

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА
ВІДПРАЦЬОВАНОГО ВИТЯЖНОГО ПОВІТРЯ З КАМЕР ЗГОРЯННЯ
ШЛЯХОМ КОНВЕРСІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ**

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

О. І. Ковальчук, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: orest.kovalchuk@nubip.edu.ua

Анотація. Стаття присвячена вирішенню актуальної задачі підвищення енергоефективності теплових процесів шляхом впровадження новітньої технології з використанням термоелектричних модулів як альтернативного джерела електроенергії, що використовує відхідне тепло. Метою дослідження є розробка та експериментальна перевірка працездатності автономної системи рекуперації теплових втрат із камери згоряння вуглеводнево-водяних сумішей на основі термоелектричних генераторів. Експериментальна установка включала комерційний модуль TEC1-12715, який при температурному градієнті ≈ 40 °C (141 °C / 101 °C) генерував напругу $1,56$ В і струм $\approx 0,32$ А, що відповідає потужності $\approx 0,49$ Вт. Для підвищення напруги застосовувався DC-DC перетворювач (2 В \rightarrow 24 В). Практичну придатність системи перевірено на прикладі живлення малопотужного електричного навантаження. Оцінка температурного поля під час експериментального дослідження проводилась з використанням тепловізійних вимірювань і безконтактного термометра. Була розроблена тривимірна модель десяти пар елементів P/N-Туре, яка враховує теплопровідність та термоелектричні ефекти. Для оцінки ефективності роботи модуля проведено чисельне моделювання в COMSOL Multiphysics, де створено тривимірну модель елемента з 10 термопар. За аналогічних температурних умов вона забезпечила вихідну напругу $0,144$ В. Екстраполяція на повний модуль із 127 парами дало теоретичне значення $\approx 1,83$ В, що приблизно на 14,7 % вище за експериментальні результати. Розбіжність пояснюється тепловими втратами та ідеалізованими умовами моделювання. Отримані результати підтверджують потенціал ТЕГ для утилізації низькопотенційного тепла й живлення допоміжних пристроїв у автономних енергосистемах. Перспективи подальшого розвитку системи передбачають використання матеріалів із вищим коефіцієнтом Зеєбека; вдосконалення системи охолодження, зокрема із застосуванням CFD-аналізу; реалізацію буферного накопичення енергії для імпульсного живлення навантажень.

Ключові слова: термоелектричні генератори, рекуперація тепла, утилізація теплових втрат, водо-вуглеводневі суміші, підвищувальний перетворювач, камера згоряння, програмне середовище COMSOL Multiphysics, градієнт температури

Актуальність. Втрати теплової енергії у процесах згоряння залишаються суттєвою проблемою в контексті підвищення енергоефективності. У системах, що використовують вуглеводнево-водяні суміші як паливо, ці втрати можуть досягати понад 60 %, зокрема через необхідність випаровування водяної фази. Одним із перспективних підходів до часткового відновлення цієї енергії є використання термоелектричних генераторів (ТЕГ), які дозволяють безпосередньо перетворювати тепловий потік у електричну енергію без рухомих частин [1]. Сучасні дослідження демонструють ефективність ТЕГ у транспортних, промислових і енергетичних застосуваннях — від утилізації вихлопного тепла двигунів внутрішнього згоряння до живлення автономних сенсорів [2]. Інтеграція ТЕГ у допоміжні енергосистеми дозволяє зменшити навантаження на основні джерела живлення та забезпечити базову автономність пристроїв у важкодоступних умовах. У контексті камер згоряння з водяним охолодженням, зокрема з використанням водяного туману, питання рекуперації низькопотенційного тепла набуває особливої актуальності через високий температурний перепад між корпусом і навколишнім середовищем, який є сприятливим для роботи ТЕГ [3, 4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ряд робіт демонструє, що інтеграція ТЕГ у морські [5] та наземні енергосистеми дозволяє досягти суттєвої автономності живлення бортових приладів, зменшуючи залежність від основного джерела енергії. Наприклад, у [5] розроблено компактний ТЕГ для дизельного суднового двигуна з ефективним тепловідводом. У [6] запропоновано підхід до масштабування ТЕГ для великих промислових систем з використанням недорогих екологічних матеріалів, що є перспективним напрямом для зниження вартості. Інші дослідження зосереджені на оцінці ефективності застосування ТЕГ у холодильних системах і сонячних установках [7, 8]. У [8] наведено огляд інноваційних конструкцій ТЕГ, що використовують пасивне охолодження (зокрема випромінювальне та радіаційне) для підвищення різниці температур, а отже й продуктивності. Крім того, у [9] проведено детальну оптимізацію конструкції теплообмінників з урахуванням локального теплового потоку, що дозволяє досягти

покращеної конверсії в умовах змінних навантажень. Усі перелічені дослідження демонструють перспективність ТЕГ для утилізації низькопотенційного тепла.

У цьому дослідженні реалізовано підхід до використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) на базі доступних комерційних модулів TEC1-12715 у поєднанні з DC-DC перетворювачем для живлення малопотужного електричного споживача в системі рекуперації тепла. Такий підхід розглядається як потенційне рішення для часткової енергонезалежності допоміжних компонентів у камерах згоряння, що працюють із вуглеводнево-водяними сумішами та системами охолодження. Його можна вважати новим у контексті практичного застосування ТЕГ для утилізації низькопотенційного тепла в подібних умовах.

Мета дослідження – розробка та експериментальна перевірка працездатності автономної системи рекуперації теплових втрат із камери згоряння вуглеводнево-водяних сумішей на основі термоелектричних генераторів (ТЕГ). Особливу увагу приділено оцінці можливості живлення малопотужного електричного навантаження за рахунок енергії, отриманої з відпрацьованого тепла, із використанням підвищувального DC-DC перетворювача. Також передбачено чисельне моделювання електротермічних процесів у середовищі COMSOL Multiphysics з метою перевірки відповідності експериментальних результатів теоретичним прогнозам і виявлення напрямів подальшої оптимізації системи та узгодженості з експериментальними результатами.

Матеріали та методи дослідження. Експериментальна установка для досліджень конверсії тепла відпрацьованого витяжного повітря в електричну енергію представлена на рис.1. Експериментальна установка включає камеру згоряння циліндричної форми, виготовлену з жаростійкої феромагнітної нержавіючої сталі марки AISI 304. У камері відбувається спалювання пропан-повітряної суміші з додаванням водяного туману. Запалювання паливної суміші здійснюється за допомогою електричного розряду [10].



Рис. 1. Експериментальна установка для досліджень конверсії тепла відпрацьованого витяжного повітря в електричну енергію:

1 – камера згоряння; 2 – магістраль подавання повітря; 3 – магістраль подавання газоподібного палива; 4 – генератор водяного туману; 5 – генератор висиковольтних високочастотних імпульсів; 6 – термоелектричний модуль

Водяний туман створюється ультразвуковими генераторами та примусовою подачею повітря у палик, де він рівномірно розподіляється в паливно-повітряній суміші по тангенціальній траєкторії. Додавання води до процесу згоряння має такі основні цілі: формування активного окиснювача та гомогенної пальної повітряно - вуглеводнево-водної суміші за рахунок імпульсних полів електромагнітної природи; зниження пікової температури полум'я; зменшення утворення оксидів азоту (NO_x); покращення умов тепловіддачі на поверхню камери [11, 12].

На зовнішню поверхню камери встановлено термоелектричний модуль типу ТЕС1-12715 (розміри $40 \times 40 \times 3,2$ мм, 127 термопар, максимальний перепад температур ΔT до 60 °С). Гаряча сторона модуля спрямована до корпусу камери, а для покращення теплопередачі між поверхнею камери та модулями використано термопрокладки. Холодна сторона термоелектричних модулів охолоджується за допомогою алюмінієвих радіаторів з примусовим вентиляторним охолодженням для запобігання перегріву елементів. Це дозволяє підтримувати стабільну температуру сторони що охолоджується на рівні ~ 101 °С навіть під час тривалого експерименту. Температурний градієнт між гарячою та холодною сторонами модулів у цій

конфігурації сягає близько 40 °С. Для моніторингу температури в камері згорання застосовуються термопари типу К з похибкою $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а вимірювання температури на поверхні камери та термоелемента проводилося за допомогою пірометра з термопарою К-типу 13:1 (-50...+500 °С) FLUS IR-820 та інфрачервоної тепловізійної камери НТ-18. Генерована термоелектричним модулем напруга фіксувалася високоточним цифровим мультиметром UNI-T UT117C True RMS.

Для аналізу роботи термоелектричного модуля використано програмне середовище COMSOL Multiphysics [13]. Була розроблена тривимірна модель десяти пар елементів P/N-Туре, яка враховує теплопровідність та термоелектричні ефекти. Матеріалами термоелектричної ніжки є телурид вісмуту Bi_2Te_3 [11] як основа елемента та контакти виконані з міді (Copper). Граничні умови температури гарячої сторони $T_{hot} = 141$ [degC], та сторони охолодження $T_{cold} = 101$ [degC]) задавалися на основі експериментальних даних. Математична модель термоелектричного модуля складається з таких рівнянь:

$$P = ST \quad (1)$$

де P – коефіцієнт термо-ЕРС, В; S – коефіцієнт Зеєбека, В/К; T – температура, К;

$$J_e = -\sigma S \nabla T \quad (2)$$

де J_e – густина термоелектричного струму, А/м²; σ – електрична провідність матеріалу, См/м; ∇T – градієнт температури [К/м]. Описує струм, викликаний градієнтом температури, рівняння:

$$q = -k \nabla T \quad (3)$$

де q – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К). Описує теплопровідність у твердих тілах залежність:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); $u \cdot \nabla T$ – конвективне перенесення тепла; $\nabla \cdot q$ – дивергенція теплового потоку; Q – об'ємна густина джерел тепла, Вт/м³; Q_{ted} – додаткові джерела тепла.

На рис. 2. зображена сітка кінцевих елементів моделі.

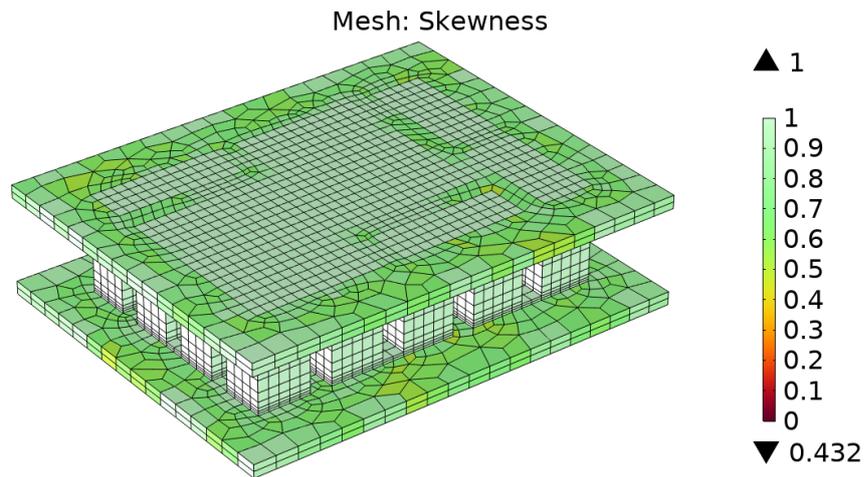


Рис. 2. Сітка кінцевих елементів моделі

Для розрахунків була застосована тривимірна сітка із середньою якістю елементів 0,9482, що забезпечує коректність розрахунків теплового розподілу.

Результати досліджень та їх обговорення. У ході експериментальних досліджень підтверджено працездатність системи рекуперації теплових втрат із використанням модуля TEC1-12715. За результатами тепловізійних вимірювань (рис. 3) при створеному температурному градієнті $\approx 40^\circ\text{C}$ (141°C на гарячій стороні та 101°C на стороні що охолоджується), модуль забезпечив вихідну напругу $\sim 1,56\text{ В}$, струм $\sim 0,32\text{ А}$ і електричну потужність $\sim 0,49\text{ Вт}$. Хоча цього значення недостатньо для живлення високоспоживчих пристроїв, його можна використовувати для малопотужних компонентів або в комбінації з буферним накопиченням енергії. Для забезпечення вищих напруг і струмів запропоновано конфігурацію з чотирьох ТЕГ-модулів, з'єднаних за комбінованою схемою: дві послідовні пари, з'єднані паралельно. Така архітектура дозволяє масштабувати систему для живлення споживачів через DC-DC перетворювач (вхід: $2\text{ В} \rightarrow$ вихід: 24 В , ККД $\approx 85\%$). Також розглянуто альтернативні варіанти, зокрема накопичення енергії у суперконденсаторі або акумуляторі з імпульсною подачею, використання споживачів з нижчою потужністю або комбіноване живлення із зовнішнім джерелом.

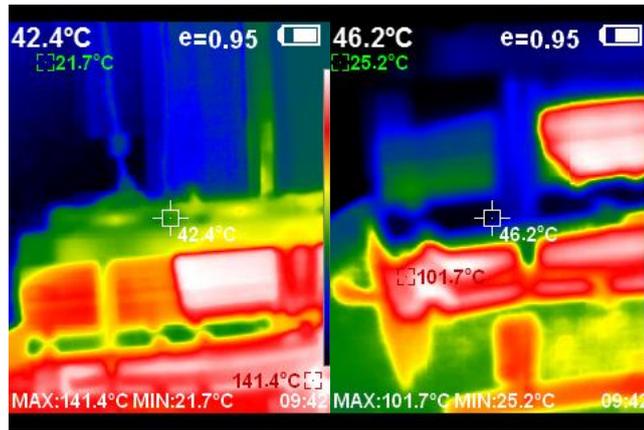


Рис. 3. Тепловізійні виміри під час експериментального дослідження

Для чисельного аналізу створено 3D-модель у COMSOL Multiphysics, що включала 10 пар термоелементів. За аналогічного температурного градієнта модель показала вихідну напругу 0,144 В (рис. 4), яка після екстраполяції на повний модуль із 127 парами склала $\approx 1,83$ В. Це значення на $\approx 14,7$ % вище, ніж експериментально зафіксоване. Така розбіжність пояснюється ідеалізованими умовами моделювання, зокрема, відсутністю контактної опору, втрат тепла та рівномірним розподілом температури в моделі.

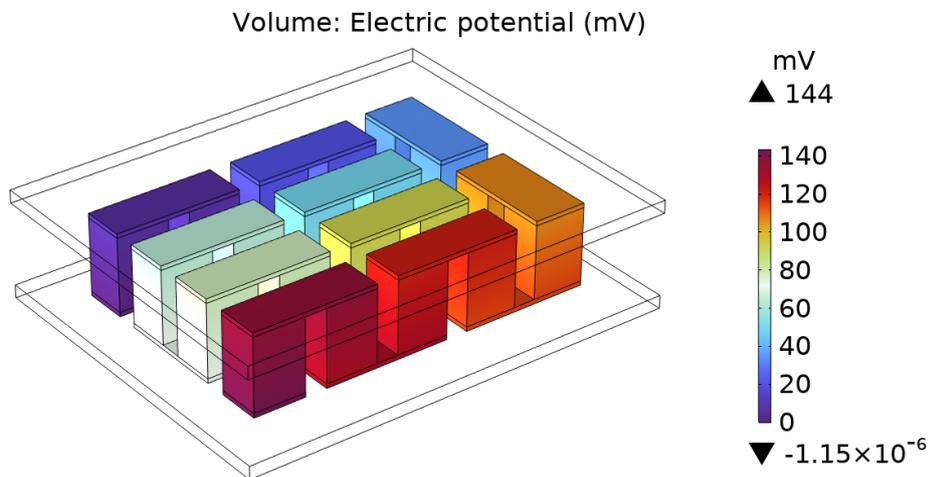


Рис. 4. Електричний потенціал

Результати моделювання (10 пар) та експериментальних вимірювань (4 модулі по 127 пар) порівняно в таблиці.

1. Порівняльна таблиця

Параметри	COMSOL (10 пар)	Екстрап. (127 пар)	Експеримент (127 пар)
Вихідна напруга	~ 0.144 В	~ 1.82 В	~ 1.56 В

Отримані результати свідчать про реалістичність використання ТЕГ у подібних умовах, водночас підкреслюючи важливість подальшої оптимізації — зокрема зменшення теплових втрат, покращення теплового контакту, ефективнішого охолодження та застосування CFD-аналізу для уточнення геометрії теплообмінника.

Висновки і перспективи. У цьому дослідженні було розроблено та експериментально перевірено автономну систему рекуперації теплових втрат із камери згоряння вуглеводнево-водяних сумішей на основі термоелектричних генераторів. При температурному градієнті близько 40 °С комерційний модуль TEC1-12715 продемонстрував вихідну напругу ~1,56 В, струм ~0,32 А та потужність ~0,49 Вт. Моделювання у COMSOL Multiphysics дало екстрапольовану оцінку ~1,83 В, що на $\approx 14,7\%$ вище за експеримент і пояснюється ідеалізованими умовами чисельного розрахунку. Хоча потужності одного модуля недостатньо для живлення енергомістких пристроїв, результати показали, що система може забезпечити живлення малопотужного навантаження або працювати в складі масштабованої конфігурації. Запропонована комбінована схема підключення з чотирьох модулів дозволяє досягати вищих показників напруги та струму з можливістю використання підвищувального DC-DC перетворювача. Перспективи подальшого розвитку системи включають: використання матеріалів із вищим коефіцієнтом Зеебека; оптимізацію геометрії теплообмінників і контактних поверхонь; вдосконалення системи охолодження, зокрема із застосуванням CFD-аналізу; реалізацію буферного накопичення енергії для імпульсного живлення навантажень. Система ТЕГ підтвердила свою ефективність у перетворенні частини низькопотенційного тепла в електроенергію та має потенціал для застосування в автономних енергетичних рішеннях.

Список використаних джерел

1. A 7.5-mV Input and 88%-Efficiency Single-Inductor Boost Converter with Self-Startup and MPPT for Thermoelectric Energy Harvesting / C. Wu et al. *Micromachines*.

2022. Vol. 14, no. 1. P. 60. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14010060> (дата звернення: 24.04.2025).

2. Heber L., Schwab J., Knobelspies T. 3 kW Thermoelectric Generator for Natural Gas-Powered Heavy-Duty Vehicles–Holistic Development, Optimization and Validation. *Energies*. 2021. Vol. 15, no. 1. P. 15. URL: <https://doi.org/10.3390/en15010015> (дата звернення: 24.04.2025).

3. Raut P., Vohra M. Experimental investigation and comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with automotive waste heat recovery module. *Materials Today: Proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.227> (дата звернення: 24.04.2025).

4. Thermoelectric Generator with Passive Biphasic Thermosyphon Heat Exchanger for Waste Heat Recovery: Design and Experimentation / M. Araiz et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5815. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185815> (дата звернення: 24.04.2025).

5. Konstantinou G., Kyratsi T., Louca L. S. Design of a Thermoelectric Device for Power Generation through Waste Heat Recovery from Marine Internal Combustion Engines. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 11. P. 4075. URL: <https://doi.org/10.3390/en15114075> (дата звернення: 24.04.2025).

6. Analysis and Design of a Silicide-Tetrahedrite Thermoelectric Generator Concept Suitable for Large-Scale Industrial Waste Heat Recovery / F. P. Brito et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5655. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185655> (дата звернення: 24.04.2025).

7. Performance Assessment of Using Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery from Vapor Compression Refrigeration Systems / A. Attar et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 23. P. 8192. URL: <https://doi.org/10.3390/en14238192> (дата звернення: 24.04.2025).

8. Wang J., Lu L., Jiao K. Solar- and/or Radiative Cooling-Driven Thermoelectric Generators: A Critical Review. *Energy Engineering*. 2024. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.051051> (дата звернення: 24.04.2025).

9. Yazawa K., Shakouri A. Heat Flux Based Optimization of Combined Heat and Power Thermoelectric Heat Exchanger. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 22. P. 7791. URL: <https://doi.org/10.3390/en14227791> (дата звернення: 24.04.2025).

10. Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes / N. Zablodskiy et al. *2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024. 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556> (дата звернення: 24.04.2025).

11. Спосіб багатостримерного імпульсно-розрядового супроводження горіння стехіометрично збідненої пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші: пат. на винахід № 125775 Україна: МПК H05H 1/24 (2006.01), C10K 3/06: заявл. 05.11.2020; опубл. 01.06.2022, Бюл. № 22. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=1&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125775 (дата звернення: 28.04.2025).

12. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*. 2018. Vol. 212. P. 173–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.033> (дата звернення: 24.04.2025).

13. COMSOL Multiphysics ® Reference Manual [Електронний ресурс] URL: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf

References

1. Wu, C., Zhang, J., Zhang, Y., & Zeng, Y. (2022). A 7.5-mV Input and 88%-Efficiency Single-Inductor Boost Converter with Self-Startup and MPPT for Thermoelectric Energy Harvesting. *Micromachines*, 14(1), 60. <https://doi.org/10.3390/mi14010060>

2. Heber, L., Schwab, J., & Knobelspies, T. (2021). 3 kW Thermoelectric Generator for Natural Gas-Powered Heavy-Duty Vehicles—Holistic Development, Optimization and Validation. *Energies*, 15(1), 15. <https://doi.org/10.3390/en15010015>

3. Raut, P., & Vohra, M. (2021). Experimental investigation and comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with automotive waste heat recovery module. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.227>

4. Araiz, M., Casi, Á., Catalán, L., Aranguren, P., & Astrain, D. (2021). Thermoelectric Generator with Passive Biphasic Thermosyphon Heat Exchanger for Waste Heat Recovery: Design and Experimentation. *Energies*, 14(18), 5815. <https://doi.org/10.3390/en14185815>

5. Konstantinou, G., Kyratsi, T., & Louca, L. S. (2022). Design of a Thermoelectric Device for Power Generation through Waste Heat Recovery from Marine Internal Combustion Engines. *Energies*, 15(11), 4075. <https://doi.org/10.3390/en15114075>

6. Brito, F. P., Peixoto, J. S., Martins, J., Gonçalves, A. P., Louca, L., Vlachos, N., & Kyratsi, T. (2021). Analysis and Design of a Silicide-Tetrahedrite Thermoelectric Generator Concept Suitable for Large-Scale Industrial Waste Heat Recovery. *Energies*, 14(18), 5655. <https://doi.org/10.3390/en14185655>

7. Attar, A., Rady, M., Abuhabaya, A., Albatati, F., Hegab, A., & Almatrafi, E. (2021). Performance Assessment of Using Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery from Vapor Compression Refrigeration Systems. *Energies*, 14(23), 8192. <https://doi.org/10.3390/en14238192>

8. Wang, J., Lu, L., & Jiao, K. (2024). Solar- and/or Radiative Cooling-Driven Thermoelectric Generators: A Critical Review. *Energy Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.32604/ee.2024.051051>

9. Yazawa, K., & Shakouri, A. (2021). Heat Flux Based Optimization of Combined Heat and Power Thermoelectric Heat Exchanger. *Energies*, 14(22), 7791. <https://doi.org/10.3390/en14227791>

10. Zablodskiy, N., Kovalchuk, O., Kovalchuk, S., & Nasieka, I. (2024). Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes. In *2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556>

11. Zablodsky M.M., Andrievsky A.P. (2022). Method of multi-streamer pulse-discharge support of combustion of stoichiometrically depleted combustible air-water-hydrocarbon-gas mixture. Patent of Ukraine for invention No. 125775. MPK H05H 1/24 (2006.01), C10K3/06 (2006.01) 05.11.2020, publ. 01.06.2022, bull. No. 22. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=1&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=125775 (access date: 04/28/2025).

12. Farokhipour, A., Hamidpour, E., & Amani, E. (2018). A numerical study of NO_x reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 212, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.033>

13. COMSOL Multiphysics ® Reference Manual [Електронний ресурс] URL: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf

INCREASING THE EFFICIENCY OF HEAT UTILIZATION OF EXHAUST AIR FROM COMBUSTION CHAMBERS BY CONVERSION INTO ELECTRICAL ENERGY

M. Zablodskyi, O. Kovalchuk

Abstract. *The article is devoted to solving the urgent problem of increasing the energy efficiency of thermal processes by implementing the latest technology using thermoelectric modules as an alternative source of electricity that uses waste heat. The purpose of the study is to develop and experimentally verify the operability of an autonomous system for recovering heat losses from the combustion chamber of hydrocarbon-water mixtures based on thermoelectric generators. The experimental setup included a commercial module TEC1-12715, which at a temperature gradient of $\approx 40^{\circ}\text{C}$ ($141^{\circ}\text{C} / 101^{\circ}\text{C}$) generated a voltage of 1.56V and a current of $\approx 0.32\text{A}$, which corresponds to a power of $\approx 0.49\text{W}$. A DC-DC converter ($2\text{V} \rightarrow 24\text{V}$) was used to increase the voltage. The practical suitability of the system was tested on the example of powering a low-power electrical load. The temperature field was assessed during the experimental study using thermal imaging measurements and a non-contact thermometer. A three-dimensional model of ten pairs of P/N-Type elements was developed, which takes into account thermal conductivity and thermoelectric effects. To assess the efficiency of the module, numerical simulation was performed in COMSOL Multiphysics, where a three-dimensional model of an element with 10 thermocouples was created. Under similar temperature conditions, it provided an output voltage of 0.144V. Extrapolation to a full module with 127 pairs gave a theoretical value of $\approx 1.83\text{V}$, which is $\approx 14.7\%$ higher than the experimental results. The discrepancy is explained by thermal losses and idealized modeling conditions. The results obtained confirm the potential of TEG for utilizing low-potential heat and powering auxiliary devices in autonomous power systems. Prospects for further development of the system include the use of materials with a higher Seebeck coefficient; improvement of the cooling system, in particular with the use of CFD analysis; implementation of buffer energy storage for pulsed power supply of loads.*

Key words: *thermoelectric generators, heat recovery, heat loss utilization, water-hydrocarbon mixtures, boost converter, combustion chamber, COMSOL Multiphysics software environment, temperature gradient*