



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. *ак. НАН України,^{1,2}*
Прибила А.В. *кандидат фіз.-мат. наук^{1,2}*

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

²Чернівецький національний університет імені
Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com



Прибила А.В.

ПРО ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІДИНА-РІДИНА

У роботі наводяться результати розрахунків граничних можливостей термоелектричних теплових насосів рідина-рідина, зокрема для їх використання у якості високоефективного нагрівника для приладу очищення води космічного призначення. Бібл. 9, Рис. 2.

Ключові слова: термоелектричний тепловий насос, ефективність, дистильатор.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Використання термоелектричних теплових насосів (ТТН) у системах кондиціонування обумовлене їх унікальними властивостями [1 – 5]: екологічністю (у такому обладнанні відсутні токсичні холодоагенти); надійністю (стійкість до механічних впливів, тривалий ресурс роботи); незалежністю від орієнтації в просторі (можливість роботи у відсутності гравітації) [6, 7].

Прикладом ефективного використання термоелектричних теплових насосів є прилади для регенерації води з рідких відходів життєдіяльності на борту пілотованих космічних апаратів (урини, конденсату атмосферної вологи, санітарно-гігієнічної води). Випробування їх ефективності на стенді NASA показали, що за найважливішими показниками – питомою витратою енергії, габаритами, вагою та якістю одержуваного дистильату прилади для очищення води з термоелектричним тепловим насосом перевершують відомі аналоги космічного призначення [4, 5].

Однак до таких приладів у зв'язку з можливостями їх нових застосувань (пілотовані місії освоєння Марса та інших планет), висуваються нові, більш високі вимоги. Це в основному стосується зменшення їх ваги, розмірів, а також енергетичних витрат на функціонування термоелектричного теплового насоса. Завдання подальшого підвищення якості таких приладів є дуже складним, оскільки досягнуті значення їх ефективності близькі до граничних.

Мета нашої роботи – визначення граничних можливостей термоелектричного теплового насоса рідина-рідина для розуміння подальших кроків до підвищення його ефективності.

Фізична модель ТТН

Для визначення граничних можливостей термоелектричного теплового насоса використана

його спрощена фізична модель (рис. 1). Вона складається з теплообмінників 1, що забезпечують проходження теплового потоку Q_G через гарячу сторону термоелектричних модулів, власне термоелектричних модулів 3, теплообмінників 2, що забезпечують проходження теплового потоку Q_X через холодну сторону термоелектричних модулів і системи гідравлічно зв'язаних каналів 4, що забезпечують циркуляцію рідини в термоелектричному тепловому насосі.

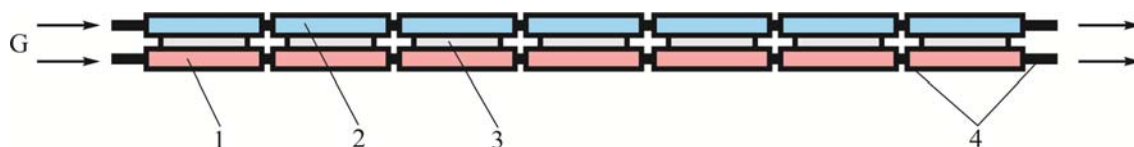


Рис. 1. Найпростіша фізична модель термоелектричного теплового насоса.

У найпростішому випадку така модель являє собою послідовно з'єднані гарячі 1 і холодні теплообмінники 2, між якими знаходяться термоелектричні модулі 3. При цьому для визначення гранично можливих значень ефективності термоелектричного теплового насоса, ми нехтуємо втратами енергії на прокачування теплоносія в теплообмінниках та втратами у перепаді температур в них.

Для забезпечення оптимальної роботи термоелектричних модулів, кожен з них має індивідуальне джерело живлення.

Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \tag{1}$$

та електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \tag{2}$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \tag{3}$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \tag{4}$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \tag{5}$$

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

Враховуючи (3) – (5), можна одержати

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

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

$$-\nabla \left[(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T \right] - \nabla \left[(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U \right] = 0, \tag{7}$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \tag{8}$$

Нелінійні диференціальні рівняння другого порядку в частинних похідних (7) і (8) визначають розподіл температури T та потенціалу U у термоелементах.

У стаціонарному випадку рівняння, що описує процес переносу тепла в стінках теплообмінників, записується так:

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

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

З розв'язку рівнянь (7) – (9) ми одержимо розподіли температур, електричного потенціалу в термоелектричному тепловому насосі.

Для розв'язку розглянутих вище диференціальних рівнянь із відповідними граничними умовами використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics.

Результати комп'ютерного моделювання

Нижче наведено результати розрахунків параметрів термоелектричного насосу відповідно до фізичної моделі зображеної на рис. 1. Було визначено оптимальну кількість термоелектричних модулів N для забезпечення необхідної холодопродуктивності Q_0 , а також оптимальний струм живлення I_{opt} кожного з модулів для забезпечення найвищого інтегрального холодильного коефіцієнту ϵ^{int} .

Вхідні дані для розрахунків:

холодопродуктивність – 600 Вт;

температура теплоносія на вході в гарячий теплообмінний контур – 36 °С;

температура теплоносія на вході в холодний теплообмінний контур – 31 °С;

витрати теплоносія в кожному контурі – 22 мл/с.

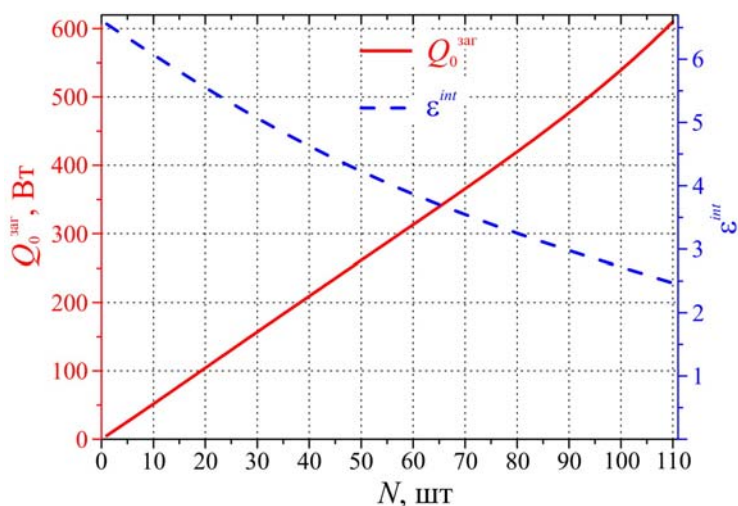


Рис. 2. Залежність сумарної холодопродуктивності та інтегрального холодильного коефіцієнту термоелектричного теплового насоса від кількості термоелектричних модулів.

Отже, в результаті моделювання визначено кількість термоелектричних модулів для забезпечення необхідної холодопродуктивності $Q_0 = 600$ Вт, що становить 110 штук. При цьому всі термоелектричні модулі працюють при оптимальному струмі живлення, що забезпечує досягнення найвищого значення інтегрального холодильного коефіцієнту термоелектричного теплового насоса на рівні $\epsilon^{int} = 2.5$.

Порівняння отриманих результатів із результатами попередніх досліджень термоелектричного теплового насоса [9], свідчить про те, що граничне значення охолоджувального коефіцієнту ТТН перевищує досягнутий на сьогоднішній день рівень ($\varepsilon = 1.85$) на 26 %. Це дозволяє зробити висновок про необхідність подальших досліджень ТТН з метою наближення його ефективності до гранично можливих значень.

Висновки

1. Розраховано залежність холодопродуктивності термоелектричного теплового насоса від кількості термоелектричних модулів, кожен з яких працює при оптимальному струмі живлення. Для досягнення холодопродуктивності $Q_0 = 600$ Вт необхідно 110 термоелектричних модулів.
2. Встановлено, що граничні значення інтегрального охолоджувального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса за умов живлення кожного з термоелектричних модулів оптимальним електричним струмом і досягнення холодопродуктивності $Q_0 = 600$ Вт, становлять $\varepsilon^{\text{int}} = 2.5$
3. Порівняння отриманих результатів із результатами попередніх досліджень термоелектричного теплового насоса свідчить про те, що граничне значення холодильного коефіцієнту ТТН перевищує досягнутий на сьогоднішній день рівень на 26 %.

Література

1. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // Термоелектрика. – № 2. – 2003. – С. 52 – 56.
2. Анатичук Л.І., Вихор Л.Н., Розвер Ю.Ю. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа // Термоэлектричество. – № 1. – 2004. – С. 73 – 80.
3. Анатичук Л.І., Сузукі Н., Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для приміщень // Термоелектрика. – № 3. – 2005. – С. 53 – 56.
4. Разработка и испытание системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов с использованием термоэлектрического теплового насоса / В.Г. Риферт, В.И. Усенко, П.А. Барабаш [и др.] // Термоэлектричество. – 2011. – № 2. – С. 63 – 74.
5. Термоэлектрический тепловой насос как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатичук Л.І., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
6. Анатичук Л.І. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.І. Анатичук // Термоэлектричество. – 2001. – № 1. – С. 3 – 14.
7. Анатичук Л.І. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.І. Анатичук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
8. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.
9. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В. Експериментальне дослідження термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. – № 3. – С. 33 – 39.

Надійшла до редакції 04.08.2017

Анатичук Л.І.^{1,2} *ак. НАН України,*
Прибила А.В.^{1,2} *канд.физ.-мат. наук*

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна; *e-mail: anatykh@gmail.com;*
²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58000, Україна *e-mail: anatykh@gmail.com*

О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

В работе приводятся результаты расчетов предельных возможностей термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость, в частности для них использование в качестве высокоэффективного нагревателя для прибора очистки воды космического назначения. Библи. 9, Рис. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, эффективность, дистиллятор.

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

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine *e-mail: anatykh@gmail.com;*
²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatykh@gmail.com

LIMITING POSSIBILITIES OF THERMOELECTRIC LIQUID-LIQUID HEAT PUMPS

The paper presents the results of calculations of the limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pumps, in particular, for their use as a high-performance heater for a space-purpose water purifying device. Bibl. 9, Fig. 2.

Key words: thermoelectric heat pump, efficiency, distiller.

References

1. Rozver Yu.Yu. (2003). Termoelektrychnyi kondytsioner dlia transportnykh zasobiv [Thermoelectric air-conditioner for vehicles]. *Termoelektryka – J.Thermoelectricity*, 2, 52 – 56 [in Ukrainian].
2. Anatykhuk L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu. (2004). Issledovaniie kharakteristik termoelektricheskogo okhladitelia potokov zhidkosti ili gaza [Investigation on performance of thermoelectric cooler of liquid or gas flows]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 1, 73 – 80 [in Russian].

3. Anatyshuk L.I., Sudzuki N., Rozver Yu.Yu. (2005). Termoelektrychnyi kondytsioner dlia prymishchen [Indoor thermoelectric air-conditioner]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 3, 53 – 56 [in Ukrainian].
4. Rifert V.G., Usenko V.I., Barabash P.A., et al. (2011). Razrabotka i ispytaniie sistemy regeneratsii vody iz zhidkikh otkhodov zhiznediatelnosti na bortu pilotiruiemykh kosmicheskikh apparatov s ispolzovaniem termoelektricheskogo teplovogo nasosa [Development and test of water regeneration system from liquid biowaste on board of manned spacecrafts with the use of thermoelectric heat pump]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 2, 63 – 74 [in Russian].
5. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Rifert V.G., Rozver Yu.Yu., Usenko V.I., Cherkez R.G. (2013). Termoelektricheskii teplovoi nasos kak sredstvo povysheniia effektivnosti system ochistki vody pri kosmicheskikh polyotakh [Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification systems on space missions]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 6, 78 – 83 [in Russian].
6. Anatyshuk L.I. (2001). Ratsionalnyie oblasti issledovaniia i primenenii termoelektrichestva [Rational fields of investigations and applications of thermoelectricity]. *Termoelektrichestvo – J.Thermoelectricity*, 3 – 14 [in Russian].
7. Anatyshuk L.I. (2007). Sovremennoie sostoianiiie i nekotoryie perspektivy termoelektrichestva [Current status and some prospects of thermoelectricity]. *Termoelektrichestvo – J.Thermoelectricity*, 2, 7 – 20 [in Russian].
8. Lurie Michael V. (2008). *Modeling of oil product and gas pipeline transportation*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA.
9. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Eksperymentalne doslidzhennia termoelektrychnoho teplovoho nasosa ridyna-ridyna [Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 3, 33 – 39 [in Ukrainian].

Submitted 04.08.2017