

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

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

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

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИКИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНЕ ТЕПЛО (ЧАСТИНА 1)

Дана робота є першою частиною із циклу досліджень термоелектричних джерел електрики, що використовують низькопотенційне тепло. Приведені результати комп'ютерного проектування термоелектричного генератора із теплообміном природньою конвекцією, що використовує теплові відходи промислових установок. Розроблена конструкція генератора та проведена серія його експериментальних досліджень на випробувальному стенді.

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

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Сучасна промисловість широко використовує технологічне обладнання та теплові машини, такі як турбіни та двигуни внутрішнього згорання, які в процесі своєї роботи генерують значну кількість відпрацьованого тепла [1, 2]. Це тепло зазвичай не використовується повторно, а розсіюється в навколишнє середовище, спричиняючи його "термальне забруднення". Такий процес негативно впливає на екологію, сприяючи глобальному потеплінню та зміні кліматичних умов.

Рекуперация та ефективне використання відпрацьованої теплової енергії, потужність якої оцінюється в 10^{10} Вт, дозволяє значно знизити теплове навантаження на навколишнє середовище, підвищити енергоефективність промислових процесів і збільшити надійність роботи обладнання. Одним із поширених підходів до утилізації тепла є використання парового циклу, який ефективний при високих температурах відпрацьованих газів (близько 500 °С і вище). Проте в багатьох випадках теплові втрати є низькопотенційними, тобто мають температурний діапазон 50–500 °С, що робить паровий цикл неефективним [3].

У таких умовах перспективним рішенням є використання термоелектричних перетворювачів енергії, які забезпечують безпосереднє перетворення теплової енергії в

електричну. Згідно з попередніми оцінками, застосування термоелектричних генераторів у промисловості може забезпечити до 10 % економії паливних ресурсів [3–7].

У даній роботі приводяться результати проектування і експериментальних досліджень термоелектричних джерел енергії з різними типами систем теплообміну для використання низькопотенційної теплової енергії промислових установок. Наводяться приклади використання термоелектричних генераторів із вільною та примусовою конвекцією, а також із тепловими трубами. Кожна із зазначених конструкцій має певні переваги та недоліки, що будуть розглянуті далі.

Фізична модель термоелектричного генератора із вільною конвекцією

Найбільш конструктивно простим є термоелектричний генератор із теплообміном вільною конвекцією.

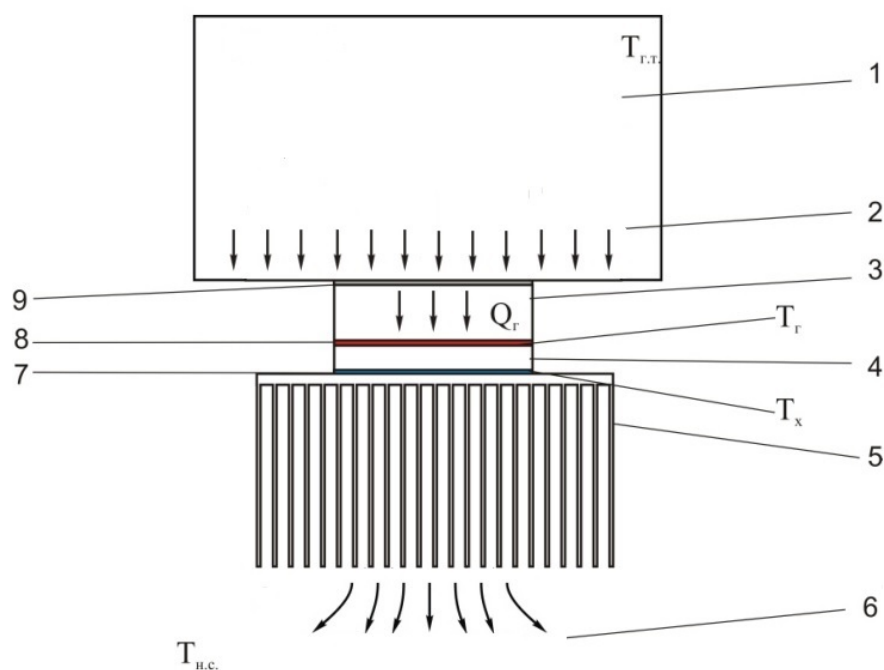


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генератора з відводом тепла повітряним теплообмінником: 1 – джерело теплової енергії (промислова установка), що виділяє на її поверхню тепло із нагрітими газами 2, 3 – тепловихід між поверхнею джерела тепла і термоелектричними модулями, 4 – термоелектричні генераторні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

В такому випадку рекуператор не потребує ніяких додаткових джерел живлення на функціонування системи теплообміну.

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Таким чином, для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до фізичної моделі (рис. 1) використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла з потужністю Q_1 .

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1 [T_1 - T_G], \quad (1)$$

$$Q_2 = \chi_2 [T_X - T_2], \quad (2)$$

де χ_1, χ_2 – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників; T_G, T_X – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно; T_2 – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність Q_2 відводиться від холодного теплообмінника шляхом вільної конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha (T_2 - T_0) S_m, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем; S_m – площа поверхні теплообміну; T_0 – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна Q_1 та його ККД η :

$$W = Q_1 [T_1] \cdot \eta, \quad (4)$$

Основні втрати тепла Q_3 відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4 (T_M - T_0), \quad (5)$$

де χ_4 – тепловий опір ізоляції, T_M – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (6)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (7)$$

й електричного заряду

$$\text{div} \vec{j} = 0, \quad (8)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U \vec{j}, \quad (9)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (11)$$

Тут \vec{E} – щільність потоку енергії, \vec{q} – щільність теплового потоку, \vec{j} – щільність електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α, σ, κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10)–(12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (12)$$

Тоді закони збереження (7), (8) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla[(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (13)$$

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (14)$$

З розв'язку рівняння (13)–(14) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

Результати проектування

Аналіз результатів проектування дозволяє відзначити, що теплову потужність для роботи зазначено варіанту конструкції термоелектричного генератора можна буде зняти тільки з приповерхневих шарів газу, що контактує з внутрішніми боковими стінками блоку промислової установки (1 на рис. 2). Розрахунок показав, що величина теплового потоку, яку можна отримати на базовому модулі при гарячій робочій температурі 300 °С рівна 0.85 Вт/см², а при 250 °С – 1.18 Вт/см². Таким чином вся теплова потужність, що може бути знята з такого блоку, який містить 4 стінки розміром до прикладу 2000 x 2000 мм² буде рівна 136 кВт. – при температурі 300 °С і 189 кВт – при температурі 250 °С. При ККД ТЕГ 5 % це дає максимальну потужність ТЕГ 6.8 кВт – при 300 °С и 7.5 кВт – при 250 °С.

Це максимальна теоретична межа для випадку, коли тепло знімається тільки з бічних поверхонь короба. Це природно, оскільки при використанні такої схеми з бічних стінок несеться тільки частина теплової енергії газу з приповерхневих шарів. Внутрішні шари газу при таких умовах свою теплову енергію віддають незначно.

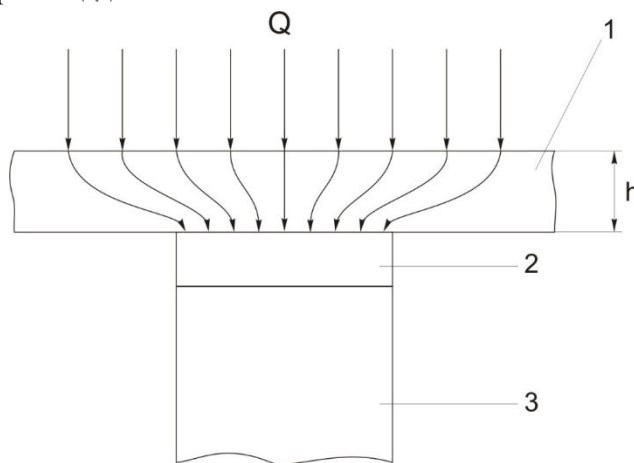


Рис. 2. 1 – внутрішня стінка блоку промислової установки;
2 – термоелектричний модуль; 3 – тепловідвід до повітряного радіатора.

Стандартний модуль з розміром гарячої контактує площі 40 x 40 мм² споживає близько 120–150 Вт теплового потоку. Реально при контакті модуля з гарячою стінкою блоку промислової установки величина теплового потоку буде близько 13–15 Вт для температури 300 °С і 8–20 Вт для температури 250 °С, що орієнтовно майже в 10 разів менше в порівнянні з необхідними значеннями теплових потоків 120–150 Вт. Таким чином ідея гарячого приєднання притиском модуля до гарячої стінки не може бути реалізована. Необхідна величина теплового потоку може бути досягнута шляхом застосування концентраторів тепла, наприклад у вигляді потовщених внутрішніх стінок. На рис. 2. показано рух теплового потоку до модуля через такі стінки. Товщина стінки 1 мм, яка відповідає конструкції блоку, недостатня. Спеціальними

розрахунками було встановлено, що для сталевих листів та ефективного переносу тепла до модуля, товщина стінки повинна бути не менше 3–4 мм.

Більш простим на погляд є застосування для знімання тепла від гарячого газу невеликих радіаторів для кожного модуля. Для визначення конфігурації такого радіатора було проведено моделювання та визначено, що його конструкція повинна мати вигляд, наведений на рисунку 3 (1 на рис. 3). Аналогічним чином розраховано конструкцію холодного радіатора з природним відводом тепла (3 на рис.3). Він складається з 15 пластин $200 \times 200 \times 1 \text{ мм}^3$, що забезпечують необхідний відвід тепла без застосування додаткової енергії на обдув. Проектний ККД такого генератора складає 1.9 %, що забезпечує генерацію електричної енергії на рівні 5 Вт з одного термоелектричного модуля.

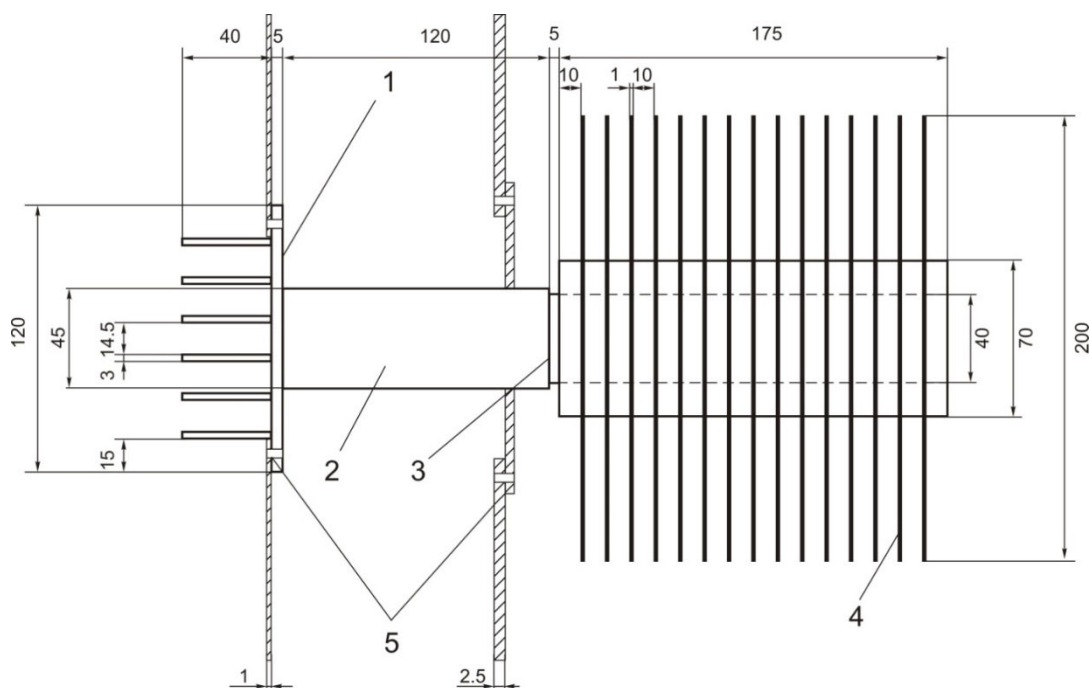


Рис. 3. Схема блоку ТЕГ. 1 – гарячий теплообмінник, 2 – теплоперехід, 3 – термоелектричний модуль, 4 – холодний теплообмінник, 5 – кріплення генератора.

Результати експериментальних випробувань

На основі теоретично розрахованої конструкції термоелектричного генератора був виготовлений її експериментальний зразок зображений на рис. 4. Його випробування було виконано на стенді, що якнайкраще імітував теплові режими роботи промислової установки, що були закладені при проектуванні.

Отже, в результаті вимірювань було визначено ККД та електричну потужність генератора, що становлять – ККД = 1.5 % та потужність $W = 3.9 \text{ Вт}$.

Слід зазначити, що розглянута конструкція термоелектричного генератора із теплообміном природньою конвекцією є найменш ефективною, проте найбільш простою та надійною у використанні.

Темою наступних досліджень, викладених у 2 частині даної роботи, буде проектування, експериментальні дослідження та порівняльний аналіз модернізованої конструкції термоелектричного генератора із примусовою конвекцією.

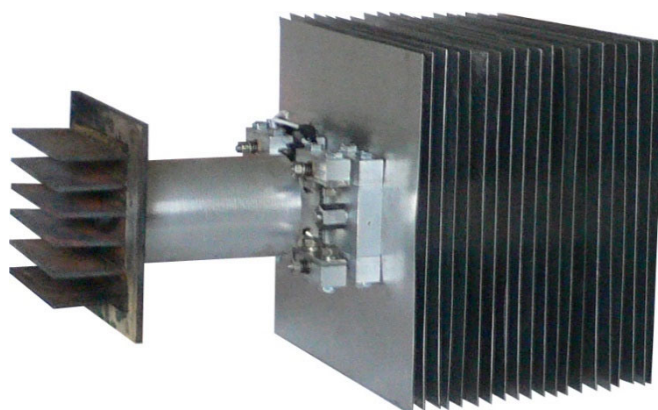


Рис. 4. Зовнішній вигляд блоку термоелектричного генератора «Алтек8043».

Висновки

1. Проведено проектування та розроблена конструкція термоелектричного генератора з теплообміном природньою конвекцією, що використовує низькопотенційні теплові відходи промислових установок.
2. Встановлено, що проектний ККД такого генератора складає 1.9 %, що забезпечує генерацію електричної енергії на рівні 5 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 = 1.5 % та потужність $W = 3.9$ Вт.
5. Проаналізовано, що розглянута конструкція термоелектричного генератора із теплообміном природньою конвекцією є найменш ефективною, проте найбільш простою та надійною у використанні.

Література

1. European Commission. Energy 2020: Roadmap 2050. – http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.html.
2. European Commission. Energy strategies: Roadmap 2050. – http://ec.europa.eu/energy/strategies/2011/roadmap_2050_en.html.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *J. Thermoelectricity*, 3-4.
4. Anatyshuk L.I. (2001). Rational areas of research and applications of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 3–14.
5. Anatyshuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7–20.
6. Anatyshuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., and Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 36–42.
7. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of *Bi-Te* based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *J. Thermoelectricity*, 4, 73–79.
8. 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.
9. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2016). Thermoelectric generator for trucks *Journal of Thermoelectricity*, 3, 40–45.

Надійшла до редакції: 21.03.2024.

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

This work is the first part of a series of studies on thermoelectric power sources using low-grade heat. The results of computer design of a thermoelectric generator with heat exchange by natural convection using waste heat from industrial installations are presented. The generator design was developed and a series of its experimental studies were carried out on a test bench.

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

References

1. European Commission. Energy 2020: Roadmap 2050. – http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.html.
2. European Commission. Energy strategies: Roadmap 2050. – http://ec.europa.eu/energy/strategies/2011/roadmap_2050_en.html.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *J. Thermoelectricity*, 3-4.
4. Anatyshuk L.I. (2001). Rational areas of research and applications of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 3–14.
5. Anatyshuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7–20.
6. Anatyshuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., and Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 36–42.
7. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of *Bi-Te* based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *J. Thermoelectricity*, 4, 73–79.
8. 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.
9. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2016). Thermoelectric generator for trucks *Journal of Thermoelectricity*, 3, 40–45.

Submitted: 21.03.2024.