

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПІРОЛІЗНОГО ПАЛЬНИКА ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГІЇ

Отримано 22 лист. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 лист. 2024 р.
Доступно онлайн 11 груд. 2024 р.

Лобунець Ю. М.¹, Ключ В. П.²,
Четверик Г. О.³, Зур'ян О. В.⁴

Автор для кореспонденції: Четверик Геннадій,
e-mail: biomassa@ukr.net

У сучасних умовах швидко зростає попит на малопотужні джерела електроенергії, що застосовуються для живлення різноманітних приладів у польових умовах – систем зв'язку, передачі даних, управління і таке інше. Тому актуальним є забезпечення виробництва електричної енергії за рахунок використання термоелектричних генераторів. У роботі представлено створений в Інституті відновлюваної енергетики експериментальний стенд, що складається з пальника, на якому монтуються дослідні зразки термоелектричного генератора. На відміну від існуючих прототипів у цій роботі з метою інтенсифікації теплопередачі в системі нагріву передбачається застосування двофазних систем теплообміну (термосифонів і теплових труб). Передача теплового потоку до термоелектричного генератора здійснюється парами теплоносія, які утворюються в парогенераторі, що розташований в зоні камери згоряння. Авторами розроблена методика проведення досліджень та створена автоматизована система вимірювання, що забезпечує 12 каналів вимірювання температур, два канали вимірювання електрорушійної сили термобатарей і канал вимірювання струму й потужності, оснащений електронним навантаженням для зняття вольт-амперних характеристик термоелектричного генератора. Попередні дослідження показали, що за однакових початкових умов розроблений пристрій забезпечує приблизно в 4 рази більший тепловий потік і, відповідно, робочий перепад температур на термоелементах. Мають перспективу подальші дослідження щодо механізмів стабілізації полум'я в пальнику, в яких основна увага приділяється додаванню вторинного повітря в камеру згоряння.

Ключові слова: термоелектричний генератор, пальник, автономна система, теплообмін.

¹ д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-3593-1687>

² канд. техн. наук
<http://orcid.org/0000-0001-8536-3211>

³ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>

⁴ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1, 2, 3, 4} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CHARACTERISTICS OF A PYROLYSIS BURNER FOR A THERMOELECTRIC POWER GENERATOR

Received Nov. 22, 2024; accepted Nov. 27, 2024
Available online Dec. 11, 2024

Lobunets Yu.¹, Klius V.²,
Chetveryk H.³, Zurian O.⁴

Author for correspondence: Chetveryk Hennadiy,
e-mail: biomassa@ukr.net

In today's environment, the demand for low-power electricity sources used to power various devices in the field, such as communication, data transmission, control systems, etc. is growing rapidly. Therefore, it is important to ensure the production of electricity through the use of thermoelectric generators. The paper presents an experimental stand created at the Institute of Renewable Energy, consisting of a burner on which prototypes of a thermoelectric generator are mounted. Unlike the existing prototypes, this work envisages the use

¹ Dr of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-3593-1687>

² Cand. of Tech. Science
<http://orcid.org/0000-0001-8536-3211>

³ Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0001-9398-1968>

⁴ Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1, 2, 3, 4} Institute of Renewable Energy of the
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

of two-phase heat exchange systems (thermosyphons and heat pipes) to intensify heat transfer in the heating system. The heat flow is transferred to the thermoelectric generator by coolant vapours generated in a steam generator located in the combustion chamber area. The authors have developed a research methodology and created an automated measurement system that provides measurement of 12 temperature channels, two channels for measuring the electromotive force of thermobatteries and a channel for measuring current and power, equipped with an electronic load for taking volt-ampere characteristics of the thermoelectric generator. Preliminary studies have shown that under the same initial conditions, the developed device provides approximately 4 times higher heat flux and, accordingly, the operating temperature difference on the thermocouples. Further research on the mechanisms of flame stabilisation in the burner is promising, focusing on the addition of secondary air to the combustion

Key words: thermoelectric generator, burner, autonomous system, heat exchange.

Вступ. У сучасних умовах швидко зростає попит на мало-потужні джерела електроенергії, що застосовуються для живлення різноманітних приладів в польових умовах – систем зв'язку, передачі даних, управління і таке інше. З цією метою використовуються хімічні джерела й акумулятори електроенергії, фотоелектричні, вітрові й термоелектричні генератори. Перевага останніх полягає в тому, що їх застосування дозволяє використати принципи комбінованого виробництва теплової та електричної енергії, тобто одночасно використовувати генератор електроенергії як джерела теплоти для систем опалення [1]. Останнім часом можливість утилізації тепла, що викидається різними теплогенерувальними джерелами, з використанням термоелектричного генератора (ТЕГ) вивчається дуже широко. Так, дослідження [2] спрямоване на розробку 50-ватного термоелектричного генератора для використання низькоякісного тепла в системах охолодження промислових процесів і високоактивних радіоізотопних джерел. У роботі [3] вивчалися можливості оснащення дров'яних печей термоелектричними генераторами. В лабораторних умовах було проведено тести, які показали, що піч за нормальних умов роботи видаватиме приблизно 28 Вт/год. Існує значна кількість досліджень, присвячених термоелектричним матеріалам, роботі різних пристроїв теплообміну, різних конструкціям термоелектричних генераторів (включно з описом правил їх проектування), можливостям поліпшення майбутніх високотемпературних термоелектричних перетворювачів [4, 5]. У роботі [6] представлено невеликий термоелектричний пристрій для генерації енергії, що використовує спалювання. Цей пристрій може застосовуватися у віддалених районах, де важко отримати мережеву електрику, зокрема в промисловості. Є можливість його застосування у військових цілях, а також у країнах, де електрика не є загальнодоступною. Пристрій був розроблений з акцентом на низькій вартості та реалістичному автономному дизайні, що має потенціал для комерціалізації. Пристрій розрахований на безперервну роботу протягом тривалого періоду. Особливу увагу було приділено усуненню механізмів, що рухаються, а саме таких, як насоси й компресори для подачі повітря, для зменшення вартості виробництва та підвищення надійності пристрою. Раніше повідомлялося про різні невеликі генератори енергії, що використовують термоелектрику та спалювання. В роботі [7] автори провели експериментальне досліджен-

ня термоелектричного генератора, де модулі інтегровані в мікрокамеру згоряння. Дослідниками в роботі [8] описано інноваційну розробку та результати випробувань мікрокаталітичного пальника для вироблення електроенергії. Проведено також дослідження щодо використання супердіабатичних пористих каталітичних каталізаторів у термоелектричних генераторах [9]. У роботі [10] повідомляється про використання термоелектрики для утилізації теплових відходів з паливного елемента.

Результати цих досліджень підтверджують перспективність пряму розробки й удосконалення комбінованого генератора теплової та електричної енергії, що працює на будь-якій біомасі.

Попри значну кількість досліджень, присвячених термоелектричним матеріалам, роботі різних пристроїв теплообміну, різних конструкціям термоелектричних генераторів, безпосереднє комплексне застосування пальника та термоелектричного генератора для одночасного генерування теплової та електричної енергії не набуло масового характеру. А саме такі системи мають змогу забезпечувати можливість безперебійного живлення, не потребують спеціальних видів палива, характеризуються невеликою масою й компактними габаритами. В цій роботі для вирішення задачі запропоновано використати пальник, що працює за схемою газифікатора, тобто забезпечує режим піролізного горіння палива. Такий вибір дозволяє забезпечити стійку роботу пристрою, необхідну тривалість робочого циклу між заправками та можливість контролю та регулювання температурних режимів. Регулювання температурного режиму може здійснюватися через зміну потужності джерела за рахунок контрольованої подачі повітря. Наявність проміжного теплоносія й системи регулювання забезпечує можливість стабілізації температурного режиму термоелектричного генератора й захисту його від перегріву.

Постановка завдання. Існуючі прототипи подібних пристроїв базуються на використанні джерел теплової енергії (дров'яні печі або відкритий вогонь), що не піддаються регулюванню й вимагають постійної присутності оператора для підтримки робочих режимів. Для забезпечення стабільних температурних режимів ТЕГ передбачається використати джерело теплової енергії, що працює за схемою газифікатора, тобто забезпечує режим піролізного горіння палива. Крім того, на відміну

від існуючих прототипів у цій роботі з метою інтенсифікації теплопередачі в системі нагріву передбачається застосування двофазних систем теплообміну (термосифонів і теплових труб).

Такий вибір дає змогу забезпечити стійку роботу пристрою, необхідну тривалість робочого циклу між заправками та можливість автоматичного контролю й регулювання температурних режимів, а отже, обумовлює актуальність теми дослідження.

Мета дослідження – розроблення комбінованого генератора теплової та електричної енергії, що працює на будь-якій біомасі.

Методи. У статті використано математичне моделювання і експериментальні дослідження.

Виклад основного матеріалу

Під час розробки термоелектричного генератора з огляду на його цільове призначення за основу було прийнято такі технічні дані й умови експлуатації [1]:

- електрична потужність генератора – 5–100 Вт;
- теплова потужність генератора – 5–10 кВт;
- паливо – біомаса;
- система перетворення енергії – термоелектричний перетворювач;
- система охолодження генератора – повітряна;
- система опалення приміщення – повітряна;
- робочий цикл між заправками – 6–8 год;
- маса генератора – 20 кг.

Прийняті технічні вимоги накладають певні обмеження на конструкцію генератора й потребують проведення відповідних науково-технічних досліджень та розробок. Завдання проектування комбінованого генератора теплової та електричної енергії (КГТЕ) полягає у визначенні параметрів основних систем: піролізного палика, системи нагріву, системи охолодження, термоелектричних батарей, поєднання яких має забезпечити необхідний баланс теплових потоків, заданий температурний режим і проектні показники теплової та електричної потужності генератора. Завдання розробки й проектування такого пристрою полягає у узгодженні й оптимізації режимів всіх його складових частин. Основою системи є термоелектричний генератор, проектні параметри якого визначають вимоги й обмеження для джерела теплоти й системи охолодження. Він задає обмеження на робочі температури й на щільність теплових потоків, які надходять від джерела теплоти й відводяться системою охолодження. В свою чергу умови теплообміну в системах нагріву та охолодження визначають оптимальні розміри й конструкцію ТЕГ.

В існуючих прототипах подібних пристроїв передача теплового потоку від продуктів згоряння до перетворювача енергії здійснюється крізь металеві стінки палика, тобто інтенсивність теплопередачі обмежена механізмом теплопровідності конструкцій [11, 12]. Натомість у пропонуваній роботі з метою інтенсифікації теплопередачі в системі нагріву передбачається застосу-

вання двофазних систем теплообміну (термосифонів). На рис. 1 зображена принципова схема КГТЕ. Передача теплового потоку до ТЕГ здійснюється парами теплоносія, які утворюються в парогенераторі, що розташований в зоні камери згоряння (1), пара (3) надходить до поверхні термоелектричних модулів ТЕГ, де конденсується, після чого конденсат (4) повертається в парогенератор, й цикл відновлюється.

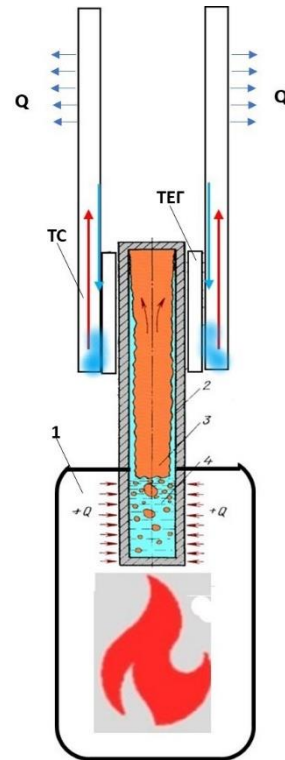


Рис. 1. Принципова схема КГТЕ: ТС – термосифон; ТЕГ – термоелектричний генератор; 1 – камера згоряння; 2 – парогенератор; 3 – пара; 4 – конденсат

Fig. 1. Schematic diagram of the KGTE: TS – thermosyphon; TEG – thermoelectric generator; 1 – combustion chamber; 2 – steam generator; 3 – steam; 4 – condensate

Температура теплоносія визначається його властивостями, конструкцією термосифона та тепловим балансом системи й залежно від сполучення цих параметрів встановлюється на певному рівні. Оскільки температурний потенціал продуктів згоряння значно перевищує максимально допустиму температуру термоелектричного матеріалу, проектна робоча температура встановлюється на рівні цього обмеження. Регулювання температурного режиму може здійснюватися через зміну потужності джерела за рахунок контрольованої подачі повітря. Наявність проміжного теплоносія й системи регулювання забезпечує можливість стабілізації температурного режиму ТЕГ і захисту його від перегріву.

Для охолодження ТЕГ також використовується двофазна система теплообміну – тепла труба з вертикальними ребрами. Низькотемпературний теплоносіє кипить у зоні контакту труби з термобатареями ТЕГ, пари

піднімаються вздовж стінки, конденсуються в повітряному теплообміннику, й конденсат повертається в зону випаровування. Тепловий потік відводиться в навколишнє повітря.

Перепад температур, що виникає між поверхнями термоелектричних модулів внаслідок протікання теплового потоку, приводить до появи термо-електрорушійної сили в ланцюгу ТЕГ, яка в разі підключення корисного навантаження забезпечує генерацію відповідної потужності. Корисним навантаженням слугує DC/DC інвертор, який регулює електричні параметри згідно з керувальними сигналами контролера заряду, що оптимізує процес зарядки акумуляторів банку енергії, з якого живляться кінцеві споживачі системи.

Передбачається, що запропонована схема здатна забезпечити стабільний температурний режим генератора, надійне функціонування без обслуговування, надзвичайно високу ефективність опалення (на рівні 60 %) і практично нульові викиди шкідливих речовин.

Принцип дії піролізного пальника заснований на технології газифікації біомаси. Перевагами цієї технології порівняно з методами прямого спалювання є регульована швидкість реакції горіння, відсутність смол у продуктах горіння, можливість використання будь-якого палива, простота експлуатації. В основу технології покладено ефект «зворотної теплової хвилі» в шарі палива. Ця технологія має принципову відмінність від класичної газифікації палива в газогенераторах щільного шару, яка полягає в тому, що зворотна тепла хвиля (зона газифікації) рухається зі сталою швидкістю вздовж масиву палива, залишаючи позаду продукти газифікації. На рис. 2 наведено схему реалізації процесу окиснювального піролізу [3].

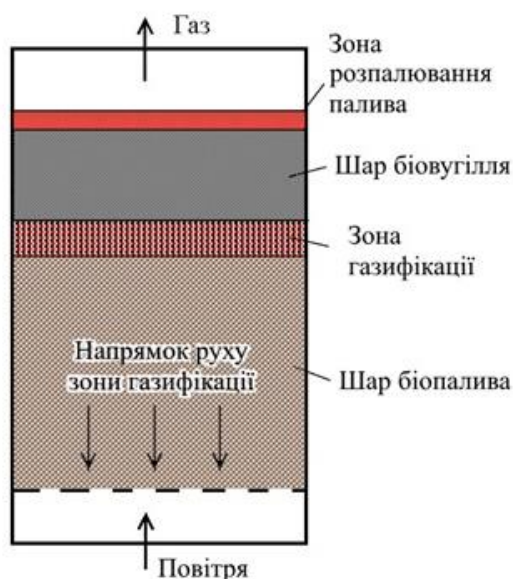


Рис. 2. Схема процесу окиснювального піролізу

Fig. 2. Scheme of the oxidative pyrolysis process

Газогенератор являє собою вертикальний реактор періодичної дії, в якому міститься щільний шар палива.

Розпалювання палива відбувається зверху, а подача повітря – знизу, як у газогенераторі прямого процесу. Після запалювання високотемпературна область починає рухатися назустріч потоку повітря зі сталою швидкістю. Це явище нагадує фронт теплового і хімічного перетворення палива або зону газифікації. Зона газифікації – це частина шару, яка розділяє зони сирого біопалива й утвореного біовугілля. Рух зони газифікації відбувається завдяки високій теплопровідності палива. Шар біопалива поступово нагрівається, і відбувається його піроліз.

У зоні піролізу леткі речовини окислюються киснем повітря. Потім відбувається окислення частини біовугілля і кисень повністю витрачається. Далі протікають реакції окислення вуглецю з водяною парою і вуглекислим газом. За фронтом горіння залишається шар розпеченого біовугілля, в якому відбувається термічний розпад (крекінг) смол, як у газогенераторі оберненого процесу. За рахунок подачі вторинного повітря біовугілля допалюється до золи. Таким чином, у газогенераторі з рухомою зоною газифікації використовується комбінація елементів прямого і оберненого процесів газифікації. Коефіцієнт надлишку повітря для часткової газифікації становить 0,12–0,25; а для повної газифікації – 0,30–0,50 [13, 14]. За рахунок зменшення обсягу димових газів суттєво підвищується ефективність джерела теплової енергії.

Для проекту КГТЕ було розроблено піролізний пальник ПП-8, що складається з реторти та зовнішнього корпусу, виконаних з тонкої нержавіючої сталі (0,8 мм) для зменшення ваги. В реторту через кришку завантажуються паливо й розпалюється зверху. Після закриття кришки продукти згорання виходять через штуцер в димар. Внаслідок розрідження, що виникає, в пальник крізь засувку надходить первинне повітря, що підтримує горіння в зоні газифікації. Вторинне повітря надходить крізь отвори в нижній частині корпусу, підігрівається в зазорі між корпусом і ретортою та через фурми поступає до камери згорання. Надлишок повітря йде на допалювання біовугілля, яке згорає до золи. Розрахункова температура в камері згорання сягає 600–900 °С залежно від якості палива, кількості повітря, стадії горіння. Регулювання подачі повітря здійснюється за допомогою засувки і шиберу на димарі. Піролізний пальник ПП-8 зображено на фото справа (рис. 3).

Для визначення основних характеристик пальника й умов теплообміну в системі було створено експериментальний стенд, що складається з пальника ПП-8, на якому монтуються дослідні зразки термоелектричного генератора (див. рис. 3).

Для забезпечення вимірювань необхідних параметрів була створена автоматизована система вимірювання TUI-1, що забезпечує 12 каналів вимірювання температур, два канали вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) термобатарей і канал вимірювання струму й потужності, оснащений електронним навантаженням для зняття вольт-амперних характеристик ТЕГ. Система вимірювань через USB роз'єм підключена до комп'ютера, де всі дані вимірювань протоколюються у вигляді файлів *xlsx*. Принципову електричну схему TUI-1 наведено на рис. 4.



Рис. 3. Експериментальний стенд

Fig. 3. Experimental stand

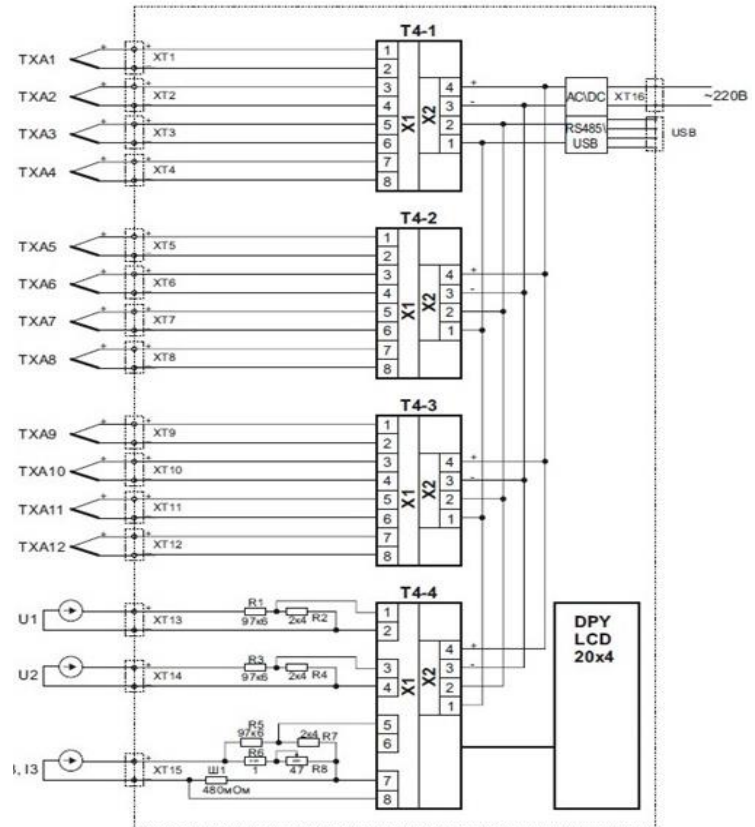


Рис. 4. Принципова електрична схема системи вимірювань

Fig. 4. Schematic diagram of the measuring system

Передусім необхідно було визначу гідравлічного опору повітряно-димового тракту. З цією метою вимірювався хід температур продуктів горіння в камері згоряння tho , на поверхні пальника ths , у боксі термоелектричного генератора tb і на вході в димар tf . Типовий розподіл температур у системі наведено на рис. 5.

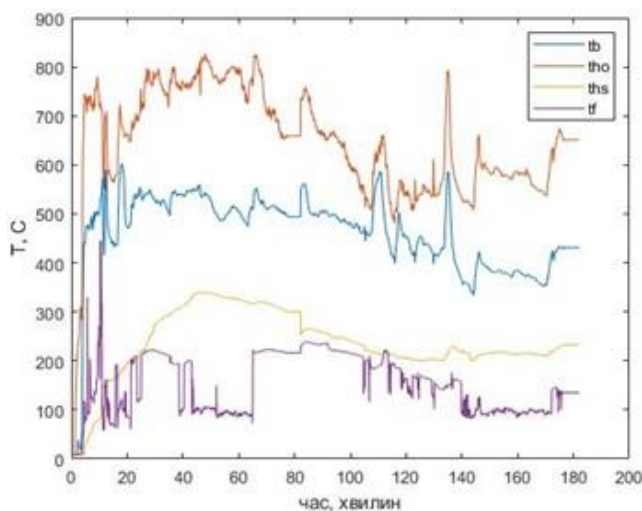


Рис. 5. Розподіл температур у системі протягом циклу горіння палива

Fig. 5. Temperature distribution in the system during the fuel combustion cycle

Експериментальні дані щодо рівня температур у камері згоряння добре узгоджуються з розрахунковими ($tho = 600\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Водночас суттєвий вплив на цей параметр має розхід повітря, який регулюється за рахунок природної тяги в димарі завдяки вибору певного положення засувки. Вплив розходу на температурний режим ілюструє рис. 6, на якому наведено хід температури продуктів згоряння tho для трьох різних режимів регулювання розходу повітря. З наведених даних випливає, що за певних умов можливо забезпечити зниження температури в камері згоряння до рівня $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ з підтримкою більш рівномірного температурного режиму протягом циклу горіння (червона крива). Такі режими найприйнятніші з погляду забезпечення ефективності й надійності КГТЕ.

Потужність ТЕГ є квадратичною функцією перепаду температур між спаями термоелементів, тобто на гарячій стороні необхідно підтримувати максимально допустиму температуру. Водночас робочі температури термосифона і термоелектричних модулів обмежені їх властивостями. Для термоелектричних модулів це максимально допустима робоча температура (у цьому разі $T_r = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Температуру термосифона обмежено критичними параметрами теплоносія – тиском і температурою. Для води, яка є найефективнішим теплоносієм для умов, що розглядаються, критичні параметри дорівнюють $P_{кр} = 208\text{ атм}$; $T_{кр} = 370\text{ }^{\circ}\text{C}$. З погляду надійності оптимальна робоча температура для водяних термо-

сифонів у схемі, що розглядається, дорівнює $T_p = 235^\circ\text{C}$ ($P_p = 30\text{ атм}$). Перевищення цієї температури призводить до швидкого зростання тиску в камері термосифона й збільшення ризику розриву його корпусу.

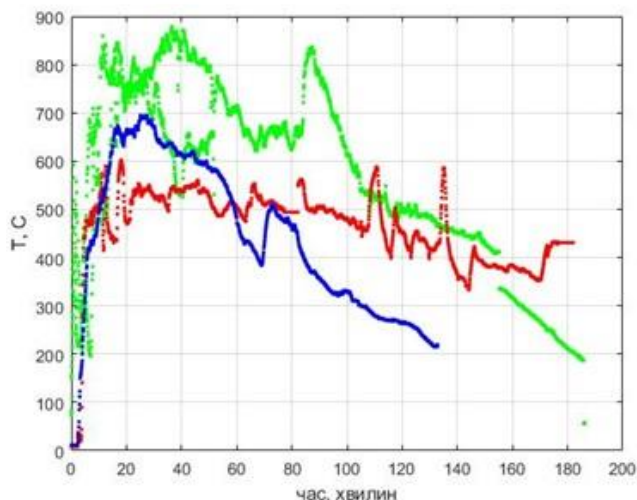


Рис. 6. Розподіл температур у камері згоряння протягом циклу горіння для різних режимів регулювання розходу повітря

Fig. 6. Temperature distribution in the combustion chamber during the combustion cycle for different modes of air flow control

Важливим завданням під час розробки КГТЕ є забезпечення оптимального співвідношення характеристик систем нагріву й охолодження – вони повинні забезпечити баланс теплових потоків, за якого втрати температурного напору в теплообмінних системах будуть мінімальними. Математичне моделювання дозволяє розрахувати оптимальні параметри КГТЕ, але в математичній моделі завжди присутні невизначені параметри, які необхідно віднайти експериментально. В цьому разі це коефіцієнти теплопередачі між нагрівальним і охолоджувальним теплоносіями та поверхнею термоелектричних модулів. З цією метою проводились дослідження прототипів ТЕГ у різноманітних режимах роботи піролізного паливника. Оскільки термоелектричний модуль являє собою високочутливий датчик перепаду температур, в основі цього дослідження лежить визначення залежності ЕРС термобатарей від режимних параметрів паливника. Як приклад на рис. 7 представлено дані експерименту з двома варіантами гарячих термосифонів, які відрізняються площею поверхні теплообміну з продуктами горіння. Поверхня теплообміну Н2 в 5,3 раза перевищує площу Н1. Завдяки цьому теплообмінник Н2 в однакових початкових умовах забезпечує приблизно в 4 рази більший тепловий потік і, відповідно, робочий перепад температур на термоелементах.

Рис. 8 ілюструє коефіцієнт використання наявного перепаду температур (співвідношення робочого перепаду температур на термоелементах dT_p до різниці температур між джерелом і стоком теплової енергії dT_o) для обох варіантів.

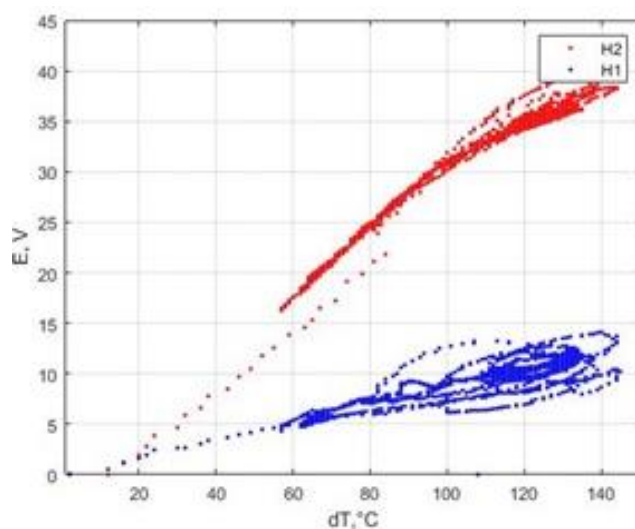


Рис. 7. Залежність ЕРС від поточного перепаду температур між гарячим та холодним теплообмінниками

Fig. 7. Dependence of the emf on the current temperature difference between the hot and cold heat exchanger

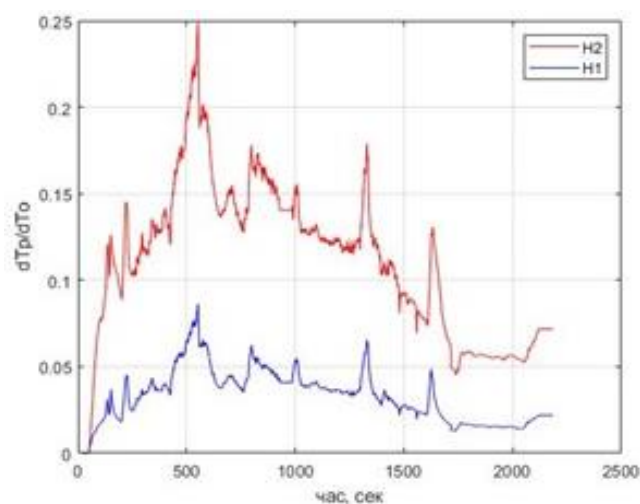


Рис. 8. Коефіцієнт використання наявного перепаду температур

Fig. 8. Utilization of the available temperature difference

Висновки

Запропонована схема здатна забезпечити стабільний температурний режим генератора, надійно функціонує без обслуговування, має надзвичайно високу теплову ефективність (на рівні 60 %) та практично нульові викиди шкідливих речовин.

Очікувані технічні характеристики таких генераторів забезпечують їм конкурентоздатність в порівнянні з існуючими зразками, в результаті вирішується завдання підвищення енергоефективності системи опалення і одночасного одержання електричної енергії для внутрішнього споживання.

ПОСИЛАННЯ

1. Лобунець Ю. М., Ключ В. П., Зур'ян О. В. Комбіноване джерело теплової та електричної енергії на базі газогенераторного пальника та термоелектричного генератора. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 4 (75). С. 20–28. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).20-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).20-28)
2. Punnachaiya S., Kovitcharoenkul P., Thong-aram D. Development of low grade waste heat thermoelectric power generator Songklanakarin. *Journal of Science and Technology*. 2010. Vol. 32. No. 3. P. 307–313.
3. Favarel C., Champier D. et al. Thermoelectricity, a Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-Grid-Areas. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2015. Vol. Issue 33. P. 256–268. DOI:10.13044/j.sdewes.2015.03.0020. 118
4. Weidenkaff A. Thermoelectricity for future sustainable energy technologies. *The European Physical Journal Conferences*. 2017. Vol. 148. P. 11. DOI:10.1051/epjconf/201714800010.
5. Исмаилов Т. А., Мирземагомедова М. М. Исследование стационарных режимов работы устройств термоэлектрического теплообмена. *Вестник Дагестанского Государственного Технического Университета: Технические науки*. 2016. Т. 40. № 1. С. 23–30. DOI 10.21822 / 2073-6185-2016-40-1-23-30.
6. Merotto L., Fanciulli C., Dondè R., De Iuliis S. Study of a thermoelectric generator based on a catalytic premixed meso-scale combustor. *Appl Energy* 2016; 162:346–53.
7. Yadav S., Yamasani P., Kumar S. Experimental studies on a micro power generator using thermo-electric modules mounted on a micro-combustor. *Energy Convers Manage* 2015; 99:1–7.
8. Xiao H., Qiu K., Gou X., Ou Q. A flameless catalytic combustion-based thermoelectric generator for powering electronic instruments on gas pipelines. *Appl Energy* 2013; 112:1161–5.
9. Mueller K. T., Waters O., Bubnovich V., Orlovskaya N., Chen R. Super-adiabatic combustion in Al₂O₃ and SiC coated porous media for thermoelectric power conversion. *Energy* 2013; 56:108–16.
10. Hasani M., Rahbar N. Application of thermoelectric cooler as a power generator in waste heat recovery from a PEM fuel cell – an experimental study. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40:15040–51.
11. Federici J., Norton D., Bruggemann T., Voit K., Wetzell E., Vlochas D. Catalytic microcombustors with integrated thermoelectric elements for portable power production. *J Power Sources* 2006; 161:1469–78.
12. Sonoc A., Jeswiet J., Soo Vi Kie. Opportunities to improve recycling of automotive lithium ion batteries. *Proc CIRP* 2015; 29:752–7.
13. Кремнева К. В. Підвищення ефективності двостадійного процесу газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06. Дніпро, 2015. 21 с.
14. Лобунець Ю. М. Методи розрахунку та проектування термоелектричних перетворювачів енергії. К.: Наук. думка. 1989. 176 с.

REFERENCES

1. Lobunets Y. M., Klyus V. P., Zurian O. V. Combined source of thermal and electric energy based on a gas generator burner and a thermoelectric generator. *Vidnovluvana Energetika*. 2023. No. 4(75). P. 20–28. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).20-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).20-28)
2. Punnachaiya S., Kovitcharoenkul P., Thong-aram D. Development of low grade waste heat thermoelectric power generator Songklanakarin. *Journal of Science and Technology*. 2010. Vol. 32. No. 3. P. 307–313.
3. Favarel C., Champier D. et al. Thermoelectricity, a Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-Grid-Areas. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2015. Vol. Issue 33. P. 256–268. DOI: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0020. 118
4. Weidenkaff A. Thermoelectricity for future sustainable energy technologies. *The European Physical Journal Conferences*. 2017. Vol. 148. P. 11. DOI:10.1051/epjconf/201714800010.
5. Ismailov T. A., Mirzemagomedova M. M. Study of steady-state operating modes of thermoelectric heat exchange devices. *Bulletin of Dagestan State Technical University: Technical Sciences*. 2016. T. 40, No. 1. C. 23–30. DOI 10.21822 / 2073-6185-2016-40-1-23-30.
6. Merotto L., Fanciulli C., Dondè R., De Iuliis S. Study of a thermoelectric generator based on a catalytic premixed meso-scale combustor. *Appl Energy* 2016; 162:346–53.
7. Yadav S., Yamasani P., Kumar S. Experimental studies on a micro power generator using thermo-electric modules mounted on a micro-combustor. *Energy Convers Manage* 2015; 99:1–7.
8. Xiao H., Qiu K., Gou X., Ou Q. A flameless catalytic combustion-based thermoelectric generator for powering electronic instruments on gas pipelines. *Appl Energy* 2013; 112:1161–5.
9. Mueller K. T., Waters O., Bubnovich V., Orlovskaya N., Chen R. Super-adiabatic combustion in Al₂O₃ and SiC coated porous media for thermoelectric power conversion. *Energy* 2013; 56:108–16.
10. Hasani M., Rahbar N. Application of thermoelectric cooler as a power generator in waste heat recovery from a PEM fuel cell – an experimental study. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40:15040–51.
11. Federici J., Norton D., Bruggemann T., Voit K., Wetzell E., Vlochas D. Catalytic microcombustors with integrated thermoelectric elements for portable power production. *J Power Sources* 2006; 161:1469–78.
12. Sonoc A., Jeswiet J., Soo Vi Kie. Opportunities to improve recycling of automotive lithium ion batteries. *Proc CIRP* 2015; 29:752–7.
13. Kremneva K. V. Increasing the efficiency of a two-stage gasification process of finely dispersed biomass for low-power cogeneration units: PhD thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences: specialty 05.14.06. Dnipro, 2015. 21 p.
14. Lobunets Y. M., Methods of calculation and design of thermoelectric energy converters. K.: Nauk. dumka. 1989. 176 c.