

УДК 67.02



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І.^{1,2}, Прибила А.В.¹

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.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОЇ КОМУТАЦІЇ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСАХ РІДИНА- РІДИНА ДЛЯ ПРИЛАДІВ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі наведено результати комп'ютерного моделювання термоелектричного теплового насоса рідина-рідина. У результаті багатопараметричної комп'ютерної оптимізації визначено параметри та компонування термоелектричних модулів і теплообмінників для досягнення найбільшої ефективності.

Ключові слова: термоелектричний тепловий насос, комп'ютерне моделювання, очищення води.

The paper presents the results of computer simulation of liquid-liquid thermoelectric heat pump. Multi-parameter computer optimization was used to determine parameters and arrangement of thermoelectric modules and heat exchangers to achieve the highest efficiency.

Key words: thermoelectric heat pump, computer simulation, liquid-liquid system.

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 – питомій витраті енергії, габаритах, вазі і якості одержуваного дистилляту прилади для очищення води з термоелектричним тепловим насосом перевершують відомі аналоги космічного призначення [4, 5].

Однак перед такими приладами у зв'язку з можливостями їх нових застосувань

(пілотовані місії освоєння Марса та інших планет), встановлюються 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.

Одним із способів розв'язання такого завдання є оптимізація термоелектричного теплового насоса не в цілому, а кожного термоелектричного модуля та теплообмінника окремо. Такий підхід передбачає створення таких оптимальних умов роботи кожного термоелектричного перетворювача, які забезпечать найкращі значення ефективності цілого приладу.

Для розв'язання такого багатофакторного завдання було використано сучасні методи комп'ютерного об'єктно-орієнтованого програмування.

Мета нашої роботи – підвищення ефективності термоелектричного теплового насоса шляхом проведення багатопараметричної комп'ютерної оптимізації конструювання термоелектричних модулів і теплообмінників теплового насоса.

Фізична модель ТТН

Фізична модель термоелектричного теплового насоса показано на рис. 1 – 3. 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.

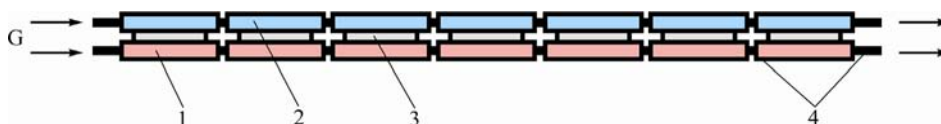


Рис. 1. Найпростіша фізична модель термоелектричного теплового насоса.

У найпростішому випадку така модель являє собою послідовно з'єднані гарячі 1 і холодні теплообмінники 2, між якими знаходяться термоелектричні модулі 3 (рис. 1). Однак практична реалізація такої конструкції не завжди раціональна. Це зумовлено значними розмірами такого пристрою.

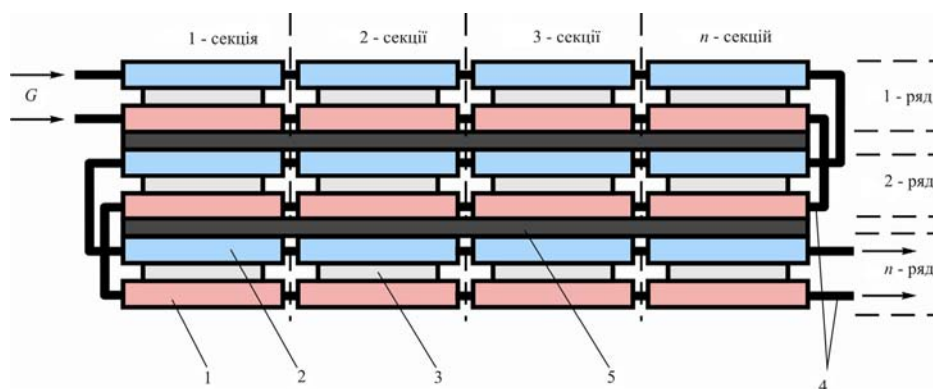


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного теплового насоса з тепловою ізоляцією.

На практиці зручніше з'єднувати теплообмінники 1, 2 з термоелектричними модулями 3 у ряди із різною кількістю секцій, між якими знаходиться теплова ізоляція 5.

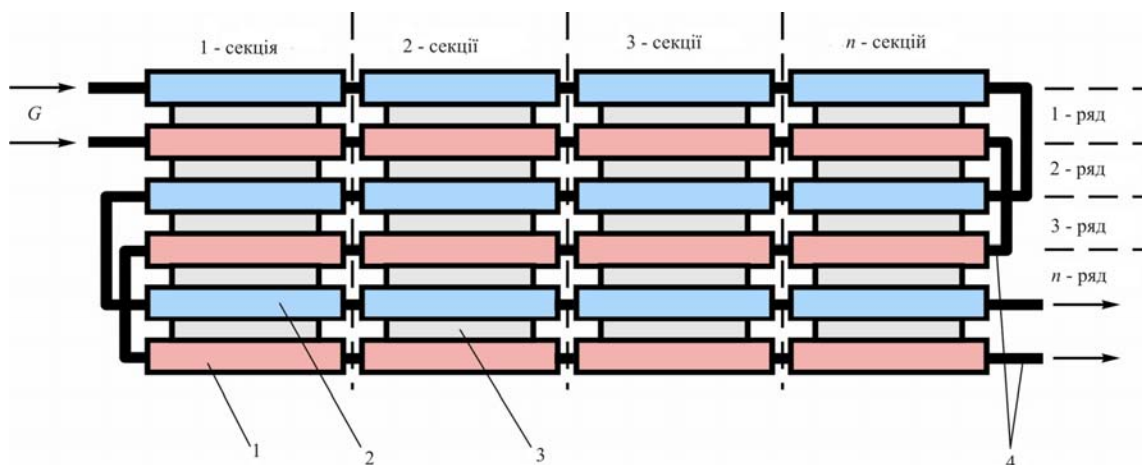


Рис. 3. Фізична модель термоелектричного теплового насоса.

Однак для зменшення масогабаритів такого обладнання можна спростити конструкцію, запропоновану на рис. 2. У такому випадку ряд теплообмінників буде забезпечувати умови роботи двох рядів термоелектричних модулів (рис. 3). Це дає можливість значно зменшити кількість теплообмінників, а, отже, вагу та розміри такого пристрою.

Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

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

та електричного заряду

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

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:

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

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

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.

Процеси тепло- і масообміну теплоносіїв у каналах теплообмінників у стаціонарному випадку описуються рівняннями [8]

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

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

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

де p – тиск, ρ – густина теплоносія, A – поперечний переріз труби, \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 труби, Q_2 – тепло, що виділяється внаслідок в'язкого тертя [Вт/м] на одиницю довжини теплообмінника, Q_{wall} – тепловий потік, що надходить від теплоносія до стінок труби [Вт/м]

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

де h – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з рівняння

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

Тут Nu – число Нуссельта, що визначається з рівняння

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

де $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$ – число Прандтля, μ – динамічна в'язкість, $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ – число Рейнольдса, $3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$.

Коефіцієнт Дарсі f_D визначається використанням рівняння Черчілля для всього спектра значень числа Рейнольдса та усіх значень e/d (e – шорсткість поверхні стінки):

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

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

З розв'язку рівнянь (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 використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics.

Результати комп'ютерного моделювання

Нижче наведено результати оптимізації компонування термоелектричних модулів і теплообмінників для реальних теплових і температурних умов роботи теплового насоса для приладу очищення води космічного призначення. Результати комп'ютерної оптимізації конструкції теплообмінників, а також електричного живлення термоелектричних модулів є важливими і будуть докладно показані в наступній роботі.

Вихідні дані:

електрична потужність живлення термоелектричних модулів – 300 Вт;

кількість термоелектричних модулів – 80 шт.;

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

температура теплоносія на вході в холодний теплообмінний контур – 31.5 °С;

гідравлічний опір кожного з теплообмінних контурів – 0.07 атм;

витрати теплоносія в кожному контурі – 22 мол/с.

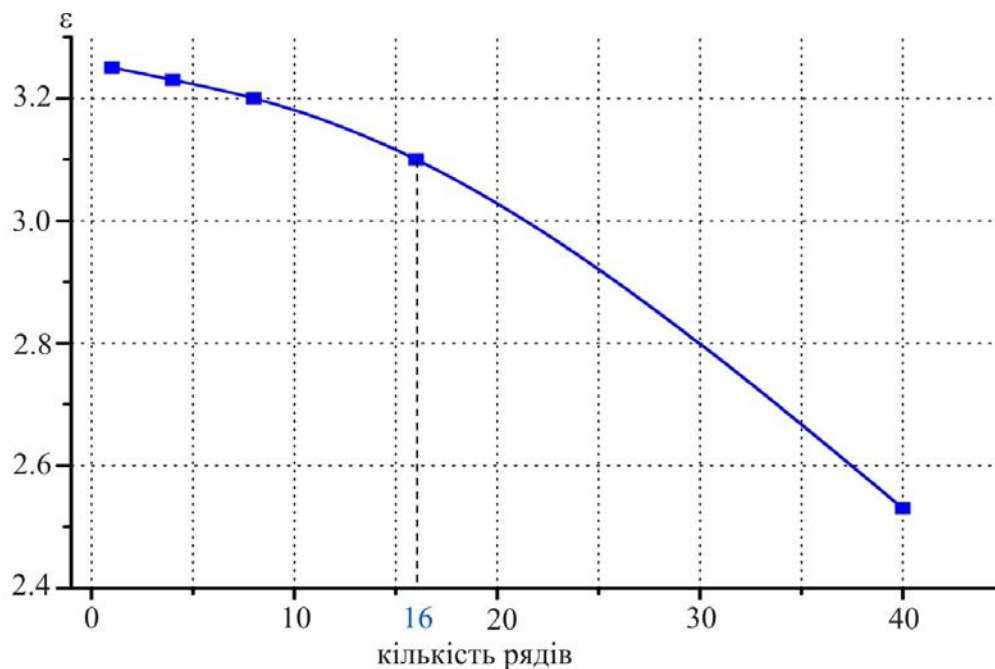


Рис. 4. Залежність опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса від кількості рядів.

У такий спосіб були розраховані значення інтегрального опалювального коефіцієнта і зменшення ваги обладнання (у відсотковому відношенні) для різних варіантів конструкції термоелектричного теплового насоса:

- 1) 1 ряд із 80 термоелектричних модулів і 160 теплообмінників;
- 2) 4 ряди із 40 термоелектричних модулів і 120 теплообмінників;
- 3) 8 рядів із 10 термоелектричних модулів і 90 теплообмінників;
- 4) 16 рядів із 5 термоелектричних модулів і 85 теплообмінників;
- 5) 40 рядів із 2 термоелектричних модулів і 82 теплообмінників.

На рис. 4 показано залежність опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насосу ϵ від кількості рядів. Як і слід було сподіватися, найбільша ефективність у варіанта ідеалізованої моделі (рис. 1).

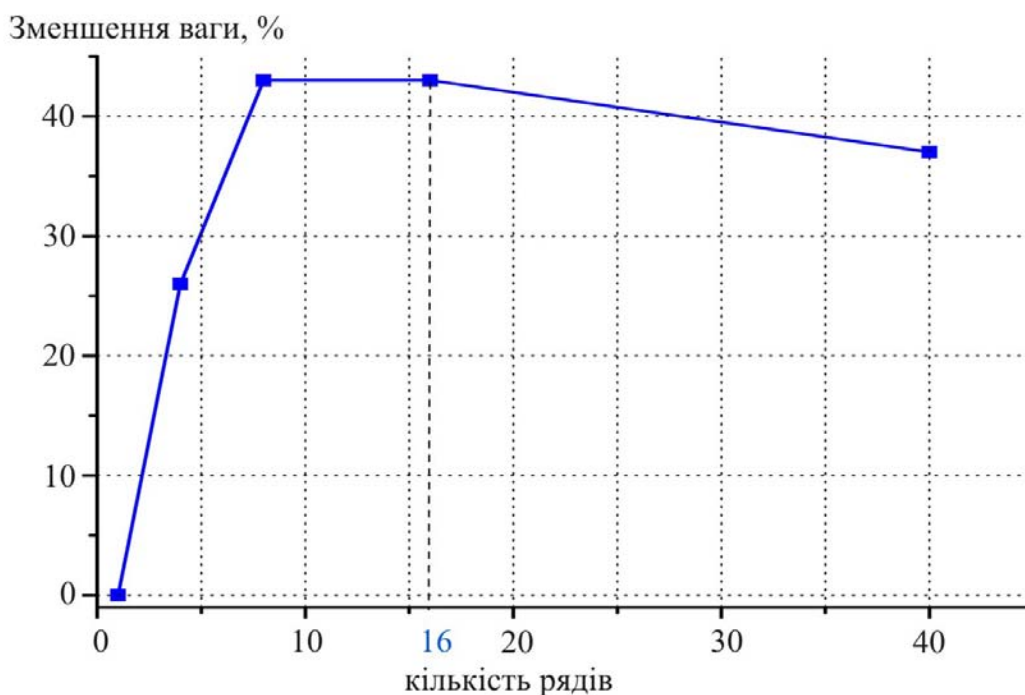


Рис. 5. Залежність відсоткового зменшення ваги термоелектричного теплового насоса від кількості рядів.

Для вибору найбільш раціональної конструкції термоелектричного теплового насоса важливими є масогабаритні показники. Аналіз відсоткового зменшення ваги термоелектричного теплового насоса залежно від кількості рядів у ньому (рис. 5) свідчить про наявність оптимуму тому, що зменшення кількості теплообмінників супроводжується збільшенням кількості сполучних елементів, що обтяжує конструкцію. Таким чином, виявлений оптимум, який знаходиться в області 16 рядів по 5 термоелектричних модулів з 85 теплообмінниками.

Порівняння результатів, отриманих у результаті комп'ютерного моделювання, з попередніми дослідженнями [5] свідчать про підвищення ефективності (опалювального коефіцієнта) на 15 – 20 % термоелектричного теплового насоса із запропонованим компонованням термоелектричних модулів і теплообмінників

Висновки

1. Розраховано залежність ефективності термоелектричного теплового насоса від його конструктивних параметрів.
2. Встановлено, що залежність відсоткового зменшення ваги термоелектричного теплового

насоса від кількості рядів має оптимум в області 16 рядів.

3. Порівняння отриманих результатів з попередніми дослідженнями [5] свідчать про підвищення ефективності термоелектричного теплового насоса із запропонованим компонованням термоелектричних модулів і теплообмінників на 15 – 20 %.

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.

Надійшла до редакції 20.08.2015