

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



Анатичук Л.І.

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Прибила А.В.

ВПЛИВ МІНІАТЮРИЗАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі наводяться результати розрахунків впливу мініатюризації на граничні можливості термоелектричного теплового насоса рідина-рідина, зокрема для його використання у якості високоефективного нагрівника для приладу очистки води космічного призначення. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: термоелектричний тепловий насос, ефективність, дистилятор.

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 – 7], зокрема 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).

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) [5 – 7]. Випробування їх ефективності на стенді NASA показали, що за найважливішими показниками – питомій витраті енергії, габаритах, вазі і якості одержуваного дистиляту прилади для очищення води з термоелектричним тепловим насосом перевершують відомі аналоги космічного призначення [6].

Однак перед такими приладами встановлюються нові, більш високі вимоги, що пов'язані із можливостями їх нових застосувань (пілотовані місії освоєння Марса та інших планет). Це в основному стосується зменшення їх ваги та розмірів при збереженні (або навіть покращенні) досягнутого рівня енергоефективності. В роботах [8, 9] наводяться результати розрахунків впливу мініатюризації термоелектричних модулів у режимі нагріву. Шляхом комп'ютерного моделювання визначено вплив висоти віток термоелектричного матеріалу на опалювальний коефіцієнт термоелектричних модулів та знайдено оптимальну висоту вітки матеріалу, що забезпечує мінімальні втрати ефективності перетворення енергії. Проте комплексну задачу оптимізації термоелектричного теплового насоса, що забезпечує зниження його масогабаритних показників, досі не було вирішено.

Мета нашої роботи – є дослідження енергетичної ефективності термоелектричного теплового насоса космічного призначення в умовах зменшення його габаритних розмірів.

Фізична модель ТТН

Фізична модель термоелектричного теплового насоса зображено 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.

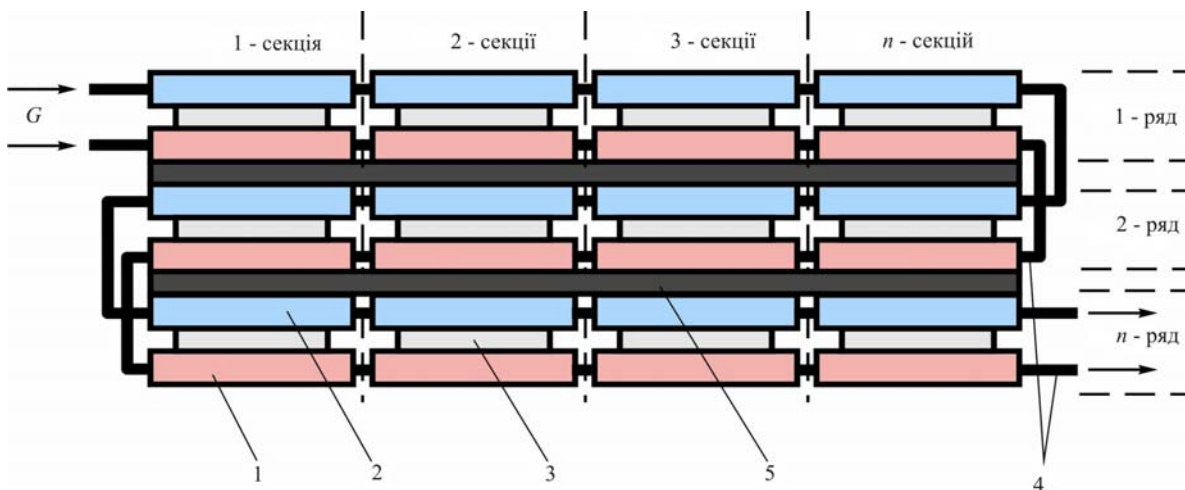


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного теплового насоса з тепловою ізоляцією.

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

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.

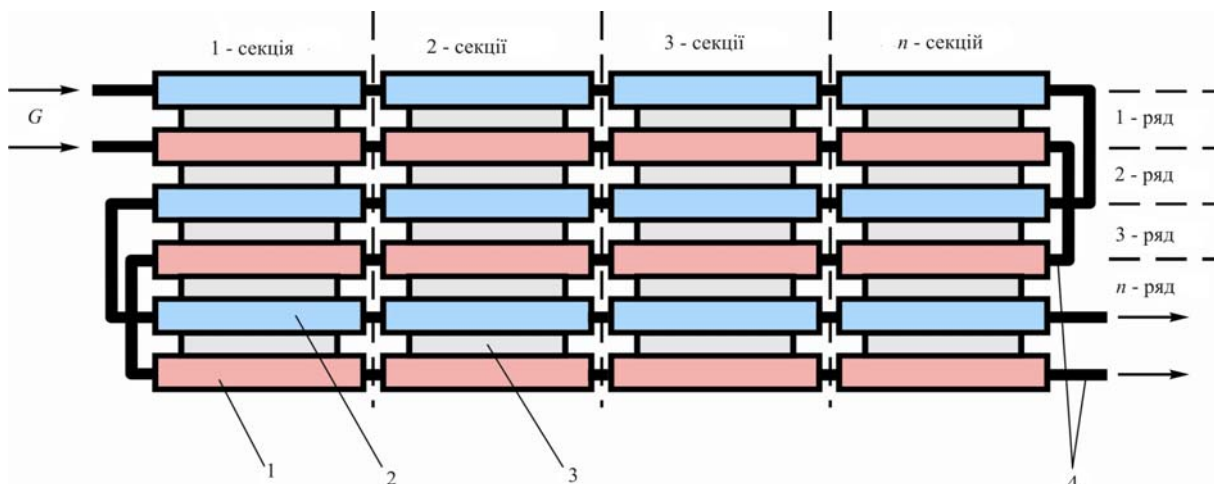


Рис. 3. Фізична модель термоелектричного теплового насоса.

Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

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

та 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} – 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

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

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

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

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

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 [10]

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

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

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

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 розрахунків параметрів термоелектричного насосу відповідно до фізичної моделі зображеної на рис.3. Було досліджено вплив затрат енергії $W_{\text{нас}}$ на прокачування теплоносія через систему теплообміну на опалювальний коефіцієнт μ термоелектричного теплового насоса для різних висот термоелектричних перетворювачів енергії (h від 0.1 до 1 мм) та різних перепадів температур теплоносіїв на вході у теплообмінні контури термоелектричного теплового насоса (ΔT від 0 до 10 К) (рис.4).

Таким чином, із аналізу рис.4 видно, що опалювальний коефіцієнт термоелектричного теплового насоса слабо залежить від висоти термоелектричного перетворювача до висоти вітки термоперетворювача 0.5 мм і починає різко зменшувати при його подальшій мініатюризації. Так, при зменшенні висоти вітки термоперетворювача у 2 рази (від 1 до 0.5 мм) – опалювальний коефіцієнт зменшується лише на 5 %, проте наступне його зменшення (до висоти 0.25 мм) – веде до зменшення μ вже на ~22 %, а при висоті вітки 0.1 мм – μ зменшується на ~45 %. З другого боку, зменшення висоти вітки у два рази призводить до зменшення ваги теплового насоса на 25 %, об'єму – на 28 %, а також його вартості – на 35%.

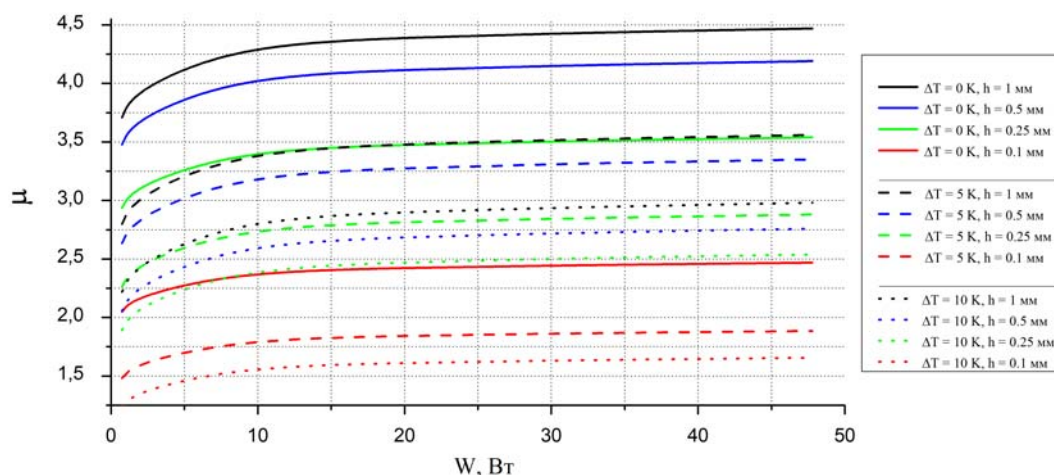


Рис. 4. Залежність опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса μ від потужності живлення системи теплообміну W для різних висот термоелектричних перетворювачів енергії h та різних перепадів температур теплоносіїв на вході у теплообмінні контури термоелектричного теплового насоса ΔT .

Крім того, проаналізовано втрати у ефективності теплового насоса, до яких призводить необхідність додаткового живлення системи теплообміну (рис. 5). Аналіз рис. 5 показує, що з ростом потужності живлення рідинного насоса, що забезпечує циркуляцію теплоносія в системі теплообміну, опалювальний коефіцієнт термоелектричного теплового насоса спочатку зростає,

що зумовлено зменшенням втрат перепаду температур у системі теплообміну внаслідок зростання швидкості циркуляції теплоносія. Врахування у виразі для опалювального коефіцієнту термоелектричного теплового насоса (17) витрат енергії на прокачування теплоносія (18) призводить до того, що μ , досягнувши максимуму, починає поступово знижуватися внаслідок того, що витрати енергії на перекачування теплоносія починають досягати рівня витрат енергії на функціонування термоелектричних модулів.

$$\mu = \frac{Q_2}{W_{mn}}, \quad (17)$$

$$\mu_{втр} = \frac{Q_2}{W_{mn} + W_{нас}}, \quad (18)$$

де Q_2 – теплопродуктивність теплового насоса, W_{mn} – потужність живлення термоелектричних модулів, $W_{нас}$ – потужність живлення рідинних насосів системи теплообміну.

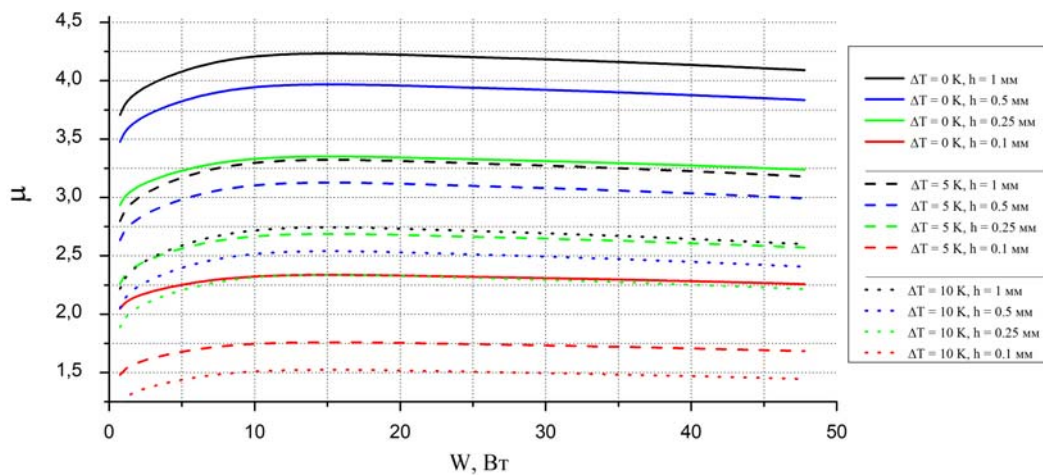


Рис. 5. Залежність опалювального коефіцієнта термоелектричного теплового насоса μ (із врахуванням затрат енергії на прокачування теплоносія) від потужності живлення системи теплообміну W для різних висот термоелектричних перетворювачів енергії h та різних перепадів температур теплоносіїв на вході у теплообмінні контури термоелектричного теплового насоса ΔT .

Висновки

1. Визначено вплив затрат енергії на прокачування теплоносія через систему теплообміну на опалювальний коефіцієнт μ термоелектричного теплового насоса для різних висот термоелектричних перетворювачів енергії (h від 0.1 до 1 мм) та різних перепадів температур теплоносіїв на вході у теплообмінні контури термоелектричного теплового насоса (ΔT від 0 до 10 К) (рис. 4).
2. Визначено, що опалювальний коефіцієнт термоелектричного теплового насоса слабо залежить від висоти термоелектричного перетворювача до висоти вітки термоперетворювача 0.5 мм і починає різко зменшуватися при його подальшій мініатюризації. Так, при зменшенні висоти вітки термоперетворювача у 2 рази (від 1 до 0.5 мм) – опалювальний коефіцієнт

зменшується лише на 5 %, проте наступне його зменшення (до висоти 0.25 мм) – веде до зменшення μ вже на ~22 %, а при висоті вітки 0.1 мм – μ зменшується на ~45 %. З другого боку, зменшення висоти вітки у два рази призводить до зменшення ваги теплового насосу на 25 %, об'єму – на 28 %, а також його вартості – на 35%.

3. Встановлено, що врахування у виразі для опалювального коефіцієнту термоелектричного теплового насоса витрат енергії на прокачування теплоносія призводить до того, що μ , досягнувши максимуму, починає поступово знижуватися внаслідок того, що витрати енергії на перекачування теплоносія починають досягати рівня витрат енергії на функціонування термоелектричних модулів.

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. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В. Експериментальне дослідження термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №3. – С. 47 – 53.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85059430319&partnerID=MN8TOARS>)
5. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про граничні можливості термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №4. – С. 49– 54.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85059419349&partnerID=MN8TOARS>)
6. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Prybyla A.V., Rifert V.G., Solomakha A.S. Improvement the system of distillation cascade for long-term space flights / 68-th International Astronautical Congress. – 25-29 September 2017. – Adelaide, Australia. (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85051361510&partnerID=MN8TOARS>).
7. Anatyshuk L.I., Rifert V.G., Solomakha A.S., Barabash P.A., Usenko V., Prybyla A.V., Neymark M., Petrenko V. Upgrade the centrifugal multiple-effect distiller for deep space missions / 70-th International Astronautical Congress. - 21-25 October 2019. - Washington DC, USA. (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85079143567&partnerID=MN8TOARS>).
8. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Прибила А.В. Вплив мініатюризації на ефективність термоелектричних модулів у режимі нагріву // Термоелектрика №3, С. 44-51. 2018 (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85072013470&partnerID=MN8TOARS>)
9. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Прибила А.В., Вплив контактів на ефективність термоелектричних модулів у режимі нагріву в умовах мініатюризації // Термоелектрика №4, С. 45-50. 2018.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85072046106&partnerID=MN8TOARS>)
10. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. – P. 214.

Надійшла до редакції 18.03.2020

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

Прибыла А.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна, *e-mail: anatyck@gmail.com*;

²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна

ВЛИЯНИЕ МИНИАТЮРИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе приводятся результаты расчетов влияния миниатюризации на предельные возможности термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость, в частности для его использования в качестве высокоэффективного отопителя для прибора очистки воды космического назначения. Библиография, 10, рис. 5.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, эффективность, дистиллятор.

Anatyck L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Prybyla A.V., *cand. Phys.-math. Sciences*^{1,2}

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, 58012, Ukraine

INFLUENCE OF MINIATURIZATION ON THE EFFICIENCY OF A SPACE-PURPOSE THERMOELECTRIC HEAT PUMP

The paper presents the results of calculating the influence of miniaturization on the boundary possibilities of a thermoelectric liquid-liquid heat pump, in particular for its use as a high-efficiency heater for a space-purpose water purification device. Bibliography, 10, Fig. 5.

Key words: thermoelectric heat pump, efficiency, distiller.

References

1. Rozver Yu.Yu. (2003). Thermoelectric air-conditioner for transport means. *J.Thermoelectricity*, 2, 52 -56.
2. Anatyck L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu. (2004). Study of the characteristics of thermoelectric cooler of liquid or gas flows. *J.Thermoelectricity*, 1, 73 – 80.
3. Anatyck L.I., Suzuki N., Rozver Yu.Yu. (2005). Thermoelectric air-conditioner for rooms.

- J. Thermoelectricity*, 3, 53 – 56.
4. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 3, 47 – 53.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85059430319&partnerID=MN8TOARS>)
 5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 4, 49– 54.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85059419349&partnerID=MN8TOARS>)
 6. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Prybyla A.V., Rifert V.G., Solomakha A.S. (2017). Improvement of the system of distillation cascade for long-term space flights. *68-th International Astronautical Congress* (Australia, Adelaide, September 25-29, 2017)
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85051361510&partnerID=MN8TOARS>).
 7. Anatyshuk L.I., Rifert V.G., Solomakha A.S., Barabash P.A., Usenko V., Prybyla A.V., Neymark M., Petrenko V. (2019). Upgrade the centrifugal multiple-effect distiller for deep space missions. *70-th International Astronautical Congress* (USA, Washington D.C., October 21-25).
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85079143567&partnerID=MN8TOARS>).
 8. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Prybyla A.V. (2018). Influence of miniaturization on the efficiency of thermoelectric modules in heating mode. *J. Thermoelectricity*, 3, 44-51.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85072013470&partnerID=MN8TOARS>)
 9. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Prybyla A.V. (2018). The influence of contacts on the efficiency of thermoelectric modules in heating mode under miniaturization conditions. *J. Thermoelectricity*, 4, 45-50.
(<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85072046106&partnerID=MN8TOARS>)
 10. Michael V. Lurie (2008). Modeling of oil product and gas pipeline transportation. Weinheim, WILEY-VCH Verlag Gmbh & Co. Kga.

Submitted 18.03.2020