

DOI: 10.63527/1607-8829-2025-4-82-92

Лобунець Ю.М.¹ (<https://orcid.org/0000-0002-3593-1687>),
Клюс В.П.¹ (<https://orcid.org/0000-0001-8536-3211>),
Четверик Г.О.¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>),
Розвер Ю.Ю.^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0002-4830-2206>),
Гаврилюк М.В.^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0003-3207-2917>),
Константинович І.А.^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0001-6254-6904>)

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України;

²Інститут термоелектрики Національної Академії наук та
Міністерства освіти України, вул. Науки 1, Чернівці, 58029, Україна;

³Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58000, Україна

Автор-кореспондент: Лобунець Ю.М., e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Комбіноване джерело теплової та електричної енергії на базі піролізного пального та універсального термоелектричного генератора

Наведено результати випробувань комбінованої системи виробництва теплоти та електроенергії, що складається з піролізного пального ПП-8 та універсального термоелектричного генератора. Досліджено теплофізичні характеристики системи в різних режимах роботи пального, визначено умови узгодження теплових параметрів пального та термоелектричного модуля. Проаналізовано вплив інтенсифікації теплообміну на робочий перепад температур і вихідну електричну потужність ТЕГ. Показано, що за рахунок оптимізації режимів горіння та конструктивних умов підведення теплового потоку можливо забезпечити стабільну роботу генератора з електричною потужністю до 200 Вт. Наведено короткі технічні характеристики універсального термоелектричного генератора та піролізного пального ПП-8.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, термоелектричний модуль, енергоефективність, методи оптимального керування, контактний опір, термічний опір, комутаційні та ізоляційні пластини.

Цитування: Лобунець Ю.М., Клюс В.П., Четверик Г.О., Розвер Ю.Ю., Гаврилюк М.В., Константинович І.А. (2025). Комбіноване джерело теплової та електричної енергії на базі піролізного пального та універсального термоелектричного генератора. Термоелектрика, (4), 85–96. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-4-82-92>

Вступ

Використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) в складі мікросистем з комбінованого виробництва теплоти та електроенергії (μСНР) вважається перспективним для застосування на автономних об'єктах, в польових умовах та в разі надзвичайних ситуацій. Відомі розробки експериментальних та комерційних зразків μСНР можна розділити на дві групи – це системи з ТЕГ, інтегрованими в конструкцію пальника та системи з універсальними генераторами, що можуть використовувати різноманітні джерела теплоти. В останньому випадку виникає необхідність узгодження теплових режимів джерела і перетворювача енергії з метою досягнення прийнятних техніко-економічних показників системи. Головне завдання при цьому полягає в забезпеченні оптимальних теплових потоків в системі джерело теплоти – ТЕГ – система охолодження з урахуванням особливостей конструкції генератора та джерела теплової енергії. Більшість відомих систем μСНР в якості джерела теплової енергії використовує пристрої прямого спалювання твердого біопалива (дрова, тріска, пелети та брикети), [1 – 5]. Головними недоліками таких джерел є нестабільність теплових режимів, складність їх регулювання та великі викиди сажі й оксиду вуглецю в атмосферу. Усунути ці недоліки можна в разі використання газогенераторних пальників, що реалізують піролізний режим горіння твердого палива. В цій роботі наведені результати дослідження системи μСНР, що включає універсальний термоелектричний генератор розроблений в Інституті термоелектрики та піролізний пальник типу ПП-8, розроблений в Інституті відновлюваної енергетики.

Універсальний термоелектричний генератор

Універсальний термоелектричний генератор [6] виготовлений у виді ємності для нагріву води, до дна якої із зовнішньої сторони прикріплений термоелектричний блок. Блок складається з двох теплообмінних вузлів – «гарячого» і «холодного», між якими розміщуються термоелектричні модулі. Тепловий потік, який надходить від джерела, проходить через термоелектричний блок і розсіюється в об'ємі ємності за рахунок нагріву та випаровування охолоджувальної рідини. При цьому на термоелементах блоку виникає перепад температури, внаслідок чого блок генерує термо-ЕРС, величина якої пропорційна перепаду температур і кількості послідовно з'єднаних термоелементів. Генератор оснащений стабілізатором напруги, який забезпечує постійну напругу на виході для живлення споживачів. Універсальний термоелектричний генератор, призначений для кріплення на ємностях для води об'ємом 2–5 л, має вигляд, показаний на рис. 1.

Пристрій може працювати від різних джерел тепла: розігрітих плоских поверхонь печей, газових чи мультипаливних туристичних примусів, відкритого полум'я тощо. Ємність (каструля) слугує для нагріву води або приготування їжі. Тепло від згорання палива проходить через термоелектричні модулі та передається в об'єм каstrулі, підігріваючи воду. Унаслідок цього між теплообмінниками, а відповідно між гарячими

та холодними сторонами модулів, формується перепад температур, що спричиняє появу електричної напруги, пропорційної цьому перепаду. Потужність, яку можна отримати від модулів, визначається потужністю теплового джерела. Технічні характеристики приведені в таблиці 1 [7].

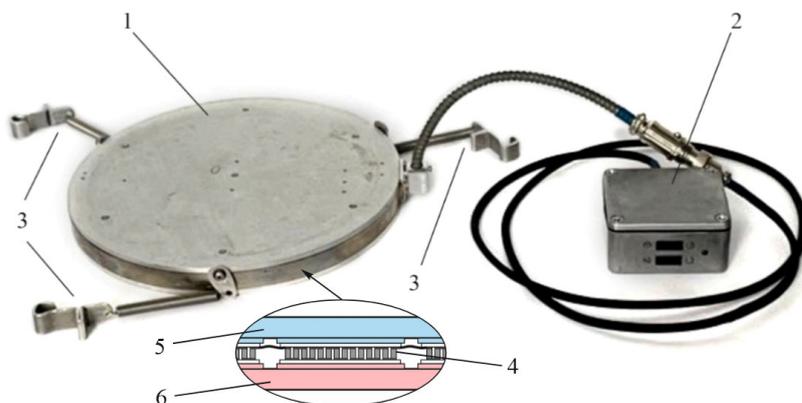


Рис. 1. Зовнішній вигляд універсального термоелектричного генератора:
 1 – термоелектричний генератор; 2 – електронний блок стабілізації вихідної напруги;
 3 – гачки на пружинах для кріплення генератора на ємності з водою, 4 – термоелектричні генераторні модулі; 5 – «холодний» теплообмінник; 6 – «гарячий» теплообмінник

Таблиця 1

Технічні характеристики універсального термоелектричного генератора

Вихідна напруга постійного струму	5 ± 0.2 В, 12 ± 0.2 В
Номінальна вихідна потужність	15 Вт
Термоелектричні модулі типу Алтек 1061	3 шт.
Максимальна робоча температура	300 °С (короткостроково до 400 °С)
Максимальний об'єм охолоджуючої рідини	2.5 л
Час виходу на режим	5 хв.
Час безперервної роботи (при наявності охолоджуючої рідини)	необмежений
Вага, не більше	1.8 кг
Габарити	220×200×160 мм

Для більшості споживачів потрібна стабільна стандартна напруга, найчастіше – 5 В постійного струму, що використовується у зарядних пристроях і повербанках. Стабілізацію забезпечує електронний блок на основі підвищувально-понижуючого перетворювача, який працює лише в заданому діапазоні вхідних напруг. На початку роботи ТЕГ температурний перепад між гарячим і холодним теплообмінниками малий,

вуглекислим газом. За фронтом горіння залишається шар розпеченого біовугілля, в якому відбувається термічний розпад (крекінг) смол. За рахунок подачі вторинного повітря біовугілля допалюється до золи.

Для підвищення ефективності пальника вторинне повітря підігрівається, проходячи скрізь зазор між стінкою камери горіння й зовнішнім корпусом печі.

Регулювання потужності печі здійснюється шляхом контролю розходу повітря з допомогою шибера і засувки. Коефіцієнт надлишку повітря для повної газифікації не перевищує 0.30 – 0.50. Завдяки зменшенню обсягу димових газів суттєво підвищується ефективність пальника як джерела теплової енергії. Передача теплового потоку від пальника до термоелектричного генератора може здійснюватися теплопровідністю від поверхні нагріву, що складається з чавунних кілець, або конвекцією від продуктів горіння шляхом розміщення поверхні нагріву ТЕГ безпосередньо в камері згорання чи на вході в димар.

Умови узгодження параметрів ТЕГ та пальника

Для забезпечення максимальної електричної потужності μ СНР необхідно створити умови, за яких перепад температур на термоелектричних модулях досягатиме максимально можливого значення. Теоретично допустимий перепад температур визначається різницею між максимально допустимою робочою температурою гарячої сторони термоелектричних модулів $T_p = 300^\circ\text{C}$ та температурою кипіння охолоджувальної рідини $t_w = 100^\circ\text{C}$:

$$\Delta T_t = T_p - t_w = 200^\circ\text{C} \quad (1)$$

Необхідна для створення такого перепаду густина теплового потоку в першому наближенні може бути оцінена за законом теплопровідності Фур'є:

$$q_0 = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{h}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності термоелектричного матеріалу; h – висота (товщина) термоелементів.

Виходячи з характеристик модулів типу АЛТЕК-1061, номінальну густину теплового потоку можна оцінити як $q_0 \approx 9 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$. Що відповідає загальному тепловому потоку через модуль близько $Q \approx 250 \text{ Вт}$. При проходженні цього теплового потоку через систему на її складових виникають перепади температур, пропорційні відповідним термічним опорам. Отже, термічну модель μ СНР можна розглядати як послідовне з'єднання трьох опорів: термічного опору ділянки нагріву R_{th} , термічного опору термоелектричних модулів R_{tm} і термічного опору системи охолодження R_{tx} . Тобто сумарний термічний опір системи:

$$R_t = R_{th} + R_{tm} + R_{tx}, \quad (3)$$

де $R_t = (t_h - t_w) / Q$.

Останній вираз накладає обмеження на термічні опори систем нагріву та охолодження, оскільки інші складові відомі з постановки задачі. Зважаючи на те, що температура продуктів горіння значно перевищує робочу температуру ТЕГ ($t_h > T_p$), це перевищення необхідно компенсувати за рахунок термічного опору ділянки нагріву R_{th} . Перепад температур на термічному опорі системи охолодження R_{tx} необхідно мінімізувати, оскільки він зменшує корисний «температурний напір» $\Delta T_0 = T_h - T_c$.

Задача оптимізації параметрів ТЕГ в подібних умовах розглядалась в роботах [8 – 12], і для конкретизації режимів роботи потребує визначення теплофізичних параметрів системи. З цією метою було проведено експериментальне дослідження характеристик μ СНР в складі універсального термоелектричного генератора та піролізної печі ППІ-8.

Програма та методика проведення випробувань.

Програма випробувань передбачає моніторинг параметрів дослідного зразка μ СНР протягом повного робочого циклу пальника, що дає можливість визначити залежності його електричної та теплової потужності від теплового режиму роботи пальника.

Теплова потужність пальника визначається за наступною методикою:

- Загальний обсяг теплової енергії Q_o , що виділяється за робочий цикл, визначається масою палива G та його нижчою теплотворною здатністю Q_n . Для випадку, що розглядається: $G = 10$ кг, $Q_n = 4$ кВт·години/кг; $Q_o = 40$ кВт·годин;
- Миттєва теплова потужність пальника оцінюється через добуток миттєвої температури продуктів горіння t_a на температурний коефіцієнт K_τ , який визначається як

$$K_\tau = \frac{Q_o}{t_a \cdot \tau_o} \left(\frac{\text{кВт} \cdot \text{год.}}{\text{К}} \right); \quad (4)$$

- ККД пальника η_t визначається як відношення корисної теплоти Q_u до загального тепловиділення:

$$\eta_t = \frac{Q_u}{Q_o} = \frac{(Q_o - Q_d)}{Q_o}, \quad (5)$$

де $Q_d = K_\tau \cdot t_d$ – втрати теплоти з димовими газами.

Тепловий ККД пальника можна записати через вимірювані температури у вигляді:

$$\eta_t = 1 - \frac{t_d}{t_h}. \quad (6)$$

Електрична потужність генератора визначається як:

$$N = E^2 \frac{m}{(m+1)^2}, \quad (7)$$

де E – ЕРС генератора; $m = R_L/R$ – коефіцієнт навантаження; R – внутрішній опір ТЕГ; R_L – електричний опір корисного навантаження.

Оптимальне значення m залежить від умов теплообміну. У першому наближенні можна прийняти $m_{opt} \approx 1.2$. В свою чергу, ЕРС визначається перепадом температур на термоелементах

$$E = e(T_h - T_c)n_i, \quad (8)$$

де e – коефіцієнт термоЕРС; T_h і T_c – температури спаїв термоелементів; n_i – кількість послідовно з'єднаних термоелементів. Властивості термоелектричних матеріалів суттєво залежать від температури. Тому у розрахунках використовувалися їхні середні значення в поточному температурному інтервалі. Необхідні для розрахунків температурні залежності властивостей термоелектричних матеріалів визначались як:

$$\begin{aligned} \text{Коефіцієнт теплопровідності} & \quad \lambda = 0.0035 \exp(0.01t); \\ \text{Коефіцієнт електропровідності} & \quad \sigma = 12.5 \exp(0.0254t); \\ \text{Коефіцієнт термоЕРС} & \quad e = 4.5 \cdot 10^{-4} - 13.5 \cdot 10^{-7}t; \end{aligned}$$

де t – абсолютна робоча температура, яка визначається як середня між вимірними температурами теплообмінних поверхонь: $t = (t_1 + t_2)/2 + 273$. Через наявність додаткових термічних опорів між теплообмінними поверхнями та спаями термоелементів виникають втрати температурного напору, які можна оцінити вирахувавши робочий перепад температур $\Delta T = T_h - T_c$ через ЕРС перетворювача і його властивості:

$$\Delta T = \frac{E}{e \cdot n_i} \quad (9)$$

Ці значення перепаду температур дозволяє оцінити реальну густину теплового потоку через перетворювач як

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{h} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right). \quad (10)$$

Загальний тепловий потік через перетворювач дорівнює

$$Q = q \cdot s \cdot n_i, \quad (11)$$

де s – площа перерізу термоелемента. Ці дані дозволяють оцінити термічний опір між джерелом та стоком теплоти і термоелектричним перетворювачем.

Результати експериментальних досліджень

В ході досліджень протягом робочого циклу пального здійснювались вимірювання наступних параметрів:

- температури газів в камері горіння t_h ;
- температури димових газів t_d ;
- температури гарячої теплообмінної пластини t_1 ;
- температури холодної теплообмінної пластини t_2 ;
- температури води t_w ;
- ЕРС термоелектричного перетворювача E

Дані вимірювань протоколювались комп'ютером з інтервалом часу 5 сек.

У результаті отримано масиви даних розподілу температур у $\mu\text{СНР}$ та відповідні значення ЕРС і потужності генератора (рис. 3, рис. 4). Під час експерименту

здійснювалося регулювання режиму горіння шляхом зміни гідравлічного опору газового тракту за допомогою шибера на димовій трубі та засувки у штуцері подачі первинного повітря. Моментам регулювання відповідають пікові значення на графіках температур. На завершальному етапі циклу (після 95 та 110 хвилин) контактний підвід теплоти було замінено на обігрів ТЕГ відкритим потоком продуктів горіння шляхом прибирання центральних кілець на кришці пального. За рахунок більш інтенсивного теплообміну це призвело до збільшення теплового потоку і помітного підвищення робочої температури термоелектричного перетворювача.

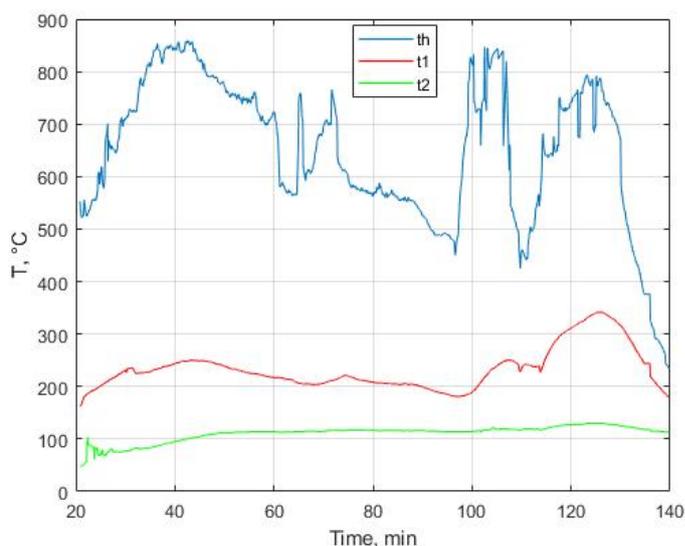


Рис. 3. Розподіл параметрів протягом робочого циклу пального

Відповідну кореляцію між даними видно на графіках розподілу температур, ЕРС та потужності генератора.

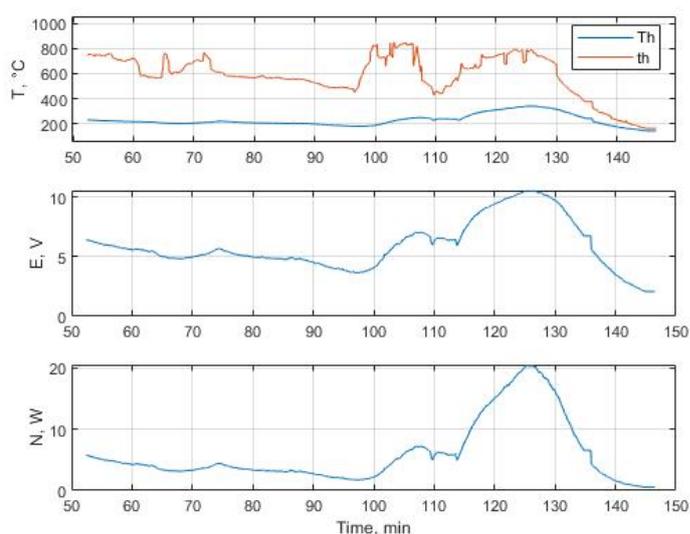


Рис. 4. Розподіл температур t_h , T_h , ЕРС E та потужності генератора N

Потужність генератора монотонно зростає зі збільшенням температури гарячої сторони перетворювача і при $T_h > 300^\circ\text{C}$ сягає 20 Вт (рис. 4).

Визначальним фактором для потужності ТЕГ є робочий перепад температур на термоелементах. Проте вимірний перепад температур дещо завищений: між теплообмінними поверхнями та спаями існують додаткові термічні опори. Актуальне значення перепаду можна визначити за формулою (9). Похибка в цьому разі визначається лише точністю використаних температурних залежностей властивостей матеріалу.

Аналіз показує, що співвідношення розрахованого та виміряного перепадів температур становить приблизно $\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx 0.75$, тобто близько 25 % перепаду втрачається на контактних термічних опорах.

Тепловий потік через термоелектричний генератор визначається за рівнянням (7). Розподіл теплового потоку під час експерименту наведено на рис. 5, а розподіл термічних опорів та перепадів температур між складовими системи – на рис. 6.

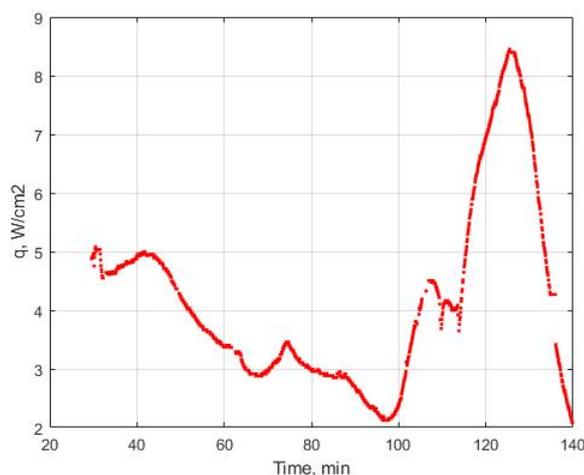


Рис. 5. Питома густина теплового потоку крізь ТЕГ

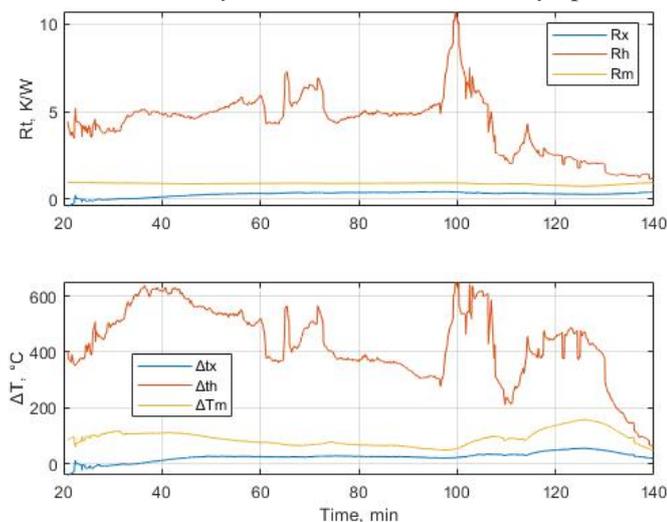


Рис. 6. Розподіл термічних опорів та перепадів температур на складових μСНР.

R_x – система охолодження; R_h – система нагріву; R_m – термоелектричний перетворювач

З наведених даних видно, що в тепловій схемі μСНР домінує термічний опір системи нагріву R_h , який компенсує більшу частину температурного напору ΔT_h й

обмежує тепловий потік Q . Після інтенсифікації теплообміну R_h суттєво зменшується, що забезпечує збільшення теплового потоку та вихід генератора на температурний режим, близький до розрахункового: робочий перепад температур на термоелементах становить близько 160°C (близько 80 % від максимального).

Тривалість циклу становила 2.44 год, що удвічі менше нормативної для пальника ПП-8 завдяки регулюванню температурного режиму. Відповідно, потужність пальника суттєво зросла. За даними рис. 3 середня температура продуктів горіння становить $t_a \approx 550^\circ\text{C}$. Згідно з (4) температурний коефіцієнт потужності пальника дорівнює:

$$K_\tau = \frac{40}{2.44 \cdot 550} = 0.0298 \frac{\text{кВт}}{^\circ\text{C}}. \quad (12)$$

Середня за цикл миттєва потужність пальника склала $Q_\tau = 16.4$ кВт.

Інформація про авторів

Лобунець Ю.М. – Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України

Ключ В.П. – Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України

Четверик Г.О. – Кандидат технічних наук, завідуючий відділом № 6 відновлюваних органічних енергоносіїв Інституту відновлюваної енергетики НАН України

Розвер Ю.Ю. – Науковий співробітник Інституту термоелектрики НАН та МОН України, асистент кафедри термоелектрики та медичної фізики ЧНУ ім. Ю.Федьковича

Гаврилюк М.В. – Науковий співробітник Інституту термоелектрики НАН та МОН України, асистент кафедри термоелектрики та медичної фізики ЧНУ ім. Ю.Федьковича

Константинович І.А. – Кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри термоелектрики та медичної фізики ЧНУ ім. Ю.Федьковича, старший науковий співробітник Інституту термоелектрики НАН та МОН України

Література

1. Salah W.A., Abuhelwa M. (2020). Review of thermoelectric cooling devices recent applications. *J Eng Sci Technol* 15(1), 455–76.
2. Dunham M.T., Barako M.T., LeBlanc S., Asheghi-Roudheni M., Chen B., Goodson K. (2013). Modeling and optimization of small thermoelectric generators for low-power electronics. In *Proceedings of the ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. Volume 1*: Burlingame, California, USA. July 16–18, 2013.
3. Scott A., Whalen C.A., Apblett T.L. (2008). Improving power density and efficiency of miniature radioisotopic thermoelectric generators, *J Power Sources*, 180, 657-663.
4. Qian Xu, Biao Deng, Lenan Zhang, Shaoting Lin, et al. (2022). High-performance, flexible thermoelectric generator based on bulk materials, *Cell Reports Physical Science*, 3(3),

- 100780.
5. Vikhor L., Kotsur M. (2023). Evaluation of efficiency for miniscale thermoelectric converter under the influence of electrical and thermal resistance of contacts. *Energies*, 16, 4082.
 6. Anatyshuk, L., Lysko, V., Konstantynovych, I., & Havryliuk, M. (2024). Universal thermoelectric generator with heat removal by water tanks. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 74–85. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-3-74-85>
 7. Lysko, V., Konstantynovych, I., Havryliuk, M., & Rusnak, O. (2024). Experimental studies on the parameters of thermoelectric generator energy converters with different height of legs. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 50–60. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-4-50-60>.
 8. Ioffe A.F. (1957). *Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling*; Infosearch Limited: London, UK, 184 pp.
 9. Anatyshuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Volume 2. Thermoelectric energy converters*. Institute of Thermoelectricity: Chernivtsi, Ukraine, 348 pp.
 10. Anatyshuk L.I. and Vikhor L.N. (2012). *Thermoelectricity. Volume IV. Functionally graded thermoelectric materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine, 172 pp.
 11. Lysko V., Konstantynovych I., Kuz R., & Derevianko T. (2024). Possibilities of reducing the specific cost of thermoelectric generator energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 44–52. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2024-3-44-52>.
 12. He H., Wu Y., Liu W., Rong M., Fang Z., Tang X. (2019). Comprehensive modeling for geometric optimization of a thermoelectric generator module. *Energy Convers. Manag.* 183, 645–659.

Submitted: 05.12.25

Yu.M. Lobunets¹ (<https://orcid.org/0000-0002-3593-1687>),
V.P. Klius¹ (<https://orcid.org/0000-0001-8536-3211>),
G.O. Chetveryk¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>),
Yu.Yu. Rozver^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0002-4830-2206>),
M.V. Havryliuk^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0003-3207-2917>),
I.A. Konstantynovych^{2,3} (<https://orcid.org/0000-0001-6254-6904>)

¹Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine;

²Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

³Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

Combined Source of Thermal and Electrical Energy Based on a Pyrolysis Burner and a Universal Thermoelectric Generator

The results of tests of a combined heat and power generation system consisting of a PP-8 pyrolysis burner and a universal thermoelectric generator are presented. The thermophysical characteristics of the system in different burner operating modes are investigated, and the conditions for matching the thermal parameters of the burner and the thermoelectric module are determined. The effect of heat exchange intensification on the operating temperature difference and the output electrical power of the TEG is analyzed. It is shown that by optimizing the combustion modes and design conditions for supplying heat flow, it is possible to ensure stable operation of the generator with an electric power of up to 200 W. Brief technical characteristics of the universal thermoelectric generator and pyrolysis burner PP-8 are given.

Keywords: thermoelectric converter, thermoelectric module, energy efficiency, optimal control methods, contact resistance, thermal resistance, interconnect and isolating plates.

Надійшла до редакції 05.12.25