

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Короп М.М., *аспірант*²
Кізюк Ю.В., *студент*²
Константинович І.А., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}

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

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

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИКИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНЕ ТЕПЛО (ЧАСТИНА 3)

Дана робота є третьою частиною із циклу досліджень термоелектричних джерел електрики, що використовують низькопотенційне тепло. Приведені результати комп'ютерного проектування термоелектричного генератора із тепловими трубами та рідинним теплообміном вимушеною конвекцією, що використовує теплові відходи промислових установок. Розроблена конструкція генератора та проведена серія його експериментальних досліджень на випробувальному стенді. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, рекуперація тепла, теплообмін.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Подальше покращення ефективності термоелектричних генераторів, що використовують низькопотенційне тепло, у великій мірі пов'язане із оптимізацією їх системи теплообміну [1–5]. Найбільш перспективним в даному контексті виглядає поєднання комбінованої рідинної та повітряної системи теплообміну із використанням теплових труб та термосифонів [6–9], що забезпечують перенесення великої кількості теплової енергії з мінімальними втратами. Також їх використання дозволяє спростити інтеграцію термоелектричного генератора із промисловими установками, що виділяють велику кількість відпрацьованої теплової енергії.

У даній роботі приводяться результати дослідження направлено на удосконалення конструкції термоелектричних джерел енергії для використання низькопотенційної теплової енергії промислових установок. Наводяться результати теоретичних та експериментальних досліджень термоелектричного рекуператора із повітряно-рідинною системою теплообміну та тепловими трубами для підведення до нього теплової енергії, а також їх порівняння із попередніми варіантами конструкції описаними в [1–2].

Фізична та математична моделі термоелектричного генератора

Фізична модель термоелектричного рекуператора тепла з відводом тепла рідинно-повітряним теплообмінником представлена на рис. 1. Дана модель є найбільш загальною і враховує всі можливості систем теплообміну у поєднанні із термоелектричним перетворенням енергії. Отже, пряме перетворення теплової енергії джерела викидного тепла в електричну енергію електричної потужності W здійснюється за допомогою термоелектричних генераторних модулів 4. Тепловий потік Q_2 від гарячого теплоносія 1 з температурою $T_{z.m.}$ та витратою G передається на оребрення 2 теплової труби 3, що здійснює перенесення тепла Q_2 до термоелектричного модуля 4. Відвід тепла від холодної сторони термоелектричного модуля здійснюється холодним теплообмінним контуром, що містить рідинний теплообмінник 5 та рідинно-повітряний теплообмінник 7. Рух рідини забезпечується рідинним насосом 6, що споживає електричну потужність W_1 , а рух повітря інтенсифікується вентилятором 8, що споживає електричну потужність W_2 . У даній моделі мають місце теплові втрати на елементах системи теплообміну та за рахунок наявності контактних теплових опорів.

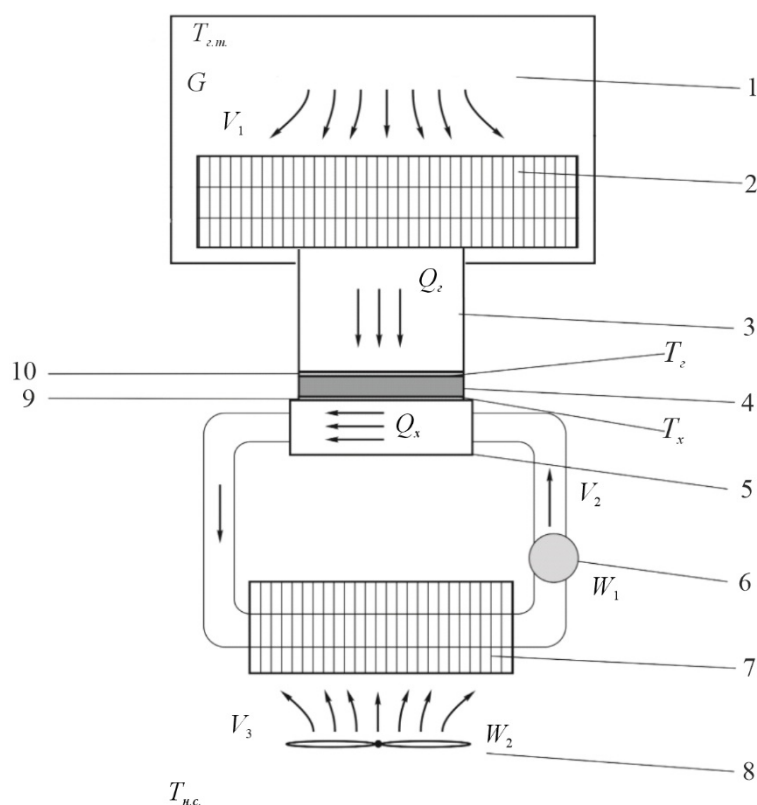


Рис.1. Фізична модель термоелектричного рекуператора тепла: 1 – об'єм, заповнений гарячим теплоносієм, 2 – оребрення теплової труби 3, 4 – термоелектричні модулі, 5 – рідинні теплообмінники, 6 – рідинний насос, 7 – рідинно-повітряні теплообмінники, 8 – повітряний вентилятор, 9, 10 – область теплового контакту між елементами конструкції рекуператора.

Розглянемо основні параметри термоелектричного генератора, фізичну модель якого зображено на рис. 1. До них відносять генеровану термоелектричними модулями електричну потужність W , а також їх коефіцієнт корисної дії η , що визначається відношенням отриманої електричної потужності W до затраченої джерелом тепла теплової потужності Q . Проте під час роботи термоелектричний генератор (ТЕГ) додатково споживає електричну енергію (живлення

повітряних вентиляторів, електричних насосів, тощо), крім того завжди мають місце теплові втрати на елементах його конструкції Q_6 , що пов'язані в основному із недосконалістю систем підведення та відведення тепла. Тому реальна корисна електрична потужність ТЕГ буде меншою $W_p = W - W_1 - W_2$, відповідно і реальний ККД буде визначатися величиною W_p і реальним тепловим потоком Q_p , що буде враховувати всі втрати на елементах конструкції ТЕГ $\eta_{ТЕГ} = W_p / Q_p$.

$$\eta_{ТЕГ} = \frac{W_k}{Q_3}, \quad (1)$$

де $\eta_{ТЕГ}$ – ККД ТЕГ, W_k – корисна електрична потужність, Q_3 – затрачена теплова потужність.

$$W_k = W_{ТЕБ} - W_{ел.вум.}, \quad (2)$$

де $W_{ТЕБ}$ – електрична потужність термоелектричної батареї, $W_{ел.вум.}$ – електрична потужність, що використовується на додаткове живлення ТЕГ (живлення електричних вентиляторів та електричних рідинних насосів).

$$W_{ТЕБ}(T_z, T_x) = Q_z \cdot \eta_{ТЕБ}(T_z, T_x), \quad (3)$$

$$Q_z = Q_x + W_{ТЕБ}(T_z, T_x). \quad (4)$$

У формулах Q_z – тепловий потік до термоелектричного модуля, Q_x – тепловий потік після термоелектричного модуля, T_z – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, T_x – температура холодної сторони термоелектричного модуля, $\eta_{ТЕБ}(T_z, T_x)$ – ККД термоелектричної батареї.

$$Q_3 = C \cdot m \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.}) = C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.}), \quad (5)$$

де C – теплоємність теплоносія, m – маса теплоносія, G – витрата теплоносія, ρ – густина теплоносія, $T_{z.m.}$ – температура газового теплоносія, $T_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища.

Тепловий потік та температури гарячої та холодної сторін термоелектричного модуля визначаються із рівнянь теплового балансу:

$$Q_2 = \alpha_1(v_1) \cdot S_1 \cdot (T_{z.m.} - T_1), \quad (6)$$

де $\alpha_1(v_1)$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що є функцією від швидкості руху гарячого теплоносія v_1 , S_1 – площа зовнішньої поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що контактує із гарячим теплоносієм, T_1 – температура поверхні теплової труби, що контактує із гарячим теплоносієм;

$$Q_2 = \chi_1 \cdot (T_1 - T_2), \quad (7)$$

де χ_1 – тепловий опір теплової труби, T_2 – температура холодної сторони теплової труби;

$$Q_2 = \chi_2 \cdot (T_3 - T_2), \quad (8)$$

де χ_2 – тепловий контактний опір між тепловою трубою і термоелектричними модулями;

$$Q_z = \chi_3 \cdot (T_z - T_x) + W_{TEB}(T_z, T_x), \quad (9)$$

де χ_3 – тепловий опір термоелектричних модулів;

$$Q_x = \chi_4 \cdot (T_x - T_4), \quad (10)$$

де χ_4 – тепловий контактний опір між термоелектричними модулями і рідинним теплообмінником, T_4 – температура поверхні рідинного теплообмінника, що дотикається до термоелектричних модулів;

$$Q_x = \chi_5 \cdot (T_4 - T_5), \quad (11)$$

де χ_5 – тепловий опір водяного теплообмінника, T_5 – температура поверхні холодного рідинного теплообмінника, що контактує з рідиною;

$$Q_x = \alpha_2(v_2) \cdot S_2 \cdot (T_5 - T_6), \quad (12)$$

де $\alpha_2(v_2)$ – коефіцієнт тепловіддачі рідинного теплообмінника, що є функцією від швидкості руху рідини v_2 , S_2 – площа поверхні рідинного теплообмінника, T_6 – середня температура рідини між входом і виходом в холодний рідинний теплообмінник;

$$Q_x = \alpha_3(v_2) \cdot S_3 \cdot (T_6 - T_7), \quad (13)$$

де $\alpha_3(v_2)$ – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що є функцією від швидкості руху рідини v_2 , S_3 – площа внутрішньої поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, T_7 – середня температура рідини між входом і виходом в холодний рідинно-повітряний теплообмінник;

$$Q_x = \chi_6 \cdot (T_7 - T_8), \quad (14)$$

де χ_6 – тепловий опір рідинно-повітряного теплообмінника, T_8 – температура поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що контактує з навколишнім середовищем;

$$Q_x = \alpha_4(v_3) \cdot S_4 \cdot (T_8 - T_{н.с.}), \quad (15)$$

де $\alpha_4(v_3)$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що є функцією від швидкості руху повітря v_3 , S_4 – площа поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що контактує з оточуючим середовищем.

Підставивши (2–5) в (1) отримуємо:

$$\eta_{TEG} = \frac{W_k}{Q_z} = \frac{W_{TEB} - W_{ел.вум.}}{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.})} = \frac{Q_z \cdot \eta_{TEB}(T_z, T_x) - W_{ел.вум.}}{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.})}. \quad (16)$$

Використавши в (16) рівняння теплового балансу отримуємо

$$\eta_{TEG} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.}) \cdot \eta_{TEB}(T_z, T_x)}{1 + \alpha_1 \cdot S_1 \cdot [N_1 + N_2 \cdot (1 - \eta_{TEB}(T_z, T_x))]} - \frac{W_{ел.вум.}}{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.})}, \quad (17)$$

де

$$N_1 = \frac{1}{\chi_1} + \frac{1}{\chi_2} + \frac{1}{\chi_3},$$

$$N_2 = \frac{1}{\chi_4} + \frac{1}{\chi_4} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot S_4} + \frac{1}{\alpha_5 \cdot S_5} + \frac{1}{\chi_6} + \frac{1}{\alpha_3 \cdot S_3} \quad (18)$$

Розробка конструкції термоелектричного генератора

В результаті проектування запропоновано конструкцію термоелектричного рекуператора з тепловою трубою (рис. 2). Вона складається із теплової труби, яка має оребрення з гарячого боку і площадку для розміщення 10 термоелектричних модулів на холодній стороні. Рух рідини у холодному теплообмінному контурі здійснюється за допомогою рідинних насосів, що живляться від електричної потужності генерованої термоелектричними модулями. Відведення тепла від термоелектричних модулів забезпечується рідинно-повітряною системою теплообміну.

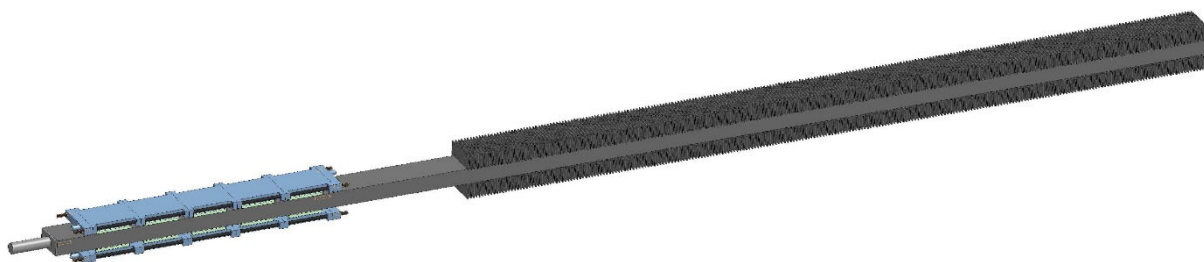


Рис.2. Схема термоелектричного рекуператора з рідинним відводом тепла

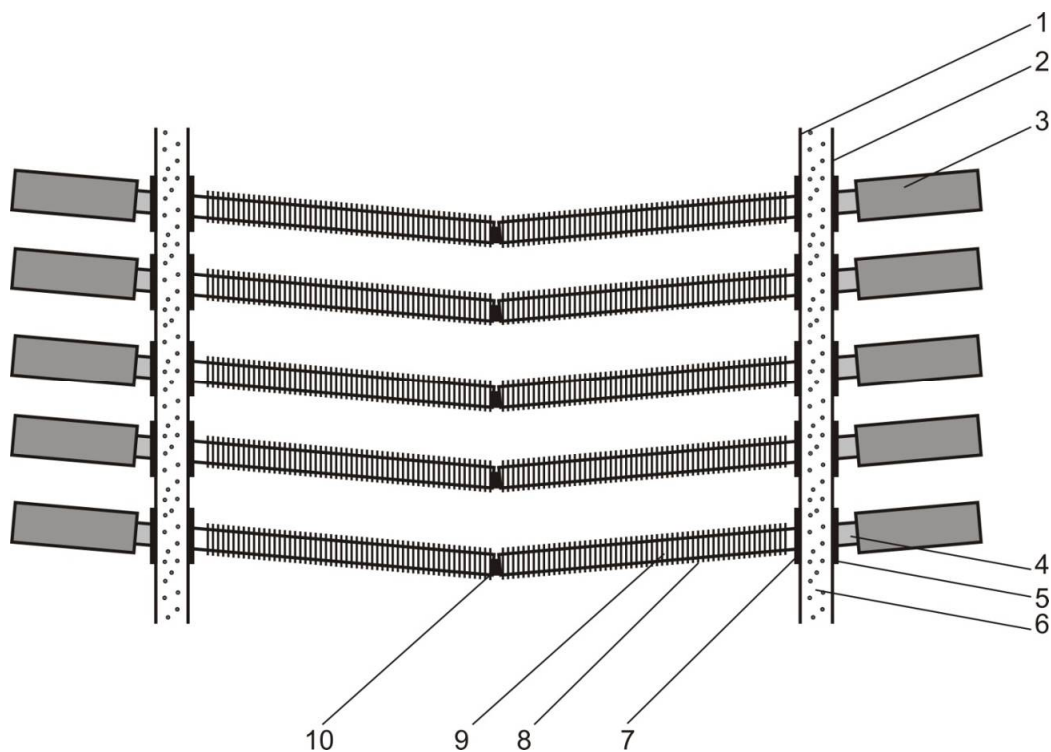


Рис. 3. Схема перерізу можливого розташування блоків термоелектричних генераторів всередині труби промислової установки

Оребрена частина теплової труби розміщується всередині викидної труби в якій рухаються викидні гази. Таке використання значно розширює можливості його практичного використання завдяки можливості перетворення не тільки тепла приповерхневих прошарків вихлопних газів промислових установок (рис. 3), а й фактично всього об'єму заповненого газами. Розрахунковий

ККД генератора становить $\text{ККД} = 3.8 \%$ та електрична потужність $W = 9.8$ Вт в розрахунку на один термоелектричний модуль. Отже, шляхом розміщення близько 100 блоків такого термоелектричного генератора у внутрішній порожнині труби викидних газів, можна отримати електричну потужність до 100 кВт (рис. 3).

На рис. 3 представлено схему перерізу короба викидних газів промислової установки з розміщеними у ньому блоками термоелектричного генератора: 1 – внутрішня стінка короба, 2 – зовнішня стінка, 3 – блок термоелектричного генератора, 4 – частина теплової труби, розміщена за межами короба (зона конденсації), 5, 7 – муфти, за допомогою яких відбувається кріплення блоку термоелектричного генератора на стінках коробу, 6 – теплова ізоляція, 8 – прямокутні пластини, розміщені на вертикальних поверхнях теплової труби, і формують теплосприймальний радіатор, 9 – частина теплової труби, розміщена в коробі з викидними газами, 10 – зажими, за допомогою яких кріпляться дві протилежно розміщені теплові труби.

Результати експериментальних випробувань

Для перевірки результатів проектування був виготовлений експериментальний зразок термоелектричного генератора з тепловою трубою та виконані його дослідження за допомогою вимірювально стелу, що максимально відтворює теплові умови промислової установки.

Отже, вимірювання дали наступні результати (рис. 4.): потужність генерована одним блоком рекуператора становить ~ 90 Вт.

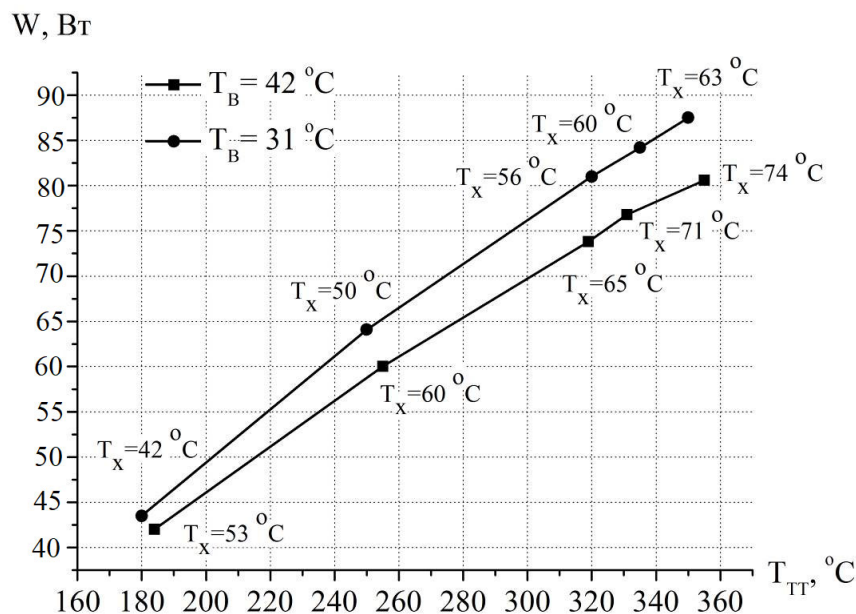


Рис.4. Результати вимірювань

Додатково досліджувалась однорідність розподілу температур в теплової трубі (рис. 5).

Таким чином вихідна потужність такого термоелектричного генератора складає $W = 91$ Вт (9.1 Вт в розрахунку на 1 термоелектричний модуль) за $\text{ККД} = 3.5 \%$. Слід зазначити, що коефіцієнт корисної дії зазначеної конструкції є в 1.3 рази вищий ніж для варіанту рекуператора з примусовим обдувом і в 2.3 рази вище варіанту із природньою конвекцією. Крім того питомі габарити такого генератора в розрахунку на 1 термоелектричний модуль значно переважають

аналоги із повітряним теплообміном, що забезпечує йому широкі можливості масштабування для досягнення необхідних значень вихідної електричної потужності.

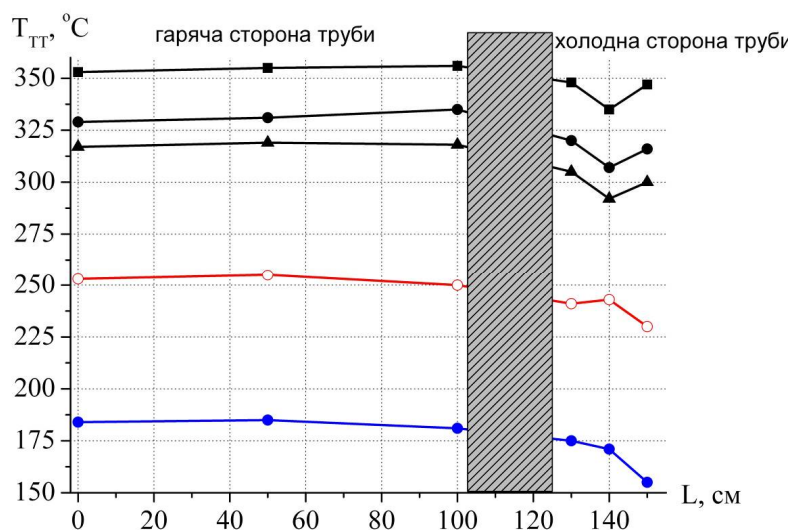


Рис.5. Розподіл неоднорідності розподілу температур вздовж теплової труби

Слід зауважити, що незважаючи на значну перевагу у енергетичних і масо-габаритних характеристиках зазначеної конструкції, інші розглянуті варіанти також можуть знайти своє використання за рахунок простоти конструкції, відсутності рідинних теплоносіїв і взагалі потреби додаткового забезпечення додаткового живлення системи теплообміну.

Висновки

1. Проведено проектування та розроблена конструкція термоелектричного генератора з рідинно-повітряним теплообміном та тепловою трубою, що використовує низькопотенційні теплові відходи промислових установок.
2. Встановлено, що проектний ККД такого генератора складає 3.8 %, що забезпечує генерацію електричної енергії на рівні 9.8 Вт з одного термоелектричного модуля.
3. Проведено експериментальні дослідження, що підтвердили основні результати проектування.
4. Визначено, що експериментальні значення енергетичних характеристик термоелектричного генератора становлять – ККД = 3.5 % та потужність $W = 9.1$ Вт.
5. Проаналізовано, що коефіцієнт корисної дії зазначеної конструкції є в 1.3 рази вищий ніж для варіанту рекуператора з примусовим обдувом і в 2.3 рази вище варіанту із природньою конвекцією.

Література

1. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.
2. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 2). *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–43.
3. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 44–52.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat

- recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. and Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
 6. Zhao Y., Fan Y., Li W., Li Y., Ge M., Xie L. (2022). Experimental investigation of heat pipe thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 252, 115123. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421012991>
 7. Muratçobanoğlu B., Akyürek E. F., Manay E. (2025). Experimental evaluation and optimization of the heat pipes integrated thermoelectric generator using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 258, Part A., 124599.
 8. Islamoğlu Y., Taymaz İ., Parmaksızoğlu C., Özsoy M., Aslan E. (2020). Design of heat pipe assisted thermoelectric generator and experimental investigation of the power performance. *Sakarya University Journal of Science*, 24(5), 872–881.
 9. Raut R.S., Rathod S.V. (2017). Use of heat pipes and thermoelectric generator system for waste heat recovery and power generation. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5(6), 539–542.

Надійшла до редакції: 16.10.2024.

L.I. Anatyshuk, *Acad. NAS Ukraine*^{1,2}
A.V. Prybyla, *Cand. Sc (Phys.-Math.)*^{1,2}
M.M. Korop, *postgraduate*²
Yu.V. Kiziuk, *student*²
I.A. Konstantynovych, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}

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

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

THERMOELECTRIC POWER SOURCES USING LOW-GRADE HEAT (PART 3)

This work is the third part of the cycle of research on thermoelectric power sources using low-grade heat. The results of computer-aided design of a thermoelectric generator with heat pipes and forced convection liquid heat exchange that uses thermal waste from industrial installations are presented. The generator design has been developed and a series of its experimental studies have been conducted on a test bench. Bibl. 9, Fig. 5.

Key words: thermoelectric generator, computer-aided design, heat recovery, heat exchange

References

1. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.
2. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024).

- Thermoelectric power sources using low-grade heat (Part 2). *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–43.
3. Lysko V.V., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Derevianko T.V. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 44–52.
 4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
 5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. and Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
 6. Zhao Y., Fan Y., Li W., Li Y., Ge M., Xie L. (2022). Experimental investigation of heat pipe thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 252, 115123. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890421012991>
 7. Muratçobanoğlu B., Akyürek E. F., Manay E. (2025). Experimental evaluation and optimization of the heat pipes integrated thermoelectric generator using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 258, Part A., 124599.
 8. Islamoğlu Y., Taymaz İ., Parmaksızoğlu C., Özsoy M., Aslan E. (2020). Design of heat pipe assisted thermoelectric generator and experimental investigation of the power performance. *Sakarya University Journal of Science*, 24(5), 872–881.
 9. Raut R.S., Rathod S.V. (2017). Use of heat pipes and thermoelectric generator system for waste heat recovery and power generation. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5(6), 539–542.

Submitted: 16.10.2024.