

DOI: 10.63527/1607-8829-2025-1-37-47

Черкез Р.Г.^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-7218-6815>),
Порубаний О.М.¹ (<https://orcid.org/0009-0007-8943-3118>),
Константинович І.А.^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0001-6254-6904>),
Томко С.О.¹ (<https://orcid.org/0009-0003-2540-7480>)

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна;

²Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки 1, Чернівці, 58029, Україна

Автор-кореспондент: Черкез Р.Г., e-mail: radionch@ukr.net

Комп'ютерне дослідження термоелемента з розвиненим бічним теплообміном

Робота присвячена дослідженню термоелектричних генераторних елементів із розвиненим бічним теплообміном, що дозволяє підвищити їхню ефективність. Використовуючи програмне середовище Comsol Multiphysics, було створено тривимірну модель термоелемента з розвиненим бічним теплообміном. Досліджено вплив висоти вітки та швидкості подачі теплоносія на коефіцієнт корисної дії (ККД), потужність що генерується термоелементом, напругу та інші характеристики.

Ключові слова: комп'ютерне проектування, проникні структури, термоелектричні генераторні елементи, ефективність, електрична потужність.

Вступ

Розвиток термоелектричних технологій відіграє ключову роль у підвищенні ефективності систем перетворення енергії, особливо в умовах автономного енергопостачання та утилізації відходів тепла [1–3]. Одним з перспективних напрямків удосконалення термоелектричних пристроїв є оптимізація конструкції термоелементів, що забезпечує підвищення їх енергоефективності. Зокрема, важливим фактором є використання теплообміну на бічній поверхні термоелемента [4, 5], який може суттєво впливати на розподіл температури та робочі характеристики пристрою.

В роботах [6–9] показано, що зміна геометрії віток та теплових умов на бічних поверхнях термоелемента дозволяє керувати процесами теплообміну, що, в свою чергу, впливає на ефективність термоелектричного перетворення енергії. В роботі [10], описані

Цитування: Черкез Р.Г., Порубаний О.М., Константинович І.А., Томко С.О. (2025). Комп'ютерне дослідження термоелемента з розвиненим бічним теплообміном. *Термоелектрика*, (1), 37 – 47. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-1-37-47>

методи розрахунку оптимальних параметрів двох моделей термоелектричного перетворювача в режимі генерації електричної енергії, а саме секційного перетворювача з рухом теплоносія вздовж теплопоглинальних спаїв термоелементів і перетворювача з проникних термоелементів, в якому теплоносій проходить по каналам, розташованим вздовж висоти віток термоелементів. Проведені порівняння по ефективності показали, що проникні термоелементи можуть переважати по ефективності традиційні та досягати секційні. Тому, актуальним є розвиток роботи [11] по оптимізації конструкції таких термоелементів в 3D моделі, для досягнення їх максимальної ефективності. Результати аналізу дозволять оцінити ефективність різних конструктивних рішень і сформулювати рекомендації щодо оптимізації термоелементів з бічним теплообміном для генерації електричної енергії, використовуючи відпрацьоване тепло транспортних засобів та інші теплові відходи.

Метою даної роботи створення комп'ютерної 3D моделі термоелемента з розвиненим бічним теплообміном та аналіз його ефективності у залежності від висоти гілок та швидкостей теплоносія.

1. Фізична модель проникного термоелемента в режимі генерації електричної енергії

Фізичну модель проникного термоелемента зображено на рис. 1. Фізична модель включає гілки n- та p-типу провідності 2 і 10 відповідно та електричні комутаційні пластини 4, 11, 12. Гілки та комутаційні пластини охоплені адіабатичною ізоляцією 1 та 8, які разом утворюють канали 5, 6, 9. Через канал 6 подається теплоносій 7 з температурою T_H , який перетікає через канали 3, 5, 9 та обмінюється теплом з комутаційними пластинами та гілками термоелемента. Температура T_0 нижніх комутаційних пластин фіксована. Гілки n- та p-типу провідності з'єднані між собою тонким електроізоляційним прошарком 14.

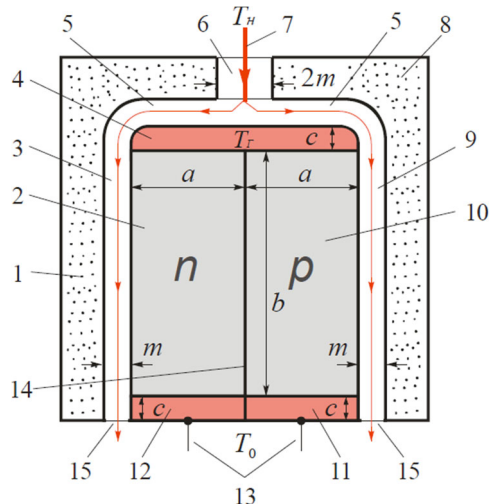


Рис. 1. Фізична модель проникного термоелемента: 1, 8 – адіабатична ізоляція, 2, 10 – гілки n- та p-типів провідності, 3, 5, 6, 9 – канали, 4, 11, 12 – комутаційні пластини, 7 – теплоносій, 13 – електричні контакти, 14 – прошарок між гілками n- і p-типу, 15 – виходи каналів

Розмір термоелемента в напрямі, перпендикулярному до площини рисунка – d , величина $d = 2a$. Площини $d = 0$ і $d = a$ формують передню і задню стінки каналів 3, 5, 6, 9. Вони є адіабатично ізольовані. В моделі тертя між теплоносієм та стінками каналів відсутнє.

Гілки виконані з однорідного матеріалу на основі Ві-Те з максимальним значенням добротності Z в інтервалі температур $20\div 320^\circ\text{C}$. Матеріал гілок є однорідним та ізотропним з відомими температурними залежностями коефіцієнтів електропровідності $\sigma(T)$, термоЕРС $\alpha(T)$ та теплопровідності $\kappa(T)$. В термоелектричному середовищі враховані об'ємні ефекти Томсона, Джоуля-Ленца та Пельтьє. Також в моделі враховано електричний контактний опір між комутаційними пластинами та гілками термоелемента. Електричні комутаційні пластини виконано з міді.

2. Математичний опис та реалізація моделі в COMSOL Multiphysics

Середовище моделювання COMSOL [12] Multiphysics надає різноманітні інструменти та можливості для дослідження фізичних явищ та проектування моделей, що використовуються в наукових дослідженнях. Для реалізації описаної моделі нами використано модуль середовища *Multiphysics*, який включає в себе наступні модулі.

Модуль *Laminar Flow* (Ламінарний потік)

Інтерфейс модуля використовується для обчислення полів швидкості та тиску для потоку однорідної рідини в ламінарному режимі течії.

Рівняння, що розв'язуються за допомогою інтерфейсу *Ламінарного потоку* – це рівняння Нав'є-Стокса для збереження імпульсу (1) та рівняння неперервності для збереження маси (2):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (2)$$

де ρ – густина теплоносія, \mathbf{v} – вектор швидкості рідини, t – час, p – тиск, μ – коефіцієнт в'язкості, \mathbf{f} – зовнішні сили.

Розглядатимемо стаціонарний випадок у відсутності зовнішніх сил. Теплоносій вважаємо нестискуваним, внутрішнім тертям нехтуємо. Тоді рівняння (1), (2) набудуть наступного вигляду:

$$\rho(\mathbf{v} \nabla \mathbf{v}) = -\nabla p, \quad (3)$$

$$\rho \nabla \mathbf{v} = 0, \quad (4)$$

Для стінок каналів застосуємо граничну умову для швидкості, яка виключає ковзання теплоносія

$$\mathbf{v} = 0, \quad (5)$$

на вході швидкість теплоносія

$$\mathbf{v} = -v_0 \mathbf{n}, \quad (6)$$

де \mathbf{n} – вектор нормалі до площини входу теплоносія, v_0 – лінійна швидкість теплоносія на вході.

На виходах каналів вважаємо, що теплоносій не відчуває опору. Граничні умови будуть

$$p = 0.$$

Модуль *Heat Transfer in Fluids* (Теплопередача в потоках)

Інтерфейс цього модуля використовується для моделювання теплопередачі в рідинах шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання.

Рівняння теплопередачі в загальному випадку має вигляд:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \nabla (\kappa \nabla T) + Q, \quad (7)$$

де C_p – теплоємність при сталому тиску, Q – джерело тепла.

У нашому випадку (стаціонарний, без джерел тепла) рівняння (7) матиме вигляд:

$$\rho C_p \mathbf{v} \nabla T = \nabla (\kappa \nabla T). \quad (8)$$

Граничною умовою на вході теплоносія є

$$T = T_H, \quad (9)$$

на виході теплоносій передає тепло тільки через масопереніс:

$$\mathbf{q} = -\nabla (\kappa \nabla T) = 0. \quad (10)$$

На границях каналів, які контактують з термоелектричними гілками, виконуються умови теплообміну за законом Ньютона-Ріхмана

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h(T_{TE} - T) \quad (11)$$

де h – коефіцієнт теплообміну, T_{TE} – температура гілки термоелемента.

Всі інші границі адіабатно ізольовані

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (12)$$

Описані вище модулі дозволяють знайти поля швидкостей і температур у теплоносії.

Розглянемо тепер явища, які відбуваються у гілках термоелемента. Для цього були застосовані наступні модулі.

Модуль *Heat Transfer in Solids* (Теплопередача в твердих тілах)

В цьому модулі рівняння для знаходження розподілу температури T відповідає диференціальній формі закону Фур'є:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\kappa \nabla T) + Q_J, \quad (13)$$

де Q_{ext} – джерело тепла. Для стаціонарного випадку закон Фур'є має вигляд

$$-\nabla (\kappa \nabla T) = Q_J. \quad (14)$$

де Q_J – тепло Джоуля

$$Q_J = \mathbf{j} \nabla U, \quad (15)$$

\mathbf{j} – густина електричного струму (19.)

Граничними умовами для гілок термоелемента є:

– температура холодної сторони термоелемента

$$T = T_C, \quad (16)$$

– тепловий потік через границі термоелемента, що контактують з теплоносієм

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h(T_{HC} - T), \quad (17)$$

де T_{HC} – температура теплоносія.

Всі інші границі гілок термоелемента адіабатично ізолювані.

Модуль *Current Conservation* (Збереження електричного струму)

В цьому модулі задіяно закон збереження електричного струму для розрахунку поля електричного потенціалу U . У стаціонарному випадку він має наступний вигляд:

$$\nabla \mathbf{j} = 0, \quad (18)$$

де \mathbf{j} – густина електричного струму. Вона визначається узагальненим законом Ома

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T, \quad (19)$$

де другий доданок в правій частині відповідає за термоелектричні явища.

Граничні умови для поставленої задачі наступні. Один з електричних контактів є *Ground*:

$$U = 0. \quad (20)$$

Інший електричний контакт в залежності від режиму роботи термоелемента або електрично ізолюваний (режим ЕРС)

$$\mathbf{n} \mathbf{j} = 0, \quad (21)$$

або відповідає наступній умові (режим оптимального навантаження):

$$U = U_0 = \varepsilon / 2, \quad (22)$$

де ε – електрорушійна сила термоелемента, отримана в режимі ЕРС.

Інші границі термоелемента електрично ізолювані (21).

Всі перелічені модулі працюють одночасно у ітераційному циклі розрахунків для обчислення взаємопов'язаних полів швидкості \mathbf{v} , температури T та електричного потенціалу U у відповідних елементах конструкції термоелемента.

Коефіцієнт корисної дії термоелемента визначається за формулою

$$\eta = \frac{W}{Q_H}, \quad (23)$$

де W – електрична потужність термоелемента, Q_H – теплова потужність, що надходить з теплоносієм.

$$W = IU_0. \quad (24)$$

Електричний струм, що протікає через термоелемент визначається інтегруванням по площі одного з електричних контактів:

$$I = \iint_S \mathbf{j} d\mathbf{S}. \quad (25)$$

де $d\mathbf{S}$ – елементарний вектор поверхні (нормальний до поверхні).

Теплова потужність, що надходить до термоелемента, визначається інтегруванням по площі вхідного каналу:

$$Q_H = \iint_S (-k\nabla T + \rho C_p \mathbf{v}(T - T_0)) dS, \quad (25)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

Дослідження такого роду були проведені для проникної термопари в 3D-моделі, а результати вперше отримані в роботі [10]. Досліджено вплив швидкості перекачування теплоносія та напруги живлення термопари на різницю температур та ефективність перетворення енергії. Тут визначимо оптимальне значення швидкості теплоносія та визначимо оптимальну висоту гілок термоелемента з розвиненим бічним теплообміном в режимі генерації електричної енергії.

3. Результати моделювання

Моделювання термоелемента здійснювалось для наступної геометричної конфігурації (Рис.1): висота $b = 10$ мм, $d = 1$ мм, ширина $a = 0.5$ мм. Товщина комутаційних пластин $c = 0.1$ мм, ширина каналів $3, 9 \text{ m} = 0.1$ мм, ширина каналу $6 - 2\text{m}$.

Температурні залежності кінетичних коефіцієнтів термоелектричного матеріалу на основі Ві-Те які використані при моделюванні, отримано в Інституті термоелектрики [13]. Матеріал комутаційних пластин – мідь. Теплоносій – повітря.

Змінними параметрами моделювання були висота гілки d та лінійна швидкість v теплоносія на вході (Рис.2а, inflow). Висота гілки змінювалася в діапазоні 1–15 мм. Характеристики термоелемента вивчалися для швидкості теплоносія в діапазоні 0.1–3 м/с. Температура теплоносія на вході $T_H = 600$ К, температура холодної сторони $T_0 = 300$ К.

На рис. 2 приведено комп'ютерне представлення моделі термоелемента з розвиненим бічним теплообміном. Для високої точності розрахунків обиралися сітка скінченних елементів з високою дискретизацією. В даній моделі вона містила $\sim 10^6$ елементів.

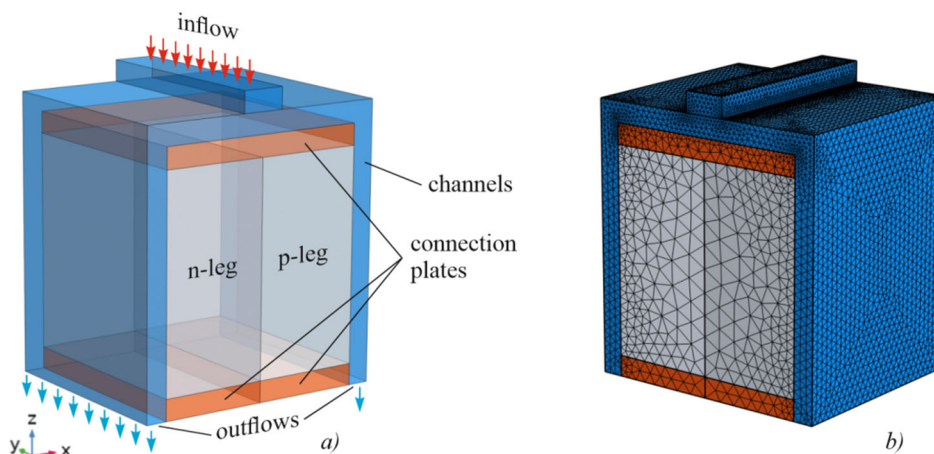


Рис. 2. Комп'ютерна модель термоелемента: а) конструкція термоелемента, б) сітка скінченних елементів

На рис. 3, 4 наведено приклади розрахованих полів швидкостей та температур теплоносія в каналах термоелемента. На рисунках зображено переріз у площині zx для висоти гілки $d = 1$ мм та швидкості теплоносія на вході $v = 3$ м/с.

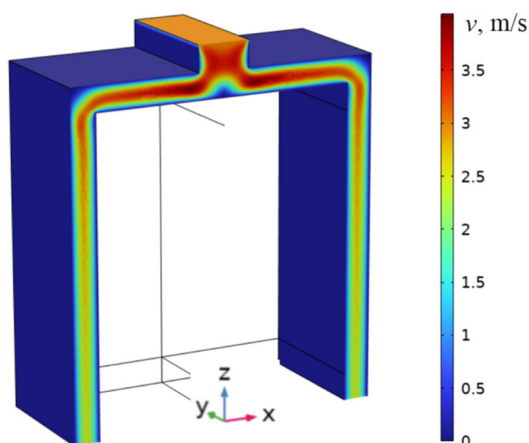


Рис 3. Поле швидкостей теплоносія в каналах термоелемента

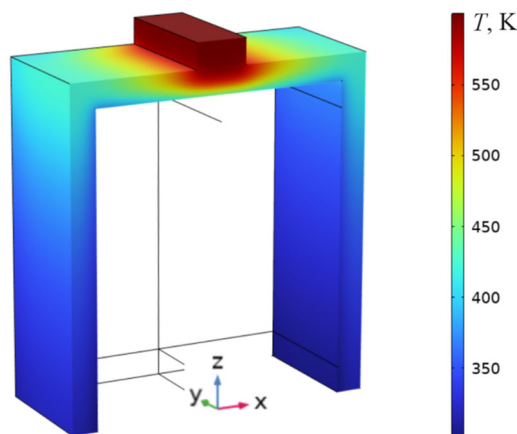


Рис 4. Поле температур теплоносія в каналах термоелемента

В процесі проходження каналами теплоносій обмінюється теплом з термоелектричними гілками термоелемента, створюючи у них перепад температур, завдяки якому в термоелементі генерується електрорушійна сила (ЕРС).

На рис. 5 наведено приклад розподілу температури у гілках термоелемента, на рис. 6 – приклад розподілу електричного потенціалу в них. Різниця електричних потенціалів на контактах і є згенерована ЕРС.

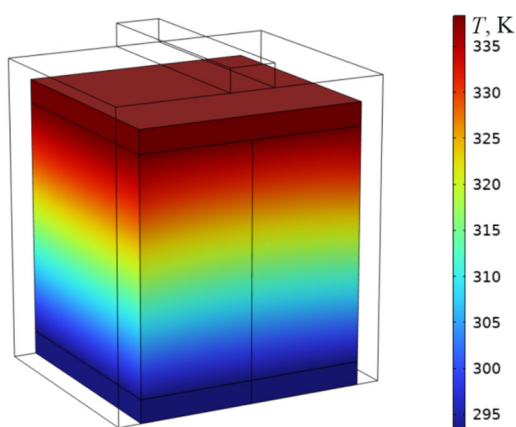


Рис. 5. Розподіл температури в гілках термоелемента

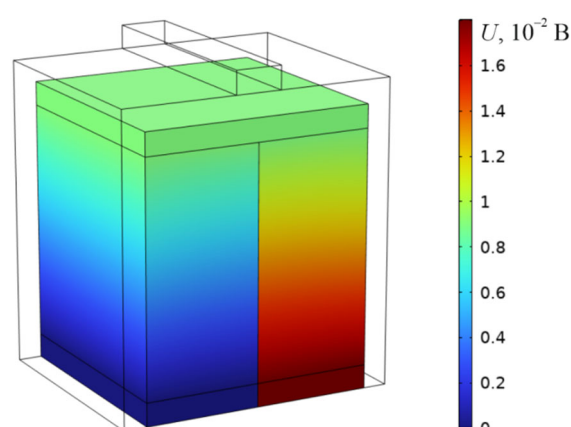


Рис. 6. Розподіл електричного потенціалу в гілках термоелемента

На рис. 7 наведено графіки залежності коефіцієнта корисної дії термоелемента з оптимальним електричним навантаженням у залежності від вхідної швидкості теплоносія та висоти гілок.

Проведене моделювання термоелектричного генератора для різних довжин вітки (1 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм) показало, що швидкість теплоносія суттєво впливає на його енергетичні характеристики. Визначено, що зі збільшенням швидкості до 0.8–1 м/с відбувається вихід на насичення електрорушійної сили термоелемента, а також напруги та електричного струму на навантаженні, після чого подальше зростання швидкості не дає значного приросту ефективності.

Оптимальний діапазон швидкостей 0.8–1 м/с спостерігається для всіх досліджених довжин гілок термоелемента, що свідчить про загальну закономірність у процесах теплопередачі та генерації електроенергії. Високі швидкості (~3 м/с) не дають суттєвого покращення характеристик, тоді як при надто низьких значеннях спостерігається значне падіння ефективності. Це підтверджує, що процес перенесення тепла в каналі термоелемента має межу ефективності, обумовлену як внутрішніми властивостями матеріалу, так і тепловим контактом із потоком теплоносія.

На рис. 8 наведено графіки залежності електричної потужності термоелемента з оптимальним електричним навантаженням у залежності від вхідної швидкості теплоносія та висоти гілок.

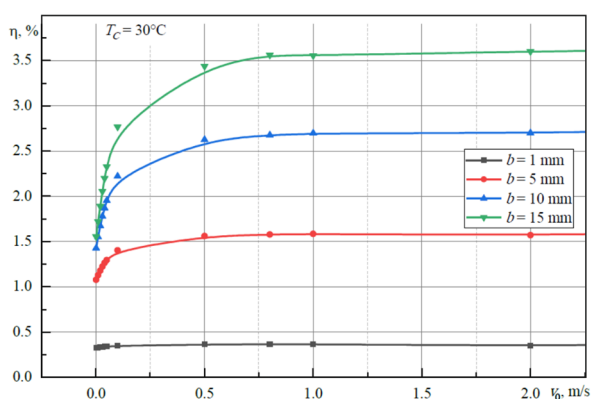


Рис. 7. Залежність коефіцієнта корисної дії термоелемента від вхідної швидкості теплоносія для різних висот гілок термоелемента

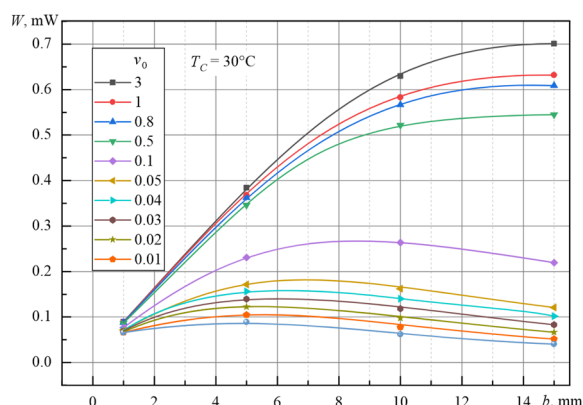


Рис. 8. Залежність електричної потужності термоелемента від вхідної швидкості теплоносія для різних висот гілок термоелемента

Я видно з рис. 7, 8, подальше збільшення висоти гілки не надає суттєвого покращення ККД, а потужність виходить на насичення або навіть зменшується (для низьких швидкостей теплоносія). Окрім того, збільшення висоти веде до зростання витрат на напівпровідниковий матеріал, його маси та складності виготовлення термоелемента.

Отримані результати вказують на необхідність врахування особливостей теплового контакту [14], залежності теплообміну в каналах від швидкості повітря, діаметру каналів, температурних умов при проектуванні термоелектричних елементів з розвиненим бічним теплообміном. Визначений діапазон швидкостей дозволяє досягти максимального коефіцієнта корисної дії, що є ключовим фактором для підвищення енергоефективності таких генераторів у практичних умовах експлуатації.

Висновки

1. Раціональна швидкість теплоносія для термоелектричних генераторів знаходиться в межах 0.8–1 м/с і забезпечує найкраще співвідношення між ефективністю генерації та витратами на продувку теплоносія.
2. Збільшення швидкості понад 1 м/с не дає суттєвого зростання ККД, тоді як занадто

- низькі швидкості значно знижують електричну потужність, що генерує термоелемент.
- Збільшення висоти термоелектричних гілок до 15 мм дозволяє отримати більшу електричну потужність з термоелемента при швидкостях теплоносія, вищих за 0.5 м/с. Подальше збільшення висоти гілки недоцільне через ріст вартості та зменшення надійності роботи такого термоелемента.

Отримані результати моделювання можуть бути використані для оптимізації конструкції генераторного термоелемента з розвиненим бічним теплообміном.

Інформація про авторів

Черкез Р.Г. – Доктор фіз.-мат. наук.

Порубаний О.М. – Аспірант.

Константинович І.А. – Кандидат фіз.-мат. наук.

Томко С.О. – Студент.

Література

- Burnete N. V., Mariasiu F., Depcik C., Barabas I., Moldovanu D. (2022). Review of thermoelectric generation for internal combustion engine waste heat recovery. *Progress in Energy and Combustion Science*, 91, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101009>
- 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. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 73–79.
- Anatyshuk L. I., Kuz R. V. (2016). Thermoelectric generator for trucks. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 40–45.
- Anatyshuk, L., Prybyla, A., Korop, M., Kiziuk, Y., & Konstantynovych, I. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat: Part 1. *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-1-2-90-96>
- 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.
- Zavanelli D., Proschel A., Winograd J., Cherkez R., Snyder G. J. (2022). When power factor supersedes zT to determine power in a thermocouple. *Journal of Applied Physics*, 131(11). <https://doi.org/10.1063/5.0075633>
- Cherkez R. G. (1998). On the possibility of improving thermoelectric cooling efficiency by changing the shape of thermopile legs. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 41–46.
- Anatyshuk L. I., Cherkez R. G. (2003). On the properties of permeable thermoelements. In *Proceedings of the International Conference on Thermoelectrics (ICT)* (pp. 480–483).
- Cherkez R. G. (2012). Energy characteristics of thermoelement with a developed lateral heat exchange. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 59–68.
- Eura T., Komine T., Hasegava Y., Takata A., Katsuki F., Katoh M., Nakao K., Utsumi K. Research and Development on a thermoelectric power generating system using Low-

- Calorie Exhaust Gas // 17-19 th ICT. - 1998-2000.
11. Eura T., Komine T., Hasegava Y., Takata A., Katsuki F., Katoh M., Nakao K., Utsumi K. Research and Development on a thermoelectric power generating system using Low-Calorie Exhaust Gas // 20th ICT. – 2001. - P. 409-412.
 12. Yoshida H., Ohnaka I., Kaziura H., Yano T. Synthesis of porous thermoelectric devices // 17th ICT. – 1998.- P. 502-509.
 13. Anatyshuk L., Cherkez R., Porubanyi O., Zhukova, A. (2022). Effect of leg thickness and heat carrier velocity on the efficiency of a permeable generator thermoelement. *Journal of Thermoelectricity*, (1), 44–54.
 14. Anatyshuk L., Vykhor L., Kotsur M., Kuz R., Cherkez R. (2021). Comparative analysis of thermoelectric energy converters with permeable and solid thermoelements. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 54–70.
 15. Anatyshuk, L., Cherkez, R., & Shcherbatyi, D. (2021). Computer simulation of a permeable generator thermoelement. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 29–40.
 16. COMSOL. (2022). *COMSOL Multiphysics Reference Manual Version 6.2*. https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf
 17. Anatyshuk L. I., Havryliuk M. V., Lysko V. V. (2022). Equipment for determining thermoelectric properties of material by modified Harman's method. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 67–74.
 18. Kshevetsky O., Cherkez R. & Mazar, Y. (2023). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance: Part 4. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 64–75.
 19. 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, pp.516–519.
 20. 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>
 21. 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. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431124022671>
 22. 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. Available at: <https://dergipark.org.tr/pub/taufenbilder/issue/56422/699176>
 23. 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. Available at: https://ijritcc.org/download/conferences/ICIIME_2017/ICIIME_2017_Track/1497591597_16-06-2017.pdf

24. Anatyshuk, L.I. and Vikhor, L.N. (2012). Thermoelectricity. Volume IV. Functionally graded thermoelectric materials. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine, 172 pp.
25. Lv H, Wang X-D, Wang T-H, Cheng C-H. (2016). Improvement of transient supercooling of thermoelectric coolers through variable semiconductor cross-section. Appl Energy, 164, 501–508.
26. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. Computer design of thermoelectric functionally graded materials // Proc. of the Fourth International Symposium on FGM. – Tsukuba (Japan). - 1996. - P. 501-508.
27. Rowe, D.M. (2006). Thermoelectric Handbook: Macro to Nano. CRC Press, 1008 p.
28. Anatyshuk, L. I. and Vikhor, L. N. (2012). Thermoelectricity. Volume IV. Functionally graded thermoelectric materials. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine, 172 pp.
29. Demchuk M.B., Luste O. J. Method of Assembling a Thermopile, Certificate of Authorship № 1145857, 1984.
30. L.I. Anatyshuk, I. A. Konstantynovych. Patent of Ukraine № 93217, InCl H01L 35/00, Method for Manufacturing Thermoelectric Microthermopile; Application № u201403210; filed 31.03.14.

Надійшла до редакції 02.02.2025

R.G. Cherkez^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0002-7218-6815>),
O.M. Porubanyi¹ (<https://orcid.org/0009-0007-8943-3118>),
I.A. Konstantynovych^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0001-6254-6904>),
S.O. Tomko¹ (<https://orcid.org/0009-0003-2540-7480>)

¹Yury Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;
²Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES
of Ukraine, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine

Computer-Aided Study of a Thermoelement with Developed Lateral Heat Exchange

The work is devoted to the study of thermoelectric generator elements with developed lateral heat exchange, which allows increasing their efficiency. Using the Comsol Multiphysics software environment, a three-dimensional model of a thermoelement with developed lateral heat exchange was created. The influence of the leg height and the velocity on the efficiency, the power generated by the thermoelement, the voltage and other characteristics was studied.

Key words: computer design, permeable structures, thermoelectric generator elements, efficiency, electric power.

Submitted: 02.02.2025