

УДК 537.32



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І.<sup>1,2</sup>, Прибила А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Юрія  
Федьковича, вул. Коцюбинського, 2,  
Чернівці, 58000, Україна



Прибила А.В.

## ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА РІДИНА-РІДИНА

---

*У роботі наводяться результати комп'ютерного моделювання термоелектричного теплового насоса рідина-рідина. Розглянуто найбільш раціональні варіанти електричного живлення теплового насоса. Шляхом багатопараметричної комп'ютерної оптимізації визначені параметри системи живлення термоелектричного теплового насоса, що дають можливість досягти підвищення його опалювального коефіцієнта на 15 %.*

**Ключові слова:** термоелектричний тепловий насос, комп'ютерне моделювання, система регенерації води.

*The paper presents the results of computer simulation of the thermoelectric heat pump is a liquid-liquid system. Consideration of the most rational variants of electric power supply of the heat pump. By multiparametric optimization of the parameters of the computer system power thermoelektricheskogo heat pump can achieve increasing its heating rate of 15%.*

**Key words:** thermoelectric heat pump, computer modeling, water regeneration system.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Застосування термоелектричних теплових насосів (ТТН) у системах кондиціонування повітря й рідини, випарниках спеціального призначення пов'язане з їхніми унікальними перевагами [1 – 5].

Прикладом ефективного використання термоелектричних теплових насосів є системи регенерації води з рідких відходів життєдіяльності на борту пілотованих космічних апаратів (урини, конденсату атмосферної вологи, санітарно-гігієнічної води), [4, 5].

У роботі [8] наводяться результати комп'ютерного моделювання термоелектричного теплового насоса рідина-рідина. Шляхом багатопараметричної комп'ютерної оптимізації визначено конструктивні параметри компонування термоелектричних модулів і теплообмінників термоелектричного теплового насоса. Наступний етап цієї роботи – комп'ютерна оптимізація параметрів системи живлення термоелектричного теплового насоса, що дозволить зробити можливим досягти дальшого підвищення його ефективності.

Мета пропонованої роботи – підвищення ефективності термоелектричного теплового насоса шляхом проведення його багатопараметричного комп'ютерного моделювання й оптимізації параметрів системи живлення термоелектричного теплового насоса.

### Фізична модель ТТН

Фізичну модель термоелектричного теплового насоса показано на рис. 1. Вона складається з рідинної системи теплообміну, що забезпечує проходження теплового потоку  $Q_x$  через холодну сторону термоелектричних модулів 1, власне термоелектричні модулів 2, що складаються із напівпровідникових гілок  $n$  - і  $p$  - типу провідності, і рідинної системи теплообміну 3, що забезпечує проходження теплового потоку  $Q_r$  через їхню гарячу сторону.

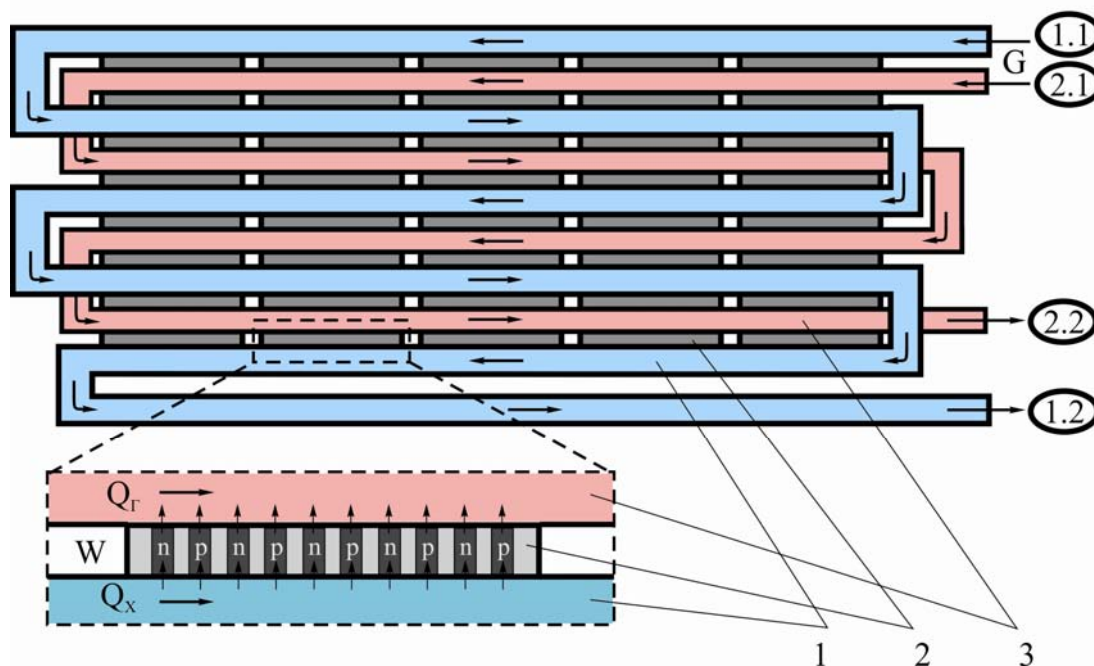


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного теплового насоса.

У рідинній системі теплообміну циркулює теплоносії (урина, конденсат атмосферної вологи, санітарно-гігієнічна вода) з витратою  $G$  мол/с. Було розглянуто два варіанти підключення теплоносіїв. У першому випадку теплоносії в гарячій 3 і холодній 1 системах теплообміну рухаються в одному напрямку ( $1.1 \rightarrow 1.2$ ;  $2.1 \rightarrow 2.2$ ), а в другому – назустріч один одному ( $1.1 \rightarrow 1.2$ ;  $2.2 \rightarrow 2.1$ ). Крім того, розглянуті різні варіанти живлення  $W$  термоелектричних модулів 2:

- 1) усі модулі живляться одним струмом і напругою, оптимальними для всього теплового насоса;
- 2) модулі згруповані в секції, живлення кожної з яких оптимізується окремо;
- 3) живлення всіх термоелектричних модулів здійснюється індивідуально.

### Математичний і комп'ютерний описи 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  $\vec{E}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність теплового потоку,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – 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:

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

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

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,  $\nabla T_1$  – градієнт температури,  $Q_1$  – тепловий потік.

Процеси тепло- і масообміну теплоносіїв у каналах теплообмінників у стаціонарному випадку описуються рівняннями [9]

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

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

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

де  $p$  – тиск,  $\rho$  – щільність 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, 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,  $\mu$  – 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)

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

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

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. З його допомогою проведено багатопараметричну оптимізацію конструкції термоелектричного теплового насоса й визначено електричні і теплові параметри для досягнення граничних значень його опалювального коефіцієнта при забезпеченні можливості функціонування ТТН у жорстких умовах проведення пілотованих космічних місій.

### Результати комп'ютерного моделювання

Нижче наведено результати оптимізації параметрів електричного живлення термоелектричних модулів ( згідно з моделлю в п. 1) для реальних теплових і температурних умов роботи теплового насоса. Результати комп'ютерних досліджень конструкції термоелектричних модулів, а також системи теплообміну є дуже важливими й будуть докладно висвітлені 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°C;

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

гідравлічний опір кожного з теплообмінних контурів – не більше 0.07 атм;

витрата теплоносія в кожному контурі – не більше 22 мол/с.

Таким чином, розраховано значення інтегрального опалювального коефіцієнта для різних варіантів електричного живлення термоелектричних модулів:

– усі модулі харчуються одним струмом і напругою, оптимальними для всього теплового насоса;

– модулі згруповані у дві секції, живлення кожної з яких оптимізується окремо;

– модулі згруповані в чотири секції, живлення кожної з яких оптимізується окремо;

– живлення всіх термоелектричних модулів оптимальним струмом здійснюється індивідуально (80 умовних секцій).

Як показують результати моделювання (рис. 2) за такого гідравлічного підключення гарячого й холодного теплообмінних контурів, коли обидва теплоносії рухаються в протилежних напрямках (напрямок 1.1 → 1.2; 2.2 → 2.1 на рис. 1), опалювальний коефіцієнт теплового насоса практично не залежить від кількості секцій і перебуває на рівні ~2.6 ÷ 2.7. У випадку ж, коли теплоносії рухаються в одному напрямку (напрямок 1.1 → 1.2; 2.1 → 2.2 на рис. 1), збільшення кількості секцій з індивідуальним оптимальним живленням призводить до росту опалювального коефіцієнта до рівня ~3.0 ÷ 3.1. Збільшення опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса на 15% для таких умов пов'язане з тим, що залежність опалювального коефіцієнта термоелектричних модулів від перепаду температур і струму живлення в кожній секції є нелінійною. Використання декількох незалежних секцій у такому випадку дає можливість найбільш ефективно реалізувати всі переваги термоелектричного перетворення енергії в кожному діапазоні температур.

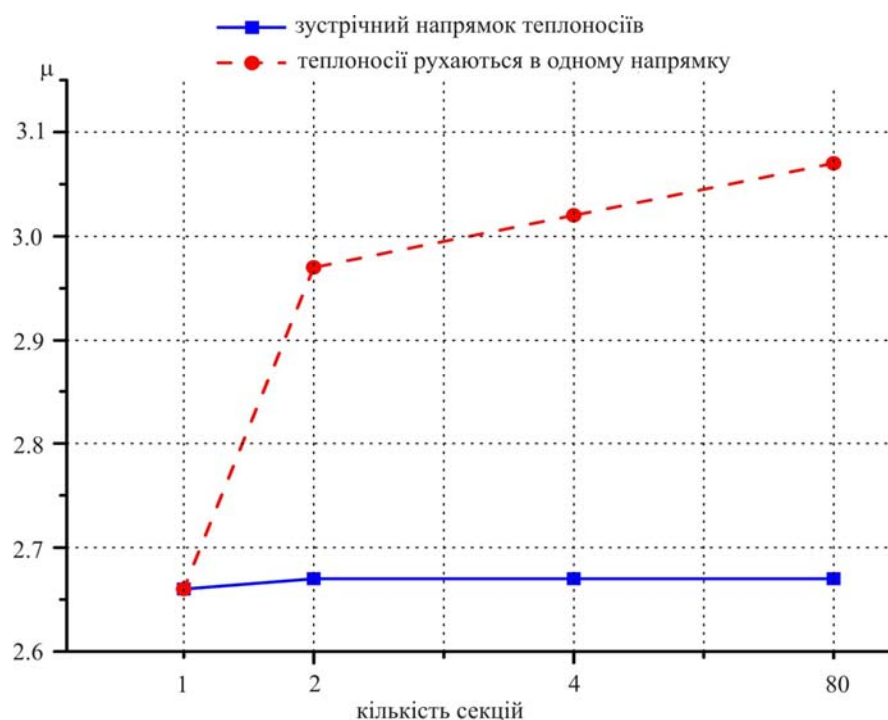


Рис.2. Залежність опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса від кількості секцій для двох різних гідравлічних підключень теплоносіїв.

## Висновки

1. Розраховано оптимальні енергетичні параметри термоелектричного теплового насоса для реальних умов його функціонування.
2. Встановлено, що збільшення кількості секцій термоелектричного теплового насоса з індивідуальним електричним живленням кожної із секцій призводить до росту інтегрального опалювального коефіцієнта на 15%.
3. Показано, що найбільш ефективним гідравлічним підключенням гарячого й холодного теплообмінного контурів є випадок, коли обидва теплоносія рухаються в одному напрямку.

## **Література**

1. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів / Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика. – № 2. – 2003. – с. 52 – 56.
2. Анатичук Л.І. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа / Л.І. Анатичук, Л.Н. Вихор, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. – № 1. – 2004. – с. 73 – 80.
3. Анатичук Л.І. Термоелектричний кондиціонер для приміщень / Л.І. Анатичук, Н. Сузукі, Ю.Ю. Розвер // 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. Анатичук Л.І., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость – жидкость для приборов очистки воды космического назначения. – № 4. – 2015.

Надійшла до редакції 10.12.2015