодильним коефіцієнтом, знаходиться в межах 0.36 – 1. Звідси виникає питання на скільки якість розроблених термоелектричних кондиціонерів досягає граничних можливостей і отже, які ще є резерви для покращення їх властивостей, що і є метою даної роботи.

Фізична модель

Фізична модель термоелектричного кондиціонера для танків представлена на рис. 1.

Вона складається із двох частин – внутрішнього блоку, що знаходиться всередині танку і забезпечує відведення теплового потоку із охолоджуваного об'єму 1, і блоку, що знаходиться на зовнішній поверхні танку і слугує для відведення теплового потоку у оточуюче середовище 10. Внутрішній блок кондиціонера складається із системи передачі теплового потоку із охолоджуваного об'єму 1 до термоелектричних модулів 5, яка містить повітряний вентилятор 3 та повітряний теплообмінник 4, та системи відведення теплового потоку від термоелектричних модулів рідинним теплообмінником 6 із використанням рідинного насоса 7. У якості рідинного теплоносія 11 використано рідину із пониженою температурою застигання – антифриз. Зовнішній блок кондиціонера міститься повітряно-рідинний теплообмінник 8 із повітряним вентилятором 9, що забезпечує розсіювання теплового потоку від кондиціонера в оточуюче середовище. Слід зазначити, що джерелом теплових натікань всередині охолоджуваного об'єму 1 є внутрішні джерела тепла 2 (теплові натікання від членів екіпажу та працюючої всередині охолоджуваного об'єму техніки) та натікання із зовнішнього середовища через ізоляцію танка 12, що залежать від якості теплової ізоляції та перепаду температур між внутрішнім об'ємом і оточуючим середовищем.

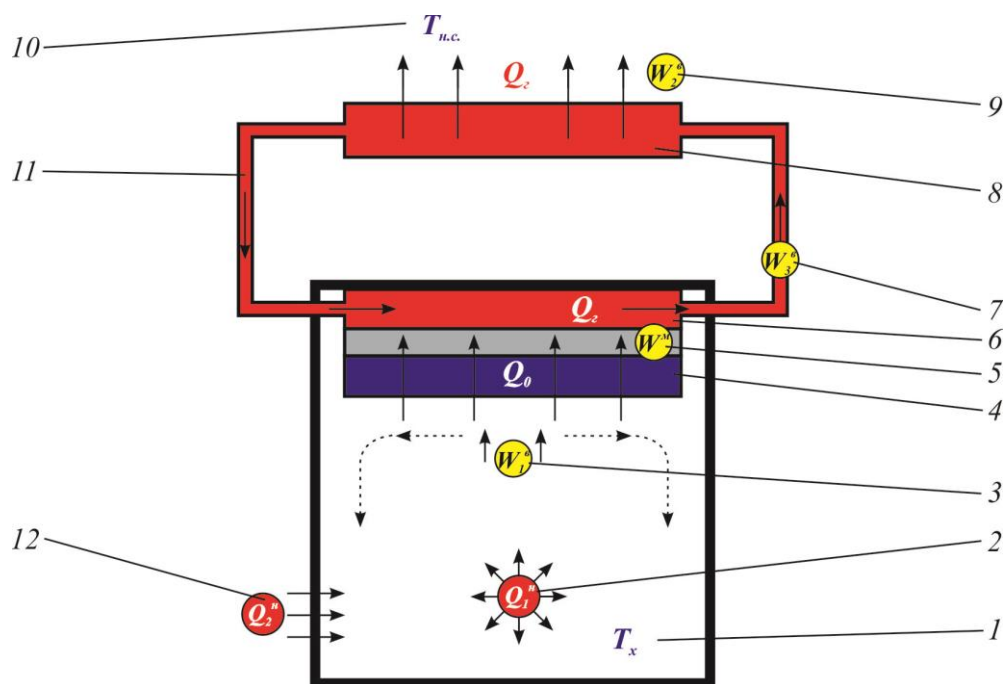


Рис. 1 Фізична модель термоелектричного кондиціонера для танків:

- 1 – охолоджуваний об'єм, 2 – виділення тепла Q_1 всередині охолоджуваного об'єму,
- 3 – повітряний вентилятор, що споживає електричну потужність W_1 ,
- 4 – холодний повітряний теплообмінник внутрішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 5 – термоелектричний перетворювач енергії, що споживає електричну потужність W , 6 – гарячий рідинний теплообмінник внутрішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 7 – рідинний насос, що споживає електричну потужність W_3 ,
- 8 – рідинно-повітряний теплообмінник зовнішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 9 – повітряний вентилятор, що споживає електричну потужність W_2 , 10 – навколишнє середовище, 11 – рідинний теплоносіє, 12 – теплові натікання Q_2 через ізоляцію.

Слід зауважити, що, відповідно до санітарних вимог [1], перепад температур між оточуючим повітрям і об'ємом повітря охолодженим кондиціонером не повинен перевищувати 15 К. При цьому в залежності від значення температури оточуючого повітря цей перепад різний [1]. Ці вимоги також були використані при розрахунках.

Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (4)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (5)$$

Тут $\vec{E}$ – густина потоку енергії, $\vec{q}$ – щільність теплового потоку, $\vec{j}$ – щільність електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (3) – (5), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тоді закони збереження (1), (2) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

Цими нелінійними диференціальними рівняннями другого порядку в частинних похідних (7) і (8) визначаються розподіли температури T й потенціалу U у термоелементах.

Рівняння, що описує процес переносу тепла в стінках теплообмінників у стаціонарному випадку, записується в такий спосіб:

$$\nabla (-k_1 \cdot \nabla T_1) = Q_1. \quad (9)$$

Тут k_1 – коефіцієнт теплопровідності стінок теплообмінника, ∇T_1 – градієнт температури, Q_1 – тепловий потік.

Процеси тепло- і масообміну теплоносіїв у каналах теплообмінників у стаціонарному випадку описуються рівняннями [18]

$$-\Delta p - f_D \frac{\rho}{2d_h} v |\vec{v}| + \vec{F} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla(A\rho\vec{v}) = 0, \quad (11)$$

$$\rho A C_p \vec{v} \cdot \nabla T_2 = \nabla \cdot A k_2 \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{d_h} |\vec{v}|^3 + Q_2 + Q_{wall}, \quad (12)$$

де p – тиск, ρ – щільність теплоносія, A – поперечний переріз труби, $\vec{F}$ – сума всіх сил, що діють в системі, 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 труби, Q_2 – тепло, яке виділяється за рахунок в'язкого тертя [Вт/м] (з одиниці довжини теплообмінника), Q_{wall} – тепловий потік, що надходить від теплоносія до стінкам труби [Вт/м]

$$Q_{wall} = h \cdot Z \cdot (T_1 - T_2), \quad (13)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з рівняння

$$h = \frac{Nu \cdot k_2}{d}. \quad (14)$$

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

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_d}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}, \quad (15)$$

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

Для визначення коефіцієнта Дарсі f_D використовуємо рівняння Churchill для всього спектра числа Рейнольдса й усіх значень e/d (e – шорсткість поверхні стінки)

$$f_D = 8 \left[\frac{8^{12}}{Re} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12}, \quad (16)$$

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

З розв'язку рівняння (7) – (12) ми одержимо розподіли температур, електричного потенціалу (для термоелементів), швидкостей і тиску (для теплоносія).

Для розв'язку розглянутих вище диференціальних рівнянь із відповідними граничними умовами був використаний пакет прикладних програм Comsol Multiphysics.

Результати проектування

Аналіз існуючих типів кондиціонерів для танків [2 – 7] свідчить, що величина теплового потоку, який необхідно відвести із внутрішнього об'єму танку у оточуюче середовище, знаходиться на рівні 3 кВт. При цьому максимально високі регламентовані температури оточуючого середовища можуть досягати 50 °С. Як уже зазначалося раніше, відповідно до санітарних вимог [1], перепад температур між оточуючим повітрям і об'ємом повітря охолодженим кондиціонером не повинен перевищувати 10 - 15 К в залежності від температури оточуючого середовища.

Відповідно до зазначених вимог і запропонованої фізичної моделі термоелектричного кондиціонера, були проведені розрахунки енергетичних характеристик кондиціонера з метою визначення його граничних можливостей.

Таким чином, для забезпечення необхідної холодопродуктивності на рівні 3 кВт за температури оточуючого середовища до 50 °С і перепаду температур ~15 К необхідна електрична потужність складає ~2 кВт, що відповідає значенню холодильного коефіцієнта $\varepsilon \approx 1.47$.

Порівняння результатів проектування із параметрами відомих термоелектричних кондиціонерів для танків [2 – 7] свідчить про можливості їх покращення по енергетичній ефективності до ~30 %, що відкриває можливості для подальших досліджень у даному напрямку.

Слід зауважити, що вимоги до можливості роботи в умовах підвищених температур оточуючого середовища легко реалізується із використання термоелектричних кондиціонерів (на відміну від використання компресійних охолоджувачів), оскільки із збільшенням температури оточуючого середовища при збереженні перепаду температур ефективність термоелектричних кондиціонерів навіть зростає [20].

Крім того, важливою перевагою термоелектричних кондиціонерів є можливість їх використання в режимі нагріву, при цьому їх енергетична ефективність навіть зростає [21].

Висновки

1. Проведено дослідження граничних можливостей термоелектричного кондиціонеру для танків із використанням реальних вимог до їх експлуатації.
2. Встановлено, що для забезпечення необхідної холодопродуктивності на рівні 3 кВт за температури оточуючого середовища до 50 °С і перепаду температур ~15 К необхідною є електрична потужність ~2 кВт, що відповідає значенню холодильного коефіцієнта $\varepsilon \approx 1.47$.
3. Порівняння результатів проектування із параметрами відомих термоелектричних

кондиціонерів для танків свідчить про можливості їх покращення по енергетичній ефективності на ~30 %, що відкриває можливості для подальших покращень кондиціонерів.

4. Визначено, що енергетична ефективність термоелектричних кондиціонерів є вищою ніж у компресійних в умовах підвищених температур оточуючого середовища і при їх використанні в режимі нагріву.

Література

1. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1182400-74>.
2. Lee, M.Y.; Lee, D.Y. Review on Conventional Air Conditioning, Alternative Refrigerants and CO₂ Heat Pumps for Vehicles. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 5, 713924
3. Lee, H.S.; Lee, M.-Y. Cooling Performance Characteristics on Mobile Air-Conditioning System for Hybrid Electric Vehicles. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 5, 282313.
4. Ma, G.Y. Study on thermoelectric air conditioning for electric vehicles. *Refrig. Air Cond.* 1998, 14, 5–10.
5. Lee, D. Experimental study on the heat pump system using R134a refrigerant for zero-emission vehicles. *Int. J. Automot. Technol.* 2015, 16, 923–928.
6. Qi, Z.G. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 38, 754–764.
7. Qinghong Peng and Qungui Du. Progress in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles – A Review. – *Open Access Energies* 2016, 9(4), 240; doi: 10.3390/en9040240.
8. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // *Термоелектрика*. – № 2. – 2003. – С. 52 – 56.
9. <http://евробизнес.рф/2018/04/06/18/>
10. <http://tass.ru/armiya-i-opk/5099575>
11. http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post_85.html
12. Chatterjee & et. al. Solid State Cooling / Heating Micro Climate Conditioning Device & a Garment Connected Therewith, Patent Sealing.
13. Sh. Chatterjee, Thermoelectrics in Indian scenario, *J. Of Thermoelectricity*, 6, 5 – 20 (2016).
14. <https://www.eicsolutions.com>
15. <http://www.thermoelectric.com>
16. <https://www.marlow.com>
17. <https://www.sedar.com>
18. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.
19. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів // *Термоелектрика*. – 2016. №2. – С 33 – 42.
20. Анатичук Л.І., Прибила А.В., Короп М.М. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів в умовах підвищених температур навколишнього середовища // *Термоелектрика*. – 2016. №5. – С 95 – 98.
21. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про ефективність термоелектричних кондиціонерів для транспортних засобів // *Термоелектрика* №1 . 2019

Надійшла до редакції 25.10.2019

Анатычук Л.И., *акад. НАН Украины*^{1,2}
Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДИЦИОНЕРАХ ДЛЯ ТАНКОВ

В работе приводятся результаты исследования возможностей применения термоэлектрических кондиционеров для обеспечения надлежащих условий пребывания экипажа танка, что является важной предпосылкой выполнения им боевых задач. Библ. 21, рис. 1., табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический кондиционер, танки, эффективность.

L.I. Anatyчук^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*
A.V. Prybyla^{1,2} *cand. Phys. - math. Sciences*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatyuch@gmail.com

THERMOELECTRIC AIR CONDITIONERS FOR TANKS

The paper presents the results of studies on the possibility of using thermoelectric air conditioners to provide conditions for the tank crew, which is an important prerequisite for their combat missions. Bibl. 21, Fig. 1.

Key words: thermoelectric air conditioner, tanks, efficiency.

References

1. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1182400-74>.
2. Lee, M.Y., Lee, D.Y. (2013). Review on conventional air conditioning, alternative refrigerants and CO₂ heat pumps for vehicles. *Adv. Mech. Eng.*, 5, 713924
3. Lee, H.S., Lee, M.-Y. (2013). Cooling performance characteristics on mobile air conditioning system for hybrid electric vehicles. *Adv. Mech. Eng.*, 5, 282313.
4. Ma, G.Y. (1998). Study on thermoelectric air conditioning for electric vehicles. *Refrig. Air Cond*,

- 14, 5–10.
5. Lee, D. (2015). Experimental study on the heat pump system using R134a refrigerant for zero-emission vehicles. *Int. J. Automot. Technol*, 16, 923–928.
 6. Qi, Z.G. (2014). Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 38, 754–764.
 7. Qinghong Peng and Qungui Du (2016). Progress in heat pump air conditioning systems for electric vehicles. A review. *Open Access Energies*, 9(4), 240; doi: 10.3390/en9040240.
 8. Rozver Yu.Yu. (2003). Thermoelectric air conditioner for transport means. *J.Thermoelectricity*, 2, 52 – 56.
 9. <http://eurobusiness.rf/2018/04/06/18/>
 10. <http://tass.ru/armiya-i-opk/5099575>
 11. http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post_85.html
 12. Chatterjee & et. al. Solid state cooling / heating micro climate conditioning device & a garment connected therewith, Patent Sealing.
 13. Sh. Chatterjee. (2016). Thermoelectrics in Indian scenario, *J. Thermoelectricity*, 6, 5 – 20.
 14. <https://www.eicsolutions.com>
 15. <http://www.thermoelectric.com>
 16. <https://www.marlow.com>
 17. <https://www.sedar.com>
 18. Lurie Michael V. (2008). *Modeling of oil product and gas pipeline transportation*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
 19. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners. *J.Thermoelectricity*, 2, 33 – 42.
 20. Anatychuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners at elevated ambient temperatures. *J.Thermoelectricity*, 5, 95 – 98.
 21. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2019). On the efficiency of thermoelectric air conditioners for vehicles. *J.Thermoelectricity*, 1.

Submitted 25.10.2019