

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

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

²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58000, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИКИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНЕ ТЕПЛО (ЧАСТИНА 2)

Дана робота є другою частиною із циклу досліджень термоелектричних джерел електрики, що використовують низькопотенційне тепло. Приведені результати комп'ютерного проектування термоелектричного генератора із 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, рекуперация тепла, теплообмін.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Широке застосування термоелектричної апаратури, зокрема в рекуператорах тепла, значною мірою визначається ефективністю термоелектричних перетворювачів енергії. Традиційно підвищення їх продуктивності досягається через дослідження та вдосконалення термоелектричних матеріалів [1–2]. Однак за останні десятиліття прогрес у цій сфері залишається незначним.

При цьому ефективність термоелектричних пристроїв залежить не лише від властивостей матеріалів, а й від оптимального їх використання в конструкціях приладів. Аналіз наукових джерел свідчить [3–6], що фактичні показники коефіцієнта корисної дії, а також холодильного та опалювального коефіцієнтів суттєво нижчі за прогнозовані, навіть за високої добротності матеріалів. Основною причиною цього є значні енергетичні втрати, спричинені недосконалістю теплообмінних систем, які забезпечують відведення та підведення тепла до термоелектричних перетворювачів. Втрати можуть досягати 20–50 %, а їх компенсація вимагала б суттєвого покращення характеристик термоелектричних матеріалів, що наразі є малореалістичним.

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 теплообміном примусовою конвекцією, а також їх порівняння із варіантом конструкції описаного в [7].

Фізична модель термоелектричного генератора із примусовою конвекцією

Особливістю даного варіанту конструкції є наявність вентиляторів, що здійснюють примусовий обдув радіаторів для забезпечення найбільшої ефективності теплообміну, при цьому витрачаючи на це електричну енергію.

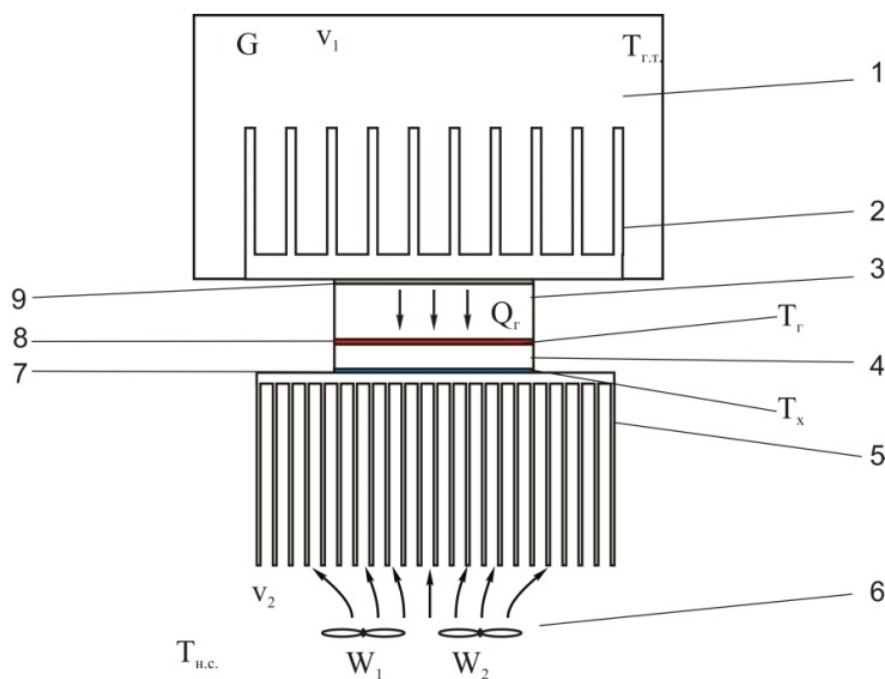


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генератора з відводом тепла повітряним теплообмінником: 1 – джерело теплової енергії (промислова установка), що виділяє на її поверхню тепло із нагрітими газами, 2 – повітряний теплообмінник, 3 – теплоперехід між повітряним теплообмінником і термоелектричними модулями, 4 – термоелектричні генераторні модулі, 5 – холодний повітряний теплообмінник, 6 – електричні вентилятори, 7-9 – тепловий контакт між елементами конструкції термоелектричного генератора

Розрахунок ККД термоелектричного генератора

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 джерелам 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 $Q_в$, 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 $\eta_{ТЕГ} = W_p / Q_p$.

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

де η_{TEG} – ККД ТЕГ, W_k – корисна електрична потужність, Q_3 – затрачена теплова потужність.

$$W_k = W_{TEB} - W_{ел.вип.}, \quad (2)$$

де W_{TEB} – електрична потужність термоелектричної батареї, $W_{ел.вип.}$ – електрична потужність, що використовується на додаткове живлення ТЕГ (живлення електричних вентиляторів).

$$W_{TEB}(T_2, T_x) = Q_2 \cdot \eta_{TEB}(T_2, T_x), \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_x + W_{TEB}(T_2, T_x). \quad (4)$$

У формулах Q_2 – тепловий потік до термоелектричного модуля, Q_x – тепловий потік після термоелектричного модуля, T_2 – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, T_x – температура холодної сторони термоелектричного модуля, $\eta_{TEB}(T_2, T_x)$ – ККД термоелектричної батареї.

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

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

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

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

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

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

де χ_1 – тепловий опір гарячого повітряного теплообмінника, T_2 – температура внутрішньої поверхні повітряного теплообмінника;

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

де χ_k – тепловий контактний опір між гарячим теплообмінником і металевим теплопровідним елементом, T_3 – температура поверхні металевого теплопровідного елемента, що дотикається до гарячого теплообмінника;

$$Q_2 = \chi_2 \cdot (T_3 - T_4), \quad (9)$$

де χ_2 – тепловий опір металевого теплопровідного елемента, T_4 – температура поверхні

металевого теплопровідного елемента, що дотикається до термоелектричних модулів;

$$Q_2 = \chi_k \cdot (T_4 - T_2), \quad (10)$$

де χ_k – тепловий контактний опір між металевим теплопровідним елементом і термоелектричними модулями;

$$Q_2 = \chi_m \cdot (T_2 - T_x) + W_{TEB}(T_2, T_x), \quad (11)$$

де χ_m – тепловий опір термоелектричних модулів;

$$Q_x = \chi_k \cdot (T_x - T_5), \quad (12)$$

де χ_k – тепловий контактний опір між термоелектричними модулями і повітряним теплообмінником, T_5 – температура поверхні повітряного теплообмінника, що дотикається до термоелектричних модулів;

$$Q_x = \chi_3 \cdot (T_5 - T_6), \quad (13)$$

де χ_3 – тепловий опір повітряного теплообмінника, T_6 – температура поверхні рідинно-повітряного теплообмінника, що контактує з навколишнім середовищем;

$$Q_x = \alpha_2(v_2) \cdot S_2 \cdot (T_5 - T_{н.с.}), \quad (14)$$

де $\alpha_2(v_2)$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні повітряного теплообмінника, що є функцією від швидкості руху повітря v_2 , S_2 – площа поверхні повітряного теплообмінника, що контактує з оточуючим середовищем.

Підставивши (2–5) в (1) отримуємо:

$$\eta_{TEG} = \frac{W_k}{Q_3} = \frac{W_{TEB} - W_{ел.вип.}}{G \cdot \lambda} = \frac{Q_2 \cdot \eta_{TEB}(T_2, T_x) - W_{ел.вип.}}{G \cdot \lambda}. \quad (15)$$

$$\eta_{TEG} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 \cdot (T_{2.м.} - T_{н.с.}) \cdot \eta_{TEB}(T_2, T_x)}{1 + \alpha_1 \cdot S_1 \cdot [N_1 + N_2 \cdot (1 - \eta_{TEB}(T_2, T_x))]} - W_{ел.вип.}, \quad (16)$$

де

$$N_1 = \frac{1}{\chi_1} + \frac{1}{\chi_2} + \frac{1}{\chi_3} + \frac{1}{\chi_k} + \frac{1}{\chi_m}, \quad (17)$$

$$N_2 = \frac{1}{\chi_4} + \frac{1}{\chi_k} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot S_2} + \frac{1}{\alpha_3 \cdot S_3} + \frac{1}{\chi_5} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot S_4}. \quad (18)$$

Вибір оптимальної системи теплообміну

Вихідна електрична потужність ТЕГ і його ефективність залежать від температурних та теплових умов на термоелектричних модулях, що забезпечуються системою підводу та відводу тепла. В свою чергу, для підвищення ефективності системи теплообміну використовується примусовий обдув електричними вентиляторами.

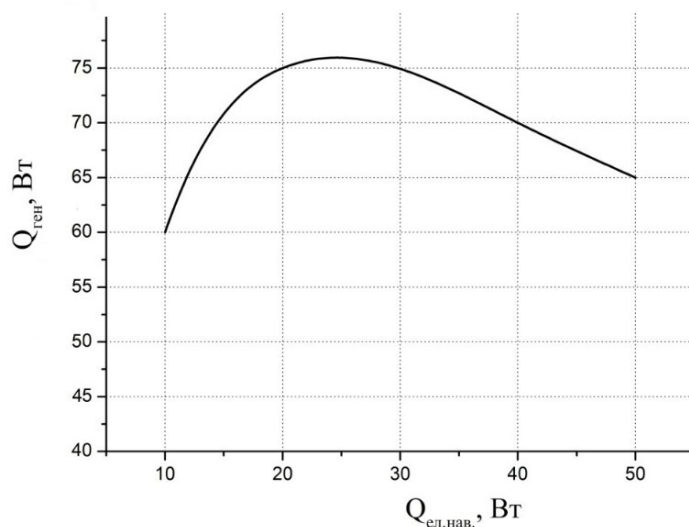


Рис. 2. Залежність вихідної електричної потужності ТЕГ від потужності, що споживається системою теплообміну

На рис. 2 приведено залежність вихідної електричної потужності ТЕГ від потужності, що споживається системою теплообміну (в розрахунку на 8 стандартних термоелектричних модулів). Як видно із рисунку, виявлено оптимальну електричну потужність систему теплообміну $Q_{\text{ел.нав.}} = 25 \text{ Вт}$, яка забезпечує найбільшу ефективність ТЕГ.

Розробка конструкції термоелектричного генератора з примусовим обдувом

На рисунках 3 – 4. Зображено результати проектування у вигляді двох варіантів ТЕГ з примусовою конвекцією з проектною потужністю 80 і 40 Вт відповідно.

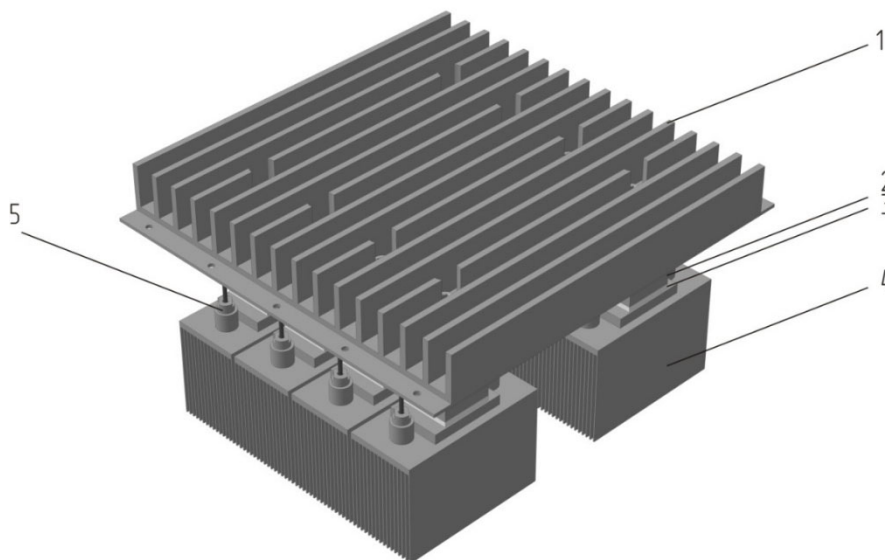


Рис. 3. Конструкція 80-ватного блоку термоелектричного рекуператора з примусовою конвекцією: 1 – гарячий теплообмінник, 2 – теплопровідний металевий елемент, 3 – термоелектричні модулі, 4 – холодний теплообмінник, 5 – елемент кріплення термоелектричних модулів

Зображений на рис. 3 блок ТЕГ містить один гарячий теплообмінник, розміщений на гарячій і індивідуальний холодний повітряний теплообмінник. Обдув повітрям здійснюється електричними вентиляторами шляхом спеціально створеного зовнішньої кришкою ТЕГ повітряного колектора. Живлення повітряних радіаторів здійснюється від електричної потужності, що генерують термоелектричні модулі.

Недоліком зазначеної конструкції виявилася її громіздкість і складність у масштабуванні.

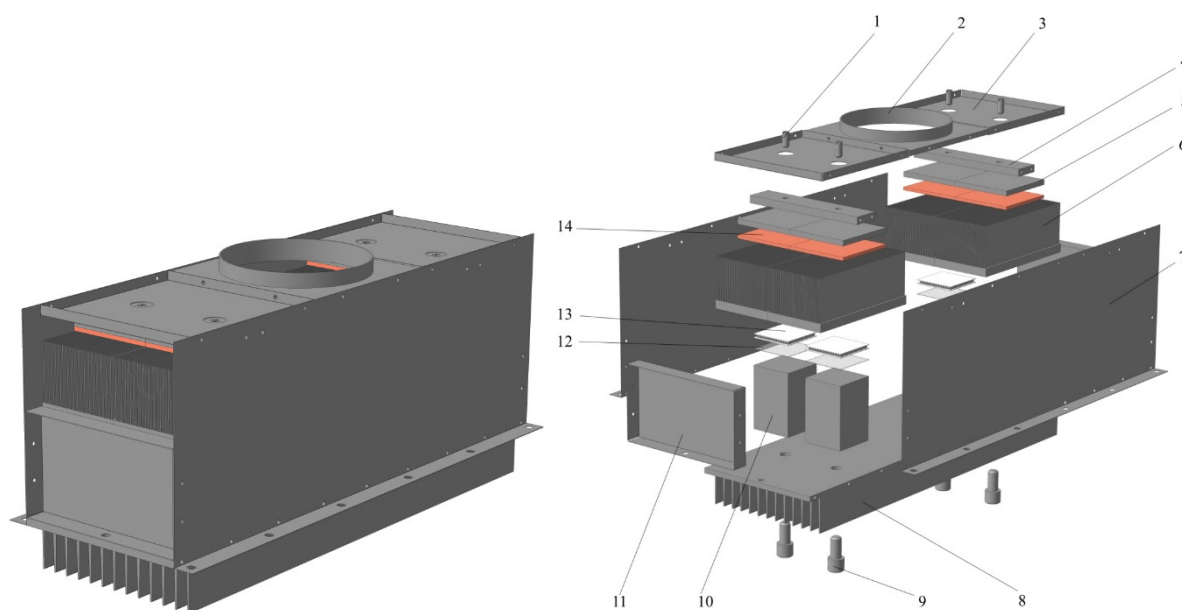


Рис. 4. Конструкція 40 ватного блоку термоелектричного рекуператора з вимушеною конвекцією: 1 – прижимний гвинт, 2 – кріплення вентилятора, 3 – верхня кришка, 4, 5, 14 – прижимні пластини, 6 – холодний теплообмінник, 7 – бокова кришка, 8 – гарячий теплообмінник, 9 – гвинти кріплення гарячого теплообмінника, 10 – теплоперехід, 11 – торцева кришка, 12 – пластинка з слюди, 13 – термоелектричний модуль

Тому для усунення цих недоліків була розроблена блочна конструкція термоелектричного рекуператора тепла. Вона складається з 4 термоелектричних модулів Алтек-1061 з індивідуальною системою відводу тепла.

Розрахункові значення ККД і генерованої ним електричної потужності складають – ККД = 2.9 % та потужність $W = 30$ Вт.

Результати експериментальних випробувань

Для визначення характеристик блоку рекуператора тепла зображеного на рис.4 проведені його стендові випробування. На рис. 5 представлена залежність електричної потужності блоку термоелектричного генератора, що містить 4 термоелектричні модулі від температури гарячої сторони термоелектричних модулів.

Таким чином вихідна потужність такого термоелектричного генератора складає $W = 28$ Вт за ККД = 2.7 %. Слід зазначити, що коефіцієнт корисної дії зазначеної конструкції є в 1.8 разів вищий ніж для варіанту без примусового обдув повітряними вентиляторами. Крім того питомі габарити такого генератора в розрахунку на 1 термоелектричний модуль є також кращими майже у 5 разів.

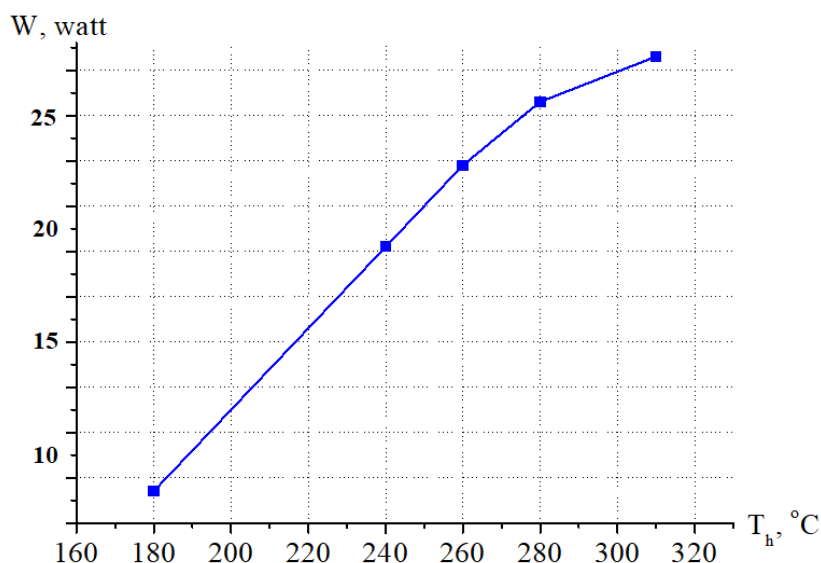


Рис. 5. Залежність електричної потужності блоку термоелектричного рекуператора тепла від гарячої температури термоелектричних модулів

Темою наступних досліджень, викладених у 3 частині даної роботи, буде проектування, експериментальні дослідження та порівняльний аналіз модернізованої конструкції термоелектричного генератора із рідинним теплообміном і тепловими трубами.

Висновки

1. Проведено проектування та розроблена конструкція термоелектричного генератора з теплообміном вимушеною конвекцією, що використовує низькопотенційні теплові відходи промислових установок.
2. Встановлені оптимальні параметри живлення системи теплообміну для забезпечення найвищої ефективності, що становить $Q_{\text{ел.нав.}} = 25$ Вт в розрахунку забезпечення системи теплообміну 8 термоелектричних модулів.
3. Встановлено, що проектний ККД такого генератора складає 2.9 %, що забезпечує генерацію електричної енергії на рівні 7.5 Вт з одного термоелектричного модуля.
4. Проведено експериментальні дослідження, що підтвердили основні результати проектування.
5. Визначено, що експериментальні значення енергетичних характеристик термоелектричного генератора становлять – ККД = 2.7 % та потужність $W = 7$ Вт.
6. Проаналізовано, що розглянута конструкція термоелектричного генератора із теплообміном вимушеною конвекцією має коефіцієнт корисної дії зазначеної конструкції в 1.8 разів вищий ніж для варіанту без примусового обдуву повітряними вентиляторами. Крім того питомі габарити такого генератора в розрахунку на 1 термоелектричний модуль є також кращими майже у 5 разів.

Література

1. Mukherjee M., Srivastava A., & Singh A.K. (2022). Recent advances in designing thermoelectric materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(35), 12524–12555. <https://doi.org/10.1039/D2TC02448A>
2. Brown S.R., Kauzlarich S.M., Gascoin F., & Snyder G.J. (2006). $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$: New high efficiency thermoelectric material for power generation. *Chemistry of Materials*, 18(7), 1873–1877.

<https://doi.org/10.1021/cm060261t>

3. Anatyshuk L.I., & Prybyla A.V. (2012). On the influence of heat exchange on the efficiency of thermoelectric devices. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 39–45.
4. Anatyshuk L.I., & Prybyla A.V. (2012). On the influence of heat exchange on the efficiency of thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 83–88.
5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., & Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
7. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., Kadelnyk K.O., (2024). Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
8. Candolfi C., El Oualid S., Lenoir B., & Caillat T. (2023). Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. *Journal of Applied Physics*, 134(10), 100901. <https://doi.org/10.1063/5.0166338>
9. 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.

Надійшла до редакції: 10.05.2024.

L.I. Anatyshuk, *Acad. NAS Ukraine*^{1,2}

A.V. Prybyla, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*^{1,2}

M.M. Korop²,

Yu.I. Kiziuk²,

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 Kotsiubynsky str, Chernivtsi, 58000, Ukraine

THERMOELECTRIC POWER SOURCES USING LOW-GRADE HEAT (PART 2)

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

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

References

1. Mukherjee M., Srivastava A., & Singh A.K. (2022). Recent advances in designing thermoelectric materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(35), 12524–12555. <https://doi.org/10.1039/D2TC02448A>

2. Brown S.R., Kauzlarich S.M., Gascoin F., & Snyder G.J. (2006). $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$: New high efficiency thermoelectric material for power generation. *Chemistry of Materials*, 18(7), 1873–1877. <https://doi.org/10.1021/cm060261t>
3. Anatyshuk L.I., & Prybyla A.V. (2012). On the influence of heat exchange on the efficiency of thermoelectric devices. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 39–45.
4. Anatyshuk L.I., & Prybyla A.V. (2012). On the influence of heat exchange on the efficiency of thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 3–88.
5. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., & Rozver Y.Y. (2012). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conference Proceedings*, 1449, 516–519.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3-4), 43–67.
7. Konstantynovych I.A., Ivanochko M.M., Kadelnyk K.O. (2024) Design of a portable universal thermoelectric generator. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 78–89.
8. Candolfi C., El Oualid S., Lenoir B., & Caillat T. (2023). Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. *Journal of Applied Physics*, 134(10), 100901. <https://doi.org/10.1063/5.0166338>
9. 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.

Submitted: 10. 05.2024.