

Сучасні термоелектричні теплові насоси: принципи роботи та перспективи застосування

Черкез Р. Г., Порубаний О. .

Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,

[*r.cherkez@chnu.edu.ua*](mailto:r.cherkez@chnu.edu.ua)

[*porubanyi.oleksandr@chnu.edu.ua*](mailto:porubanyi.oleksandr@chnu.edu.ua)

Сучасні енергетичні виклики, пов'язані з дедалі більш суворими вимогами до енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду, змушують науковий світ звертатися до альтернативних технологій перетворення та управління тепловою енергією. Серед них особливу увагу привертають термоелектричні теплові насоси (ТЕТН), які базуються на фундаментальних термоелектричних ефектах – Пельтьє та Зеебека. Термоелектричні теплові насоси (ТЕТН) – це пристрої, які перетворюють електричну енергію на теплову (і навпаки) за допомогою ефектів Пельтьє та Зеебека. Вони не мають рухомих частин, працюють безшумно і екологічно, що робить їх перспективними для енергоефективних систем охолодження, опалення та рекуперації тепла [1],[2]. Останні дослідження, такі як робота [2], [3] доводять, що гетерогенні термоелементи з регульованою проникністю можуть підвищити ефективність теплових насосів на 12–18% завдяки оптимізації нерівноважних теплових потоків. В умовах глобального потепління та енергетичної кризи, зокрема в Україні, ці технології стають особливо актуальними.

Ці пристрої пропонують унікальні переваги: відсутність рухомих частин, що підвищує надійність, точний контроль температури (з точністю до 0.1°C), компактність і можливість інтеграції в складні системи. Однак їх широке впровадження стримується низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) $\approx 1\text{-}2.5$ порівняно з традиційними компресорними системами, що безпосередньо пов'язано з фундаментальними обмеженнями сучасних термоелектричних матеріалів.

Принципи роботи

Термоелектричні теплові насоси базуються на двох ключових ефектах: Пельтьє та Зеебека, які є прямими і зворотними термоелектричними явищами.

Ефект Пельтьє полягає у виділенні або поглинанні тепла на межі контакту двох різних провідників або напівпровідників при проходженні через них електричного струму. Якщо струм протікає в одному напрямку, на одному контакті відбувається поглинання тепла (охолодження), а на іншому — виділення тепла (нагрівання). Зворотна полярність змінює напрямок теплопереносу. Цей ефект є основою роботи ТЕТН у режимі теплового насоса або активного охолодження. Кількість перенесеного тепла пропорційна силі струму та залежить від матеріалу:

$$Q = \Pi I t,$$

де Π — коефіцієнт Пельтьє, I — сила струму, t — час.

Ефект Зеебека — обернене явище: при створенні температурного градієнта між двома контактами різновидних матеріалів, виникає електрична напруга. Цей ефект використовується у генераторному режимі для виробництва електроенергії з тепла:

$$V = S \Delta T,$$

де S — коефіцієнт Зеебека, ΔT — різниця температур.

Слід зазначити, що ефекти Пельтьє та Зеебека є частинами ширшого термоелектричного опису, що також включає ефект Томсона (теплова взаємодія при градієнті температури у провіднику, в якому протікає струм).

Добротність термоелектричних матеріалів (ZT) — ключова характеристика ефективності, що поєднує три властивості: коефіцієнт Зеебека S , електропровідність σ і теплопровідність κ :

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}$$

де T — абсолютна температура. Високе значення ZT (>1) означає добру термоелектричну ефективність.

Основне інженерне завдання — збільшити чисельник ($S^2\sigma$) і зменшити знаменник (κ). Але ці параметри сильно пов'язані між собою: підвищення провідності часто супроводжується зростанням теплопровідності. Сучасні дослідження намагаються порушити цей зв'язок, зокрема, шляхом наноструктурування матеріалів [4], [6].

Для ефективної роботи ТЕТН використовуються напівпровідники, які мають високе значення коефіцієнта Зеебека і низьку теплопровідність. Найбільш популярні матеріали:

Bi_2Te_3 (телурид вісмуту) — оптимальний для роботи при температурі 250–350 К (кімнатна температура), $ZT \approx 1.1\text{--}1.2$ [1], [4];

PbTe (телурид свинцю) — ефективний у діапазоні 400–600°C (високотемпературні ТЕТН), ZT досягає 2.2 [4];

Mg_3Sb_2 , SnSe , GeTe — нові альтернативи без токсичних елементів, перспективні для масового впровадження [6], [7].

Конструкція ТЕТН зазвичай містить:

пари р- і n-типу термоелементів, з'єднаних електрично послідовно, а термічно паралельно, керамічні пластини як теплообмінники та механічну основу, внутрішнє модульне компонування, яке дозволяє масштабування.

Модулі легко інтегруються у компактні пристрої, що робить їх привабливими для портативних охолоджувачів, медичних пристроїв, космічної техніки та навіть військових застосувань, де важлива автономність та надійність.

Економічна доцільність

Термоелектричні теплові насоси (ТЕТН) програють компресорним аналогам ККД, який у ТЕТН зазвичай становить 1.0–2.5, тоді як у компресорних систем – 3.0–5.0. Проте переваги ТЕТН полягають у відсутності рухомих частин, що знижує витрати на технічне обслуговування, безшумній роботі, що важливо для медичних і лабораторних застосувань, точному керуванні температурою (± 0.1 °C), екологічності (відсутність фреонів або інших шкідливих холодоагентів), довгому терміні служби ($>100\,000$ годин) [1], [5].

Основним стримувальним фактором є висока вартість напівпровідникових матеріалів, особливо таких як Bi_2Te_3 та PbTe , які містять телур – рідкісний та дорогий елемент.

Зараз шукають варіанти зниження собівартості. Останні дослідження зосереджені на використанні альтернативних дешевших матеріалів, зокрема: Mg_3Sb_2 – нетоксичний, недорогий матеріал з $ZT > 1.5$ [6]; SnSe – перспективний термоелектрик із $ZT \approx 2.6$ за високих температур [8]; кремнієві наноструктури – можуть стати основою для недорогих гібридних ТЕТН у майбутньому [9].

Технології 3D-друку та тонкоплівкового нанесення відкривають шлях до автоматизації виробництва та здешевлення модулів на 30–50% [5], [10]. Також перспективним є поєднання ТЕТН із накопичувачами енергії (акумулятори, теплові банки), що дозволяє вирівнювати пікові навантаження та зменшити експлуатаційні витрати.

Імплементация в Україні в умовах війни та нападу ворога на енергетичну систему спонукає до використання відновлюваної енергетики, поєднання з сонячними фотоелектричними панелями для автономного клімат-контролю будівель, охолодження сонячних панелей задля підвищення їх ККД (до 10–15%) [11].

В промисловість рекуперация низькопотенційного тепла ($<300\text{ }^{\circ}\text{C}$) з відхідних газів, трубопроводів, печей (приклади – ТЕЦ, Запоріжсталь, феросплавні заводи), термоелектричні модулі вбудовані в металургійні конструкції для зменшення втрат енергії.

В побуті та інфраструктурі, автономні системи опалення/охолодження для сільських та гірських регіонів, використання в медичних установах, лабораторіях, на транспорті (включно з залізничними та вантажними перевезеннями).

Перешкоди для впровадження є висока початкова вартість обладнання: модулі потужністю 100 Вт коштують \$350–500, що обмежує доступність для широкого кола споживачів в Україні, також залежність від імпорту основні постачальники – Китай, США, Німеччина;

Нестача фахівців і відсутність стандартизації у проектуванні систем на базі ТЕТН, відсутність національних програм підтримки «зелених» технологій. Запуск пілотних проєктів з фінансуванням ЄС, наприклад в рамках програм "Horizon Europe" або "Green Deal Ukraine". Створення дослідних лабораторій при університетах (КПІ, ХПІ, ЛНТУ, ЧНУ), а також кооперація з НАНУ, розробка українських ТЕТН на базі локально доступних матеріалів (Mg, Sb, Si), інтеграція ТЕТН в систему енергетичного паспортизування будівель як один з критеріїв енергоефективності.

Висновки

ТЕТН ефективні для несприятливих умовах застосувань (вибіркове охолодження, рекуперация тепла). Впровадження в Україні потребує державної підтримки та інвестицій у дослідження. Перспективи пов'язані з розробкою дешевих матеріалів (наприклад, на основі кремнію) будуть популяризувати цю технологію.

Список літератури

- [1] H. J. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*, Springer, 2016.
- [2] Vitalii Semeshkin and Radion Cherkez. Relationship of non-equilibrium thermodynamics in the heterogeneous permeable thermoelements. Chapter «Physical and mathematical sciences» // *Science, technology and innovation in the modern world: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023. P.1- 33. (4,125 друк. арк.) ISBN: 978-9934-26-364-4, <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-364-4-1>
- [3] R. G. Cherkez, "Energy Possibilities of Permeable Generator Thermoelements Based on Segmented Legs," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1482, pp. 1-5, 2012, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4731590>
- [4] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex Thermoelectric Materials," *Nature Materials*, vol. 7, pp. 105–114, 2008.
- [5] L. E. Bell, "Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems," *Science*, vol. 321, pp. 1457–1461, 2008.
- [6] Y. Pei et al., "Band Engineering of Thermoelectric Materials," *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 6125–6135, 2012.
- [7] Міністерство енергетики України, "Енергетична стратегія України до 2035 року", 2017.
- [8] L.-D. Zhao et al., "Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe," *Science*, vol. 351, no. 6269, pp. 141–144, 2016.
- [9] A. I. Boukai et al., "Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials," *Nature*, vol. 451, pp. 168–171, 2008.
- [10] S. Deng et al., "3D printing of thermoelectric materials and devices," *Materials Today Physics*, vol. 15, 100278, 2020.
- [11] A. R. Rejeb et al., "Performance analysis of a hybrid photovoltaic–thermoelectric system: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 868–885, 2018.