

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

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

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА РІДИНА-РІДИНА

На основі спроектованої конструкції термоелектричного теплового насоса рідина-рідина виготовлено його експериментальний зразок та проведено серію випробувань. Здійснено порівняння характеристик досліджуваного термоелектричного теплового насоса із його аналогами та з результатами комп'ютерного проектування.

Ключові слова: термоелектричний тепловий насос, експериментальне дослідження, система регенерації води.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Застосування термоелектричних теплових насосів (ТТН) у системах кондиціонування повітря й рідини, випарниках спеціального призначення пов'язане з унікальними перевагами таких насосів [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 роботах [6, 7] наводяться результати комп'ютерного проектування термоелектричного теплового насоса рідина-рідина. Шляхом багатопараметричної комп'ютерної оптимізації визначено конструктивні параметри термоелектричного теплового насоса, що забезпечують найвищі показники його ефективності. Наступний етап цієї роботи – експериментальне дослідження отриманої конструкції термоелектричного теплового насоса.

Мета пропонованої роботи – експериментальне підтвердження основних результатів комп'ютерного проектування термоелектричного теплового насоса в умовах наближених до його реальної експлуатації в якості вискоефективного нагрівника для систем регенерації води космічного призначення.

Конструкція та умови експлуатації ТТН

Виходячи із вимог, які ставляться перед ТТН для системи регенерації води космічного призначення (табл. 1), було проведено його комп'ютерне проектування та визначено конструкцію теплового насоса (рис. 1).

Таблиця 1

Вимоги до ТТН

№	Параметр	Значення
1.	Електрична потужність живлення термоелектричних модулів, Вт	300
2.	Температура теплоносія на вході в гарячий теплообмінний контур, °С	36
3.	Температура теплоносія на вході в холодний теплообмінний контур, °С	31.5
4.	Гідравлічний опір кожного з теплообмінних контурів, атм	0.07
5.	Витрата теплоносія в кожному контурі, мл/с	22
6.	Матеріал для теплообмінників, що контактує з рідиною	титан, нержавіюча сталь AISI 304

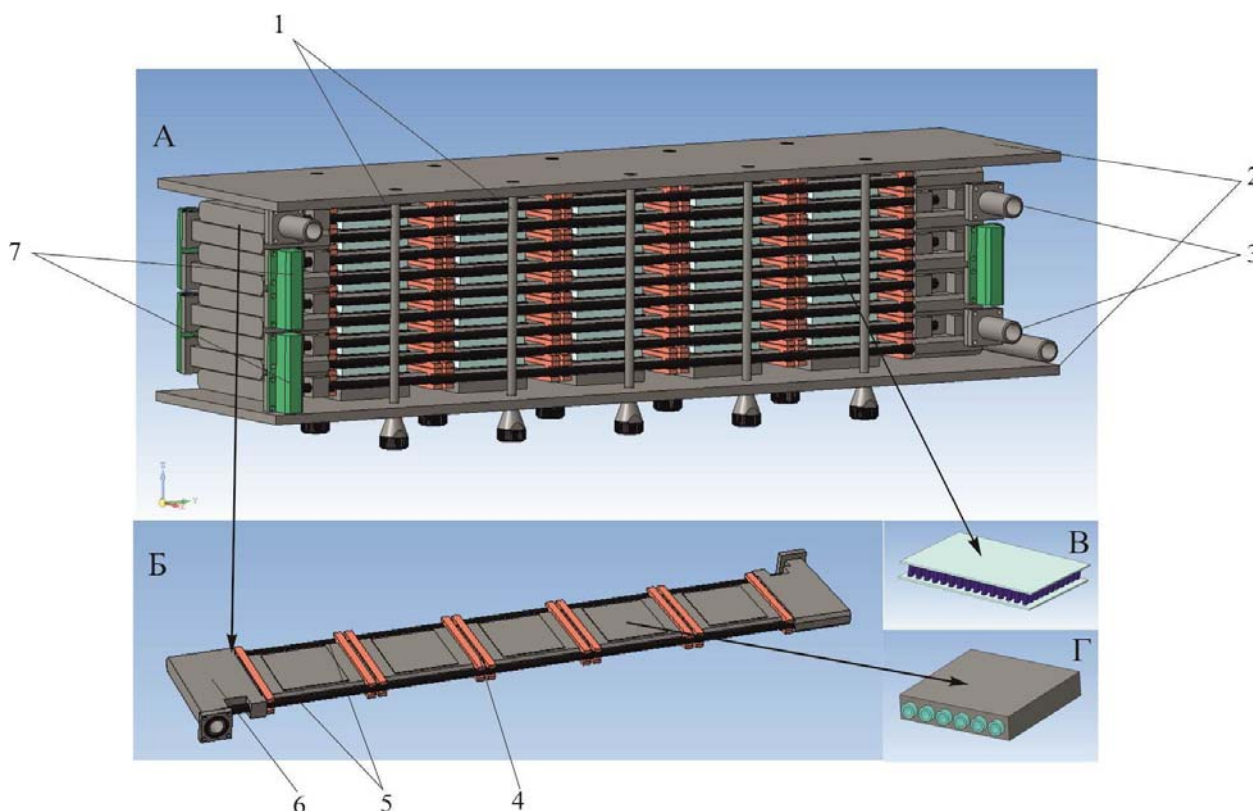


Рис. 1. Конструкція термоелектричного теплового насоса рідина-рідина: А – зовнішній вигляд, Б – схема комутації одного ряду теплообмінників, В – термоелектричний модуль, Г – рідинний теплообмінник; 1 – вертикальні стяжки, 2 – деталі корпусу, 3 – штуцери, 4 – фіксатори з прокладками, 5 – горизонтальні стяжки, 6 – колектори, 7 – перехідники

ТТН складається із двох ідентичних блоків, що містять по 40 термоелектричних модулів і відрізняються лише способом їх електричного живлення. Гідравлічна комутація блоків ТТН здійснюється послідовно. Кожний блок складається із рідинних теплообмінників (Г), що разом із колекторами (6), горизонтальними стяжками (5) та фіксаторами (4) формують ряди теплового насосу (Б). Між рядами теплового насосу знаходяться термоелектричні модулі (В). З'єднання рядів

здійснюється за допомогою вертикальних стяжок (1) та перехідників (7). На входах і виходах гарячого та холодного контурів розташовані штуцери (3).

Зовнішній вигляд блоків ТТН приведено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд блоків термоелектричного теплового насоса

Експериментальне дослідження ТТН

Вимірювання характеристик здійснювалось на спеціально створеному стенді. Схему вимірювального стенду представлено на рис. 3. На схемі 1 та 2 – гарячий та холодний термостати, що забезпечують рух теплоносія відповідної температури по каналах теплового насоса (4, 5). Температури теплоносія на вході і виході з ТТН фіксуються термопарами 3. Живлення модулів першого 4 та другого 5 блоків ТТН здійснюється окремими блоками живлення 6.

Окремо проведені вимірювання гідравлічного тиску в каналах термоелектричного теплового насоса для забезпечення умов експлуатації ТТН.

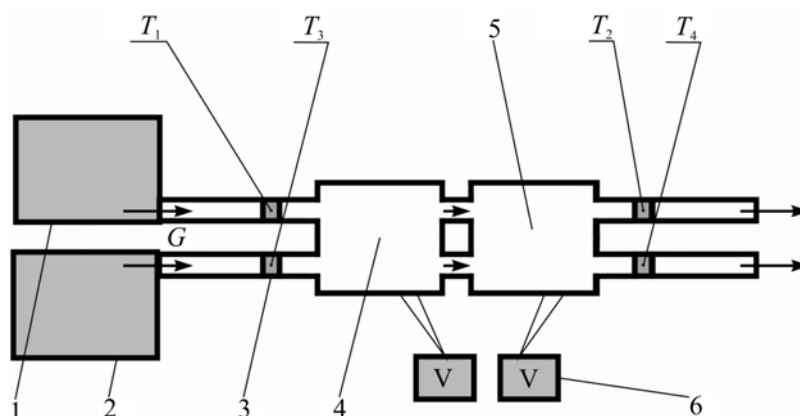


Рис. 3. Схема вимірювального стенду дослідження ТТН:

1 – гарячий термостат, 2 – холодний термостат, 3 – комплект диференційних термопар із реєструючим пристроєм, 4 – 1 блок ТТН, 5 – 2 блок ТТН, 6 – блоки живлення 1 та 2 блоків ТТН,
 T_1 – температура теплоносія на вході в гарячий контур ТТН, T_2 – температура теплоносія на виході з гарячого контура ТТН, T_3 – температура теплоносія на вході в холодний контур ТТН,
 T_4 – температура теплоносія на виході з холодного контура ТТН.

Тепловий потік, що передається термоелектричними модулями у гарячий контур ТТН, визначався формулою:

$$Q_{\Gamma} = C \cdot G \cdot \Delta T_1, \quad (1)$$

де Q_{Γ} - теплопродуктивність, C – теплоємність теплоносія, G – витрата теплоносія, $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ - різниця температур між входом і виходом в гарячий контур.

Опалювальний коефіцієнт, в такому випадку, визначається за формулою:

$$\mu = Q_{\Gamma} / W, \quad (2)$$

де W – електрична потужність живлення ТТН.

Для контролю балансу теплот в ТТН здійснено також вимірювання холодопродуктивності та холодильного коефіцієнту ТТН в його холодному контурі за аналогічною методикою:

$$Q_{\chi} = C \cdot G \cdot \Delta T_2, \quad (3)$$

де Q_{χ} - холодопродуктивність, C – теплоємність теплоносія, G – витрата теплоносія, $\Delta T_2 = T_3 - T_4$ - різниця температур між виходом і входом в холодний контур.

Охолоджувальний коефіцієнт в такому випадку визначається за формулою:

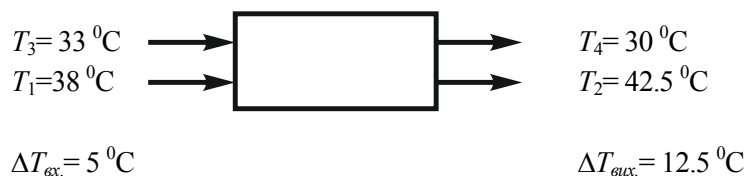
$$\varepsilon = Q_{\chi} / W, \quad (4)$$

де W – електрична потужність живлення ТТН.

Результати вимірювання характеристик ТТН

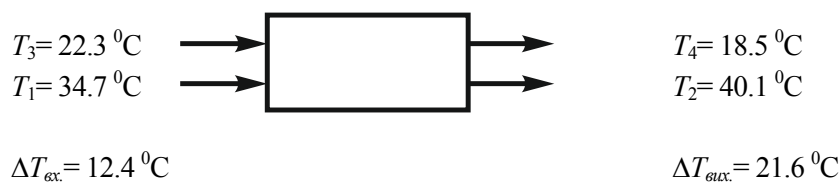
Проведені дослідження характеристик кожного з блоків ТТН, а також для випадку двох блоків, що гідравлічно підключені послідовно, проте мають індивідуальне живлення.

Результати вимірювання 1 блоку:



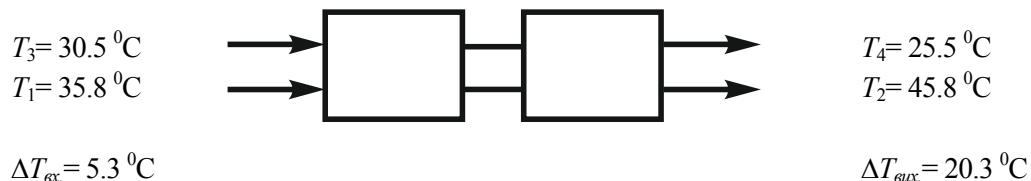
За наступних умов живлення термоелектричних модулів – $U = 28 \text{ В}$, $I = 4.6 \text{ А}$, $W = 129 \text{ Вт}$, при витраті теплоносія $G = 22.7 \text{ мл/с}$ і гідравлічному опорі $\Delta p = 0.025 \text{ атм}$ теплопродуктивність першого блоку ТТН складає $Q_2 = 429 \text{ Вт}$, а опалювальний коефіцієнт $\mu = 3.3$.

Результати вимірювання 2 блоку:



За наступних умов живлення термоелектричних модулів – $U = 27.9 \text{ В}$, $I = 6.7 \text{ А}$, $W = 186.9 \text{ Вт}$, при витраті теплоносія $G = 22.2 \text{ мл/с}$ і гідравлічному опорі $\Delta p = 0.025 \text{ атм}$ теплопродуктивність другого блоку ТТН складає $Q_2 = 503.5 \text{ Вт}$, а опалювальний коефіцієнт $\mu = 2.7$.

Результати вимірювання двох блоків ТТН:



За наступних умов живлення термоелектричних модулів – $U = 27.9 \text{ В}$, $I = 11.1 \text{ А}$, $W = 309 \text{ Вт}$, при витраті теплоносія $G = 21 \text{ мл/с}$ і гідравлічному опорі $\Delta p = 0.05 \text{ атм}$ теплопродуктивність ТТН складає $Q_e = 882 \text{ Вт}$, а опалювальний коефіцієнт $\mu = 2.85$.

З результатів вимірювання видно, що перший блок працює при нижчому перепаді температур на вході ($\Delta T_{\text{вх.}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), що зумовлює вище значення опалювального коефіцієнта $\mu = 3.3$. Другий блок працює при перепаді температур на вході ($\Delta T_{\text{вх.}} = 12.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), що зумовлює значення опалювального коефіцієнта $\mu = 2.7$. Оптимізацію блоків ТТН було здійснено саме на ці конкретні інтервали температур, що дозволило отримати кінцевий опалювальний коефіцієнт $\mu = 2.85$. Порівняння отриманих результатів із характеристиками ТТН, розроблених раніше [4, 5], свідчать про переваги розробленої конструкції ТТН на 10 – 15 %.

Крім того, здійснено оцінку розбіжності між результатами комп'ютерного моделювання виконаних в роботах [6, 7] та результатами експериментальних досліджень виконаних в даній роботі. Виявлено, що за опалювальним коефіцієнтом результати експериментальних досліджень є нижчими приблизно на 7 %.

Висновки

1. Проведено експериментальне дослідження характеристик ТТН та визначено його теплопродуктивність $Q_e = 882 \text{ Вт}$ і опалювальний коефіцієнт $\mu = 2.85$ в умовах наближених до його реальної експлуатації в якості високоефективного нагрівника для систем регенерації води космічного призначення
2. Здійснено оцінку розбіжності між результатами комп'ютерного моделювання виконаних в роботах [6, 7] та результатами експериментальних досліджень, що становить $\sim 7 \%$.
3. Порівняння отриманих результатів із характеристиками ТТН, розроблених раніше [4, 5], свідчать про переваги розробленої конструкції ТТН за опалювальним коефіцієнтом на 10 – 15 %.

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. Термоелектрический тепловой насос, как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатичук Л.И., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоелектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
6. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоелектрических тепловых насосах жидкость – жидкость для приборов очистки воды космического назначения. // Термоелектричество. – 2015. – № 4. – С. 45 – 51.
7. Анатичук Л.І., Прибыла А.В. Оптимізація системи живлення термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2015. – № 6. – С. 53 – 58.

Надійшла до редакції 20.07.2017

**Анатичук Л.И.^{1,2} ак. НАН України,
Прибыла А.В.^{1,2} канд. физ.-мат. наук, Розвер Ю.Ю.¹**

¹Інститут термоелектричества НАН и МОН України,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина; *e-mail: anatyck@gmail.com*;

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58000, Украина *e-mail: anatyck@gmail.com*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

На основе спроектированной конструкции термоелектрического теплового насоса жидкость-жидкость изготовлен его экспериментальный образец и проведена серия испытаний. Осуществлено сравнения характеристик исследуемого термоелектрического теплового насоса с его аналогами и с результатами компьютерного проектирования.

Ключевые слова: термоелектрический тепловой насос, экспериментальное исследование, система регенерации воды.

**L.I. Anatyck^{1,2} acad. National Academy of Sciences of Ukraine,
A.V. Prybyla^{1,2} Candidate Phys.-math. Sciences,
Yu.Yu. Rozver¹**

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine *e-mail: anatyck@gmail.com*;

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMOELECTRIC LIQUID-LIQUID HEAT PUMP

Based on the elaborated design of thermoelectric liquid-liquid heat pump, its experimental prototype was manufactured and a series of tests was performed. The characteristics of thermoelectric heat pump under study were compared to its analogs and the results of computer design.

Key words: thermoelectric heat pump, experimental study, water recovery system.

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. Anatyshuk 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 zhiznedeiatelnosti 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., Prybyla A.V. (2015). Optimizatsiia teplovoi kommutatsii v termoelektricheskikh teplovykh nasosakh zhidkost-zhidkost dlia priborov ochistki vody kosmicheskogo naznacheniiia [Optimization of thermal connections in liquid-liquid thermoelectric heat pumps for water purification devices of space application]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 4, 45 – 51 [in Russian].
7. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optyimizatsiia systemy zhyvlennia termoelektrychnoho teplovoho nasosa ridyna- ridyna [Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 6, 53 – 58 [in Ukrainian].

Submitted 20.07.2017