

УДК 621.363:621.313

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.1\(490\).19](https://doi.org/10.15589/znп2023.1(490).19)

ENERGY RECOVERY OF A HOUSEHOLD HEATING STOVE

РЕКУПЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ПОБУТОВОЇ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Maryna B. Litvinova

lmb965@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4917-2132

Oleksandr D. Shtanko

sadmar954@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3572-7915

Andriy E. Kudrenko

ankudrenko3@gmail.com

ORCID: 0009-0004-6728-9272

М. Б. Літвінова,

докт. пед. наук, канд. ф.-м. наук, професорка

О. Д. Штанько,

канд. ф.-м. наук, доцент

А. Є. Кудренко,

студент

*Kherson Educational-Scientific Institute
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson*

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон

Abstract. The use of stove heating is still widespread and economically justified in Ukrainian agriculture. Converting at least part of the energy emitted into the air by a household stove creates conditions for saving fuel resources, provides electricity to homes during interruptions in the central power supply, and can be a significant help for private households. The aim of the study is to model the process of generating electricity by recuperating the exhaust energy of a household stove. This is the first time that the process of energy recuperating of exhaust gases is modeled for the household heating stove. The research method used is the functional-physical method of search design, which consists in setting and solving problems of technical creativity based on the use of heuristic techniques, analysis of the functions of technical systems and their elements, synthesis of chains of physical and technical effects to obtain new principles of operation of information objects with the involvement of computer programs to perform such procedures.

In the research the physical conditions for placing a thermoelectric generator (TEG) in the stove were analyzed. The chosen location for the TEGs is optimal in terms of the following parameters: there is no need to significantly change the furnace configuration; the temperature is acceptable for the use of the most common high-temperature thermoelectric modules; the gas energy is sufficient to generate electricity for the needs of the house. Based on the analysis results of the structure of household stoves features, a certain type of thermoelectric module was selected Altec-1024 to simulate the operation of the TEG. Based on the size of the furnace, it is proposed to place four pairs of modules in it, which will be electrically connected in series and connected to the battery to accumulate an electric charge.

Using OpenModelica software and Dymola graphic editor, simulation modeling of the main temperature parameters inside the stove was performed, and the TEG power was calculated. It has been found that during the heating period, as a result of the recovery of waste energy from a household heating stove, it can be possible to generate at least 66 kWh of electricity per month. The resulting power value allows you to significantly save electricity and meet the immediate needs of the household in the event of a power outage.

Key words: energy recovery; thermoelectric generator; simulation modelin; household stove.

Анотація. Використання пічного опалення досі є розповсюдженим та економічно обґрунтованим у сільських господарствах України. Перетворення хоча б частини енергії, що викидається у повітря побутовою піччю, створює умови для заощадження паливних ресурсів, забезпечує електричною енергією домівки при перебоях у центральному електропостачанні й може стати суттєвою підмогою для приватних домогосподарств. Метою дослідження є моделювання процесу одержання електричної енергії шляхом рекуперації викидної енергії побутової топкової печі. Вперше відбувається моделювання процесу рекуперації енергії викидних газів саме для топкового типу печі. В якості метода дослідження використано функціонально-фізичний метод пошукового проектування, який полягає в постановці і вирішенні завдань технічної творчості на основі використання евристичних прийомів, аналізу функцій технічних систем і їх елементів, синтезу ланцюжків фізико-технічних

ефектів для отримання нових принципів дії інформаційних об'єктів із залученням комп'ютерних програм для виконання таких процедур.

В роботі проаналізовано фізичні умови розміщення в топковій печі термоелектричного генератора (ТЕГ). Обране місце розміщення ТЕГ, що є оптимальними за такими параметрами: не треба суттєво змінювати конфігурацію печі; температура є прийнятною для застосування найпоширеніших високотемпературних термоелектричних модулів; енергія газу є достатньою для виробітку електричної енергії для потреби будинку. За результатами розгляду особливості структури побутових печей обрано певний тип термоелектричного модуля Алтек-1024 для моделювання роботи ТЕГ. Виходячи з розмірів печі в ній пропонується розташувати чотири пари модулів, що електрично послідовно з'єднуються та приєднуються до акумуляторної батареї для накопичення електричного заряду.

У програмному середовищі OpenModelica з використанням графічного редактору Dymola проведено імітаційне моделювання основних температурних параметрів у середині печі. Здійснений розрахунок потужності ТЕГ. Передбачається, що в опалювальний період у результаті рекуперації викидної енергії побутової опалювальної печі можна одержувати не менше 66 кВт·годин електроенергії на місяць. Одержане значення потужності дозволяє суттєво заощаджувати електроенергію та забезпечити нагальні потреби домогосподарства у випадку відключення електропостачання.

Ключові слова: рекуперація енергії; термоелектричний генератор; імітаційне моделювання; побутова піч.

ВСТУП

В сучасних умовах значного подорожчання енергоносіїв в сільських районах і на замських дачах України дуже часто використовується пічне опалення. В печах біомасу, зазвичай, спалюють для виробництва тепла, приготування їжі та отримання гарячої води. ККД горіння палива при цьому є достатньо низьким з урахуванням тепла, що викидається через трубу назовні. Перетворення хоча б частини викидної енергії побутової печі в електричну може перекрити мінімальну норму споживання електричної енергії індивідуального будинку.

Термоелектричне перетворення є універсальним джерелом одержання електричної енергії. Воно допускає використання практично будь-яких джерел теплового потоку, у тому числі при малих перепадах температур, при яких застосування інших способів перетворення неможливо. Зовсім недавно практичне застосування одержали пристрої, що утилізують енергію теплових потоків при перепаді температур менш 10 К. Дотепер істотним обмеженням його використання є лише відносно низький коефіцієнт ефективності перетворення теплового потоку в електричну енергію. Однак термоелектричне перетворення хоча б частини викидної енергії побутової печі створює умови для заощадження паливних ресурсів, вирішення проблеми забезпечення електричною енергією при перебоях у центральному електропостачанні або підвищеному навантаженні і може стати суттєвою підмогою для домогосподарств.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Рекуперацію викидної енергії побутової печі можна провести за рахунок термоелектричного (ТЕ) ефекту, що дозволяє одержати електроенергію із теплового потоку. Цей процес відбувається за допомогою термоелектричних модулів (ТЕМ), які часто називають модулями Зеебека.

Останнім часом можливість рекуперації тепла, яке викидається назовні нагрітими джерелами на основі використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) досліджується достатньо широко [1-4]. Тому реальною є задача використання відповідного ТЕГ в побутової печі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Термоелектричний генератор за принципом дії являє собою ту ж теплову машину, у якій робочим тілом є електронний газ напівпровідника, що перетворює теплову енергію в електричну. Як у всякій тепловій машині, ККД ТЕГ у першу чергу залежить від ККД циклу Карно, тому конструкція повинна мати мінімальні теплові втрати при передачі тепла к напівпровідниковому матеріалу і при зніманні тепла з нього. Основними вузлами ТЕГ є: джерело тепла; термобатарея з комутаційними й ізоляційними шарами; пристрій для знімання тепла (холодильник); несуча конструкція, що забезпечує необхідну міцність всієї машини і надійність її роботи. На цей час [1] йдеться про можливість приєднання ТЕГ до дров'яних печей. В ході експерименту було показано, що під час нормальної роботи печі можна додатково одержувати приблизно 28 Вт·год електроенергії. Проте залишилися питання, який вид термоелектричних матеріалів та відповідний тип ТЕМ найкраще використовувати в цьому випадку.

Сучасні термоелектричні модулі мають ККД біля 7% в низькотемпературному діапазоні (менш 350 °С) і 10% у високотемпературного діапазоні (більш 350 °С) [2, 3]. Однак ТЕМ мають інші переваги, які значною мірою компенсують їх низьку ефективність. ТЕМ не мають рухомих частин, робочих рідин, вони безшумні і не потребують обслуговування [3]. На цей час вони особливо активно застосовуються в автомобільній галузі, де термоелектричні генератори є одним

із можливих рішень підвищення ККД за рахунок використання тепла від вихлопних газів [4, 5]. Окремим питанням є приєднання ТЕГ до побутових печей.

Існує ряд досліджень по приєднанню ТЕГ з модулями на основі Bi_2Te_3 до варильних плит. Так у роботах [6, 7] досліджувався спосіб приєднання ТЕГ, коли дим використовувався як джерело тепла, а зовнішнє повітря у примусовій конвекції як джерело холоду. Отримана електрична потужність складала близько 4 Вт після контролера DC/DC. Автори [8] досліджували роботу ТЕГ, використовуючи дим як джерело тепла, а циркуляцію води – як холодний поглинач. Отримана потужність з використанням модуля Bi_2Te_3 складала близько 10 Вт. Але при цьому не було враховано споживання насоса і не застосовувався електронний перетворювач для накопичення електроенергії.

Дослідники O'Shaughnessy et al. [9] розробили власний прототип електричного генератора для портативних печей (печі chitetezo mbaula). Їх метою також було зменшити кількість палива для печі. ТЕГ використовував теплову трубку для збору тепла від плити і вентилятор для охолодження холодної сторони ТЕМ. З лабораторних експериментів було отримано максимальну вихідну потужність ТЕГ 5,9 Вт. У середньому, 3 Вт·год енергії надходило до батареї під час типового горіння протягом однієї години.

Для оснащення печей у роботах [10, 11] було надано ще одну модель ТЕГ. Цей ТЕГ мав один ТЕМ і виробляв максимальну електричну потужність 9,5 Вт. Проте через втрати в електронному перетворювачі DC/DC вихідна максимальна потужність складала 7,6 Вт. Спеціальний пристрій з використанням газового нагрівача було налаштовано для синхронізації з температурою у плиті. Перетворювач DC/DC із відстеженням точки максимальної потужності дозволяв забезпечувати вироблення стабільного значення напруги електричної енергії в 6 В, що надходила до свинцево-кислотної батареї на 12 В [12]. У середньому, під час 2-х годинного експерименту з використанням ТЕГ, оснащеного двома ТЕМ, у батареї було забезпечено зберігання 18 Вт·год енергії (модулі Bi_2Te_3 від Thermoamic). Автори також зауважують, що енергія у кількості від 35 до 55 Вт·год може зберігатися в акумуляторі протягом звичайного дня залежно від тривалості двох сеансів приготування їжі (у випадку варильної плити). Також цими авторами здійснено моделювання процесів для варильної плити в роботі 18. Незважаючи на те, що розглянутий вище експеримент, дозволив оцінити продуктивність генератора, умови його тестування не повною мірою відповідають тим, що мають місце у топковій печі. Зокрема, температурні умови варильної печі дозволяють використання низькотемпературні ТЕМ, які не підходять для топкового типу печей.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Розглянуті дані експериментальних досліджень та існуючі результати комп'ютерного моделювання процесів рекуперації викидної енергії печі не відповідають структурі та температурним умовам топкового типу печей. В той же час саме топковий тип печі є найбільш розповсюдженим і корисним в умовах дефіциту газу. Таким чином, в жодній роботі імітаційна модель використання енергії відпрацьованих газів побутової топкової печі, з її перетворенням на електричну енергію, досі не розглядалася.

Мета дослідження – моделювання процесу одержання електричної енергії шляхом рекуперації викидної енергії побутової топкової печі.

Об'єкт дослідження – перетворення теплової енергії в електричну за допомогою термоелектрогенератора в побутових умовах.

Предмет дослідження – рекуперація викидної енергії побутової печі.

Методи дослідження – функціонально-фізичний метод пошукового проектування, який полягає в постановці і вирішенні завдань технічної творчості на основі використання евристичних прийомів, аналізу функцій технічних систем і їх елементів, синтезу ланцюжків фізико-технічних ефектів для отримання нових принципів дії інформаційних об'єктів із залученням комп'ютерних програм для виконання таких процедур.

Фізичні умови розміщення ТЕГ. Фізичні процеси в топці є дуже багатофакторними. Тому в загальному виді складно теоретично визначити значення ККД у режимі експлуатації. Розкид значень ККД топкової печі становить від 90% при слабкій тязі й знижується до 50% при сильному провітрюванні топки [13]. Тому у дослідженні будемо спиратися на загальні розрахункові значення ККД, регламентовані розроблювачами печей [14]. Ці значення, в середньому, становлять 75% при оптимальному провітрюванні топки печі.

Для подальших розрахунків виберемо середню норму витрати теплової енергії, для індивідуального будинку, що складає – 70 Вт/м². Розглянемо одноповерховий індивідуальний будинок площею біля 100 м². Для забезпечення його опалення необхідна теплова потужність за нормативами складає 7,3 кВт, а з урахуванням витрати на вентиляцію – 7,5 кВт. З урахуванням ККД печі у 75% потужність зазначеної печі має становити 10 кВт. Теплові втрати при цьому складуть 2,5 кВт [14]. Саме такий тип печі й будемо розглядати далі.

У технічних розрахунках горіння приймають такий розрахунковий состав сухого атмосферного повітря: O_2 – 21% і N_2 – 79%. Крім того додається пара води, яка може розкладатися на складові, які беруть участь у процесі горіння. Відпрацьовані гази (дим) містять також продукти горіння. За літературними даними фізичні параметри димових газів мають значення, наведені в таблиці 1. Крім того, для

Таблиця 1. Параметри термоелектричного модуля Алтек-1024 [19]

T _г = 750.С, T _х = 50.С				Розміри, мм				
I _{max} , А	U _{max} , В	W _{max} , Вт	η, %	Довжина l, мм	Ширина w, мм	Висота e, мм	Гаряча сторона, мм	Холодна сторона, мм
14.5	2.2	31	10.1	106	106	23	50x55	60x60

моделювання необхідно знати швидкість руху димового газу. Щоб паливо напевно згоріло в печі дійсна витрата повітря має перевищувати теоретичну. Відношення дійсної витрати повітря до теоретичного значення називається коефіцієнтом витрати повітря – n . Для ефективних топок $n = 1,05-1,1$. Якщо дійсна витрата повітря менше теоретичного, тобто $n < 1$, то має місце неповне згоряння палива, яке називають хімічним недопалом. Значення теоретичної витрати повітря, наприклад для природного газу, складає $9-9,5 \text{ (м}^3_{\text{пов.}}\text{)}/(\text{м}^3_{\text{газу}}\text{)}$.

Більш універсальним показником є коефіцієнт виділення продуктів згоряння на одиницю потужності. Кількість продуктів згоряння на одиницю теплоти згоряння палива зростає зі збільшенням у паливі баласту у вигляді азоту, вуглекислого газу, водяної пари. Найменше значення питомого виходу диму на 1 МДж теплоти згоряння палива має оксид вуглецю, що складає $V_{\text{пит}} = 0,227 \text{ м}^3/\text{МДж}$. У водню $V_{\text{пит}} = 0,268 \text{ м}^3/\text{МДж}$, у вуглецю $V_{\text{пит}} = 0,26 \text{ м}^3/\text{МДж}$, у природного газу $V_{\text{пит}} = 0,294 \text{ м}^3/\text{МДж}$. У дров, залежно від їх якості (питомої щільності, вологості та ін.), $V_{\text{пит}} = 0,35$ до $0,45 \text{ м}^3/\text{МДж}$. Для одержання питомого об'єму відпрацьованих газів на одиницю потужності необхідно помножити $V_{\text{пит}}$ на значення теоретично використання повітря. Будемо вважати, що паливом є природний газ. Тому за середнім значенням теоретичної витрати повітря одержимо питоме вироблення відпрацьованого газу: $V_{\text{пит}} = 3 \text{ м}^3/\text{МДж}$.

З урахуванням обраної раніше потужності печі $W = 10 \text{ кВт}$ швидкість витікання відпрацьованих газів становитиме: $V = 0,030 \text{ м}^3/\text{с}$.

Переріз димоходу, що рекомендується для будівництва розглянутого типу печі, дорівнює $20 \times 20 \text{ см}^2$ [15]. Тому швидкість руху газу складе: $V_r = 0,75 \text{ м/с}$.

За знайденим значенням можна заключити, що рух газу є ламінарним.

Температура газу в топці, залежно від застосовуваного виду деревини може досягати 1000°C . Температура горіння кам'яного вугілля в ідеальних умовах досягає 2100°C , але в опалювальній печі паливо спалюється максимум при 1000°C [16]. Через цього топка виготовляється зі стійких до високої температури матеріалів, наприклад на основі шамотної цегли. Відразу за топкою встановлюється теплообмінник. На вході до теплообмінника температура складає вже $700-750^\circ\text{C}$. Це місце є найбільш оптимальним для розміщення ТЕГ (див. рис. 1).

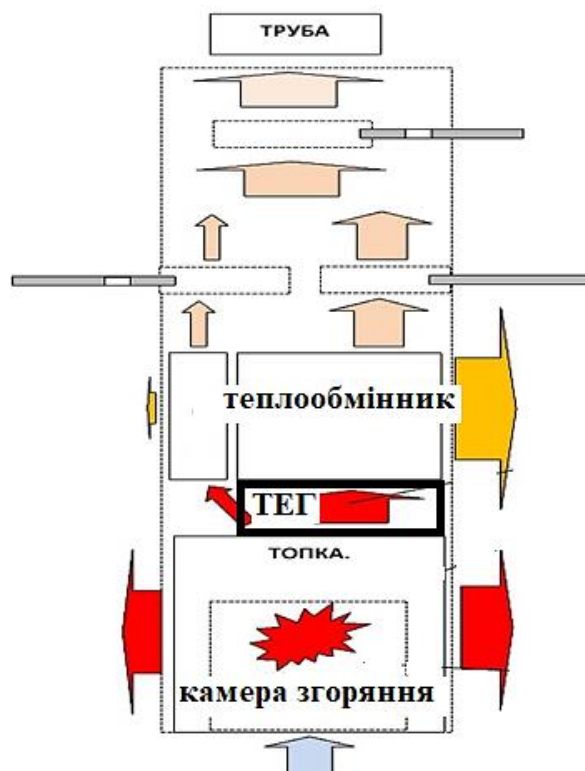


Рис. 1. Позиція розміщення термоелектричного генератора

Вказане місце є оптимальним за багатьма параметрами. По-перше, для розміщення ТЕГ не треба суттєво змінювати конфігурацію печі. По-друге, температура є прийнятною для застосування найпоширеніших термоелектричних модулів і складає 750°C . По-третє, енергія газу є достатньою для виробітку електричної енергії для потреби будинку.

Таким чином, під час подальшого проведення розрахунків термоелектричного генератора температура вхідних газів складала $T_h = 750^\circ\text{C}$ і саме вона задавала значення T_l .

Вибір термоелектричного модуля для ТЕГ. Наступним кроком є вибір типу ТЕМ для генератора. Важливим параметром є вихідна електрична потужність. Максимальна електрична потужність за стандартною моделлю визначається як [17]:

$$W_{\text{max}} = F \times n \left(\frac{\alpha^2}{2\rho} \right) \left(\frac{A}{l} \right) (T_h - T_c) \quad (1)$$

де n – кількість термодіодів на ТЕМ, α і ρ – коефіцієнт Зеебека і питомий електричний опір термодіоду, A та l – її площа та довжина, відповідно. F – коефіцієнт

якості виготовлення ТЕМ. Для збільшення потужності необхідно збільшити різницю температур; однак T_h обмежується максимальною температурою, яку допускає використання ТЕМ.

Схему термоелектричного генераторного елемента показано на рисунку 2. Тепло Q_1 підводиться до ТЕГ через стінку нагрівача 1. Через стінку 7 охолоджувача енергія Q_2 відводиться від ТЕГ (випромінюванням, конвекцією). Спаї напівпровідникових кристалічних термостовпчиків 4 та 9 утворені металічними шинами 3, 5 і 8, які електрично ізольовані від стінок 1 і 7 шарами діелектрика 2, 6, що працюють на основі різниці температур $\Delta T = T_1 - T_2$.

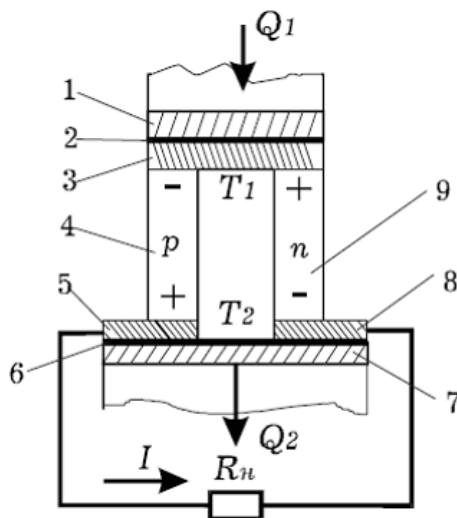


Рис. 2. Термоелектричний генераторний елемент: 1 – нагрівач; 2, 6 – шари діелектрика; 3, 5, 8 – металеві шини; 4, 9 – спаї напівпровідникових кристалічних термостовпчиків; 7 – стінка охолоджувача

На зовнішнім навантаженні R_n ТЕГ створюється напруга U , що дорівнює термо-ЕРС, за винятком спадання напруги на внутрішньому опорі генератора:

$$U = E - I \cdot R, \text{ або } I \cdot R_n = E - I \cdot R.$$

Сила струму I у колі визначається за виразом:

$$I = \frac{2 \cdot N \cdot \alpha \cdot \Delta T}{R + R_n} = \frac{2 \cdot N \cdot \alpha \cdot \Delta T}{R(1 + m)}, \quad (2)$$

де: $m = R_n/R$. Напруга на навантаженні дорівнює:

$$U = I \times R_n = 2N \cdot \alpha \cdot \Delta T \frac{m}{1 + m}. \quad (3)$$

Потужність, що віддається в зовнішнє коло, можна обчислити за наступною формулою:

$$P = I \times U = \frac{(2N \cdot \alpha)^2 \cdot \Delta T}{R} \times \frac{m}{(1 + m)^2}. \quad (4)$$

Ефективність роботи термоелектричного генератора оцінюється коефіцієнтом корисної дії: $\eta = P/Q_h$.

Для найбільш ефективної роботи ТЕМ необхідно забезпечити максимально припустиму різницю температур між сторонами модуля, для цього до однієї його стороні треба підвести тепло (Q_1), а з іншого боку – забезпечити ефективний відвід теплової енергії (Q_2). Електрична потужність на навантаженні прямо пропорційне квадрату різниці температур ΔT :

$$P = Q_1 - Q_2 = I^2 R_n \sim \Delta T^2.$$

Для досягнення максимальної потужності значення електричного опору навантаження повинне дорівнювати значенню внутрішнього опору генераторного модуля в умовах експлуатації. Вибираючи певним чином параметр m , можна змінювати ККД, при цьому буде змінюватися електрична потужність, яку можна одержати від термоелектричного генератора.

Всі ТЕГ діляться умовно на високотемпературні (вище 350 °C), середньої температури (від 250 °C до 350 °C) і низькотемпературні (до 250 °C) перетворювачі. Відповідно до мети нашої роботи на базі термоелектричного перетворювача передбачається використання високотемпературних перетворювачів. На Україні такі модулі серійно випускаються двокаскадними на базі матеріалу $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Si-Ge}$. Це модулі Алтек 1023 і Алтек 1024. Схему-креслення відповідного каскадного модуля для температур гарячої сторони на рівні 750÷800 °C наведено на рисунку 3.

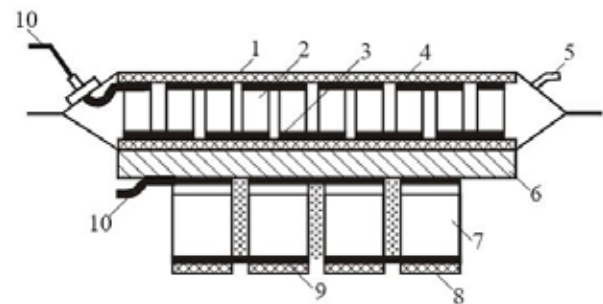


Рис. 3. Схема двокаскадного термоелектричного модуля ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{SiGe}$):

1 – герметичний корпус; 2 – термоелементи низькотемпературного каскаду; 3 – електроізоляція; 4 – керамічна пластина; 5 – штенгель; 6 – теплоперехід; 7 – термоелементи високотемпературного каскаду; 8 – керамічна пластина; 9 – комутаційна пластина; 10 – електричні виводи

Високотемпературний каскад модуля виготовлений з матеріалу на основі Si-Ge , а низькотемпературний – на основі Bi_2Te_3 . Низькотемпературну термобатарею герметизовано в металевому корпусі, вільний об'єм якого заповнений інертним газом. Обидва каскади з'єднані послідовно по теплу та електрично. Модуль складається із двох каскадів, з'єднаних послідовно електрично і термічно. Кожний каскад складається з термопар, з'єднаних послідовно електрично і паралельно – термічно.

Характеристики двокаскадного модуля на основі Ge-Si і Bi_2Te_3 наведені на рисунку 4. За паспортними даними виробника максимальна ефективність каскадного модуля для $T_h = 750^\circ\text{C}$, $T_c = 50^\circ\text{C}$ і міжкаскадної температури $T_{mk} = 300^\circ\text{C}$ дорівнює 10,1 %, електрична потужність складає 31 Вт, а напруга на погодженому навантаженні – 2,2 В [18]. Як вже зазначалося, на комерційному ринку України розглянутими вимогами відповідають два TEM: Алтек-1023 і Алтек-1024. Останній має більше значення максимально припустимої робочої температури. Тому для подальшого моделювання обирається модуль Алтек-1024. Вони мають досить високий ККД перетворення, що складає 10%.

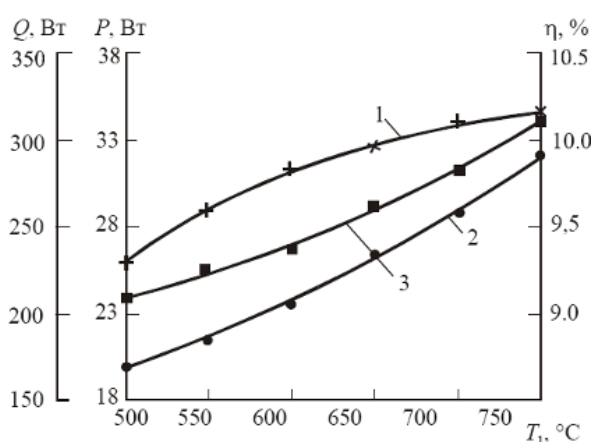


Рис. 4. Залежність ККД двокаскадного модуля (Bi_2Te_3 – Si-Ge) від:
1 – електричної потужності; 2 – теплового потоку; 3 – температури гарячої сторони ($T_c = 50^\circ\text{C}$) [18]

Модуль має підвищену механічну стійкість, завдяки застосуванню спеціальної теплопровідної прокладки між високотемпературним і низькотемпературним каскадами. Параметри модуля наведені в таблиці 1 [19]. На жаль, у паспортних даних не наводиться тепловий опір модуля. Для його знаходження скористаємося даними залежностей, наведених на рисунку 4. Теплова потужність визначається як:

$$\Phi = W_{\max}/\eta = 306,9 \approx 300 \text{ Вт}. \quad (5)$$

Тоді максимальний тепловий опір складає:

$$R_T = \Phi/\Delta T_{\max} = 300/(750-50) = 0,43 \text{ Ом/К}. \quad (6)$$

При максимальному значенні температури $T_{\max}$ теплопровідність модуля λ дорівнює:

$$\lambda = \frac{\Phi \times e}{(T_h - T_c) \times l \times w} = 0,877 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Імітаційне моделювання роботи генератора

Моделювання відбувалося у програмному середовищі OpenModelica з використанням графічного

редактору Dymola [20]. Для моделювання роботи ТЕГ виходили з наступного. Виходячи з розмірів розглянутих модулів Алтек 1024 (100 мм × 100 мм) та з урахуванням типових розмірів пічної труби, пропонується встановити 2 ряду модулів, кожний з котрих містить 4 TEM. У печі модулі Алтек-1024 у кількості 8 штук встановлюються, як показано на рисунку 5. Тепло надходить знизу до верху.

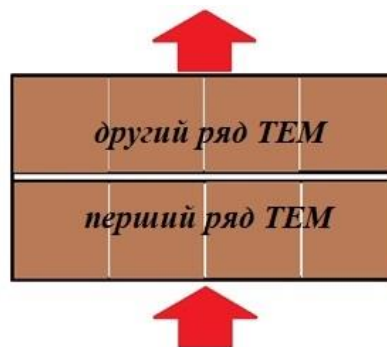


Рис. 5. Розташування TEM у печі

Температура полум'я після розігріву печі варіюється від 800 до 1000 °C. Температура на гарячій стороні першого ряду модулів може постійно становити 750 °C (з короткотерміновими змінами). Температура на холодній стінці складає 50 °C. Слід зазначити, що вона, загалом, має бути менше 200 °C.

У програмній системі імітаційні датчики температури розташовувалися в різних місцях печі. Імітаційний датчик температури T_1 відповідав вимірюванню температури гарячого газу, що надходить до ТЕГ, датчик T_0 відповідав за визначення температури газу на виході з ТЕГ. Нарешті, датчик T_2 надавав інформацію про температуру стінки та відповідну температуру холодної сторони модуля. Похибка імітаційного значення показань температури складала 0,5 °C. Загальна похибка комп'ютерної обробки даних не перевищувала 0,021%.

На рисунку 6 наведені результати імітаційного експерименту тривалістю 2 години (із кроком у 1 хвилину) по моделюванню основних температурних параметрів у середині печі. Весь час експерименту можна розділити на три частини: перші 15 хвилин – розігрів печі; з 15 по 75 хвилину – період стабільного горіння; з 75 по 120 хвилину – згасання процесу горіння та охолодження печі.

З рисунку 6 видно, що у моделі було враховано нерегулярність температури, яка розвивається при завантаженні палива. Більшу частину часу імітаційна температура у верхній частині полум'яної камери (T_p) складала біля 800 °C з нерегулярними програмними коливаннями (відповідають змінам у кількості палива, що згоряє у даний інтервал часу). В результаті температура димового газу на виході з топки

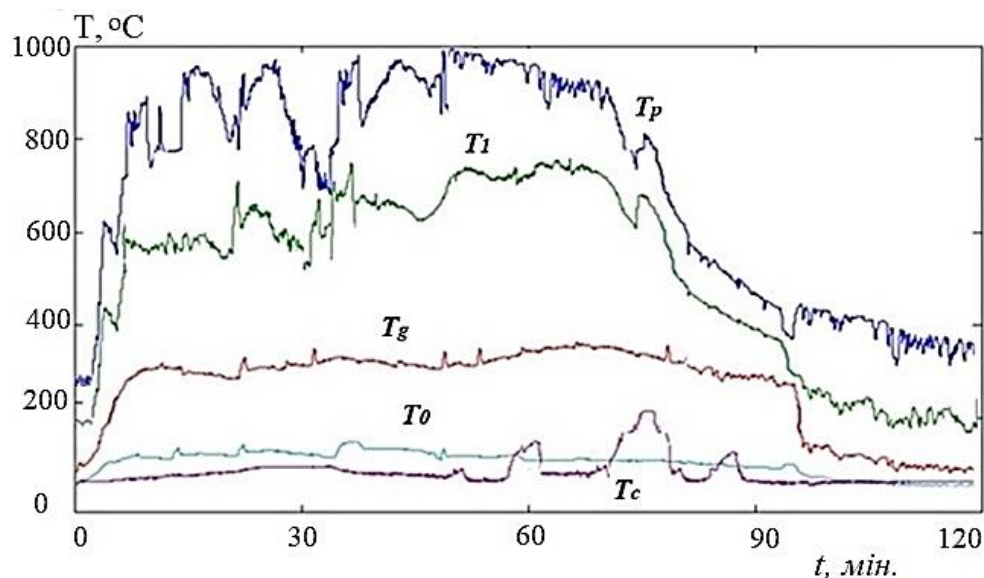


Рис. 6. Моделювання основних температурних параметрів у середині печі

Таблиця 2. Характеристики ТЕМ

Розташування ТЕМ	Верхнє	Нижнє	Сума
Потужність, Вт	16,3	29,6	45,9

(T_g) за генератором становила близько 300-320 °С, що є характеристикою хорошого ККД. Температура в холодній стінки димоходу T_c була близькою 50 °С. T_1 і T_0 показують температуру на вході і виході з теплообмінника. Різниця температур гарячого газу вздовж теплообмінника коливається від 400 до 500 °С. На останній годині горіння було змодельоване підвищення значення температури холодної стінки T_2 і можна спостерігати три піки цієї температури. Знаючи температуру гарячої та холодної сторони та властивості ТЕМ, було проведено (у межах лінійного наближення) розрахунок кількості виробленої енергії. Слід зазначити, що у верхньому ряду секції матимуть вхідну температуру газу рівну вихідній від першої секції. У таблиці 2 представлена середня потужність, вироблена кожним ТЕМ відповідно до його розташування.

Слід зазначити, що напруга на виході термоелектричного генератора, залежно від флуктуації минаючої через нього теплової енергії (вихідної температури відпрацьованих газів), постійно буде змінюватися. Виходячи з досить низької вихідної напруги, виводи від всіх модулів пропонується з'єднати електрично послідовно і приєднати до акумуляторної батареї для накопичення електричного заряду. Оскільки використовується 4 пари модулів, то одержану енергію потрібно помножити на чотири. Тобто потужність ТЕГ складатиме 183,6 Вт.

Якщо в опалювальний період піч, у середньому, буде працювати 12 годин на добу, то можна одержувати не менше 66 кВт·годин електроенергії на місяць.

Одержаний результат дуже обнадійливий, оскільки показує, що можна сподіватися на достатню потужність додаткового електричного живлення господарств. Однак для перевірки результатів імітаційного моделювання необхідно також провести серію експериментальних досліджень з реальною піччю.

ВИСНОВКИ

Здійснено моделювання процесу рекуперації енергії викидних газів для топкового типу печі. Обрано оптимальну позицію для розміщення ТЕГ, що знаходиться за топкою на початку теплообмінника, де температура газу складає біля 750 °С. До складу ТЕГ обрані двокаскадні термоелектричні модулі на базі матеріалу Bi_2Te_3 – Si-Ge Алтек 1024, що мають відповідну робочу температуру. Проведене імітаційне моделювання основних температурних параметрів у середині печі програмному середовищі OpenModelica з використанням графічного редактору Dymola. Знайдено, що розрахункова потужність ТЕГ, що складалося з 8 ТЕМ дорівнюватиме 183,6 Вт. Як наслідок, в опалювальний період передбачається одержувати не менше енергії 66 кВт·годин електроенергії на місяць. Цієї енергії достатньо для забезпечення мінімальних потреб домогосподарства у разі перебоїв у центральному електропостачанні.

REFERENCES

- [1] Planète bois (2022). <http://www.planetebois.org>
- [2] Biswas, K., He, J., Blum, I. D. et al. (2012). High-performance Bulk Thermoelectrics with All-scale Hierarchical Architectures. *Nature*, 489, 414-418. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11439>
- [3] Aridi, R., Faraj, J., Samer, Al. (2021). Thermoelectric Power Generators: State-of-the-Art, Heat Recovery Method, and Challenges. *Electricity* 2(3), 359-386. <https://doi.org/10.3390/electricity2030022>
- [4] Crane, D. (2012). Thermoelectric Generator Performance for Passenger Vehicles, 3rd Thermoelectrics Applications Workshop, Amerigon, Irwindale, CA [Brochure]. Retrieved from: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/crane_0.pdf
- [5] Maranville, C. (2012). Thermoelectric Opportunities for Light-duty Vehicles, Ford Motor Company [Brochure]. Retrieved from: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/03/f10/maranville.pdf>
- [6] Mastbergen, D., Willson, B. (2005). Generating Light from Stoves using a Thermoelectric Generator. ETHOS 2005 Engineers in Technical and Humanitarian Opportunities of Service international stove research conference. Seattle, Washington. 367-372.
- [7] Joshi, S., Mastbergen, D., Willson, B. (2007). Field testing of Stove-powered Thermoelectric Generators. ETHOS 2007. Engineers in Technical and Humanitarian Opportunities of Service international stove research conference. Warsaw. Poland. 451-466.
- [8] Rinalde, G., Juanica, L., Tagliavere E. et al. (2010). Development of Thermoelectric Generators for Electrification of Isolated Rural Homes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11), 5818-5822. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.093>
- [9] O'Shaughnessy, S., Deasy, M., Kinsella, C. et al. (2013). Small Scale Electricity Generation from a Portable Biomass Cookstove: Prototype Design and Preliminary Results. *Applied Energy*, 102, 374-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.032>
- [10] Champier, D., Bédécarrats, J.-P., Rivaletto, M., Strub F. (2010). Thermoelectric Power Generation from Biomass Cook Stoves. *Energy*, 35(2), 935-942. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.015>
- [11] Singh, S.K., Kaushik, S.C., Tyagi, V.V. et al. (2022). Experimental and computational investigation of waste heat recovery from combustion device for household purposes. *Int J Energy Environ Eng* 13, 353–364 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00430-z>
- [12] Champier, D., Favarel, C., Bédécarrats, J.-P. et al. (2013). Prototype combined Heater/thermoelectric Power Generator for Remote Applications. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1-12. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2459-x>
- [13] Favarel, C., Bédécarrats, J.-P. et al. (2015) Thermoelectricity – A Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-grid-areas. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(3), 256-268. doi: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0020
- [14] Information materials. How to choose a heating stove for the house. Which stove is better? (2018). Retrieved from: <http://farbateka.com.ua/rizne/yak-vibrati-opalyvalnu-pich-dlya-budinku-yaka-pich-krashha.html>
- [15] State building regulations of Ukraine: heating, ventilation, air conditioning. (2021). (SBN B.2.5-67:2021). Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine. Retrieved from: <https://saee.gov.ua/en/news/296>
- [16] Documentation. (2022). Retrieved from: Physical properties of flue gases, tables. <https://cabel-set.ru/uk/house-of-logs/fizicheskie-svoystva-dymovyh-gazov-tablica-teplofizicheskie/>
- [17] Marigo, M., Zulli, F., Bordignon, S. et al. (2022). Energy analysis of a wood or pellet stove in a single-family house equipped with gas boiler and radiators. *Build. Simul.* 15, 1577–1593. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0884-1>
- [18] Politicin, B.M., Shtanko, O.D., Litvinova, M.B., Karpova, S.O. (2017). Energy recovery device for the internal combustion engine. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 3, 82-89.
- [19] Altek-1024. (2021). Retrieved from: Technical documentation. Retrieved from: <https://altek.ua/ru/documents/>
- [20] DYMOLA and system design. (2022). Multiprojection and modeling based on the Modelica language and the FM interface. Retrieved from: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/produkty/dymola/>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Planète bois (2022). <http://www.planetebois.org>
- [2] Biswas, K., He, J., Blum, I. D. et al. (2012). High-performance Bulk Thermoelectrics with All-scale Hierarchical Architectures. *Nature*, 489, 414-418. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11439>
- [3] Aridi, R., Faraj, J., Samer, Al. (2021). Thermoelectric Power Generators: State-of-the-Art, Heat Recovery Method, and Challenges. *Electricity* 2(3), 359-386. <https://doi.org/10.3390/electricity2030022>
- [4] Crane, D. (2012). Thermoelectric Generator Performance for Passenger Vehicles, 3rd Thermoelectrics Applications Workshop, Amerigon, Irwindale, CA [Brochure]. Retrieved from: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/crane_0.pdf
- [5] Maranville, C. (2012). Thermoelectric Opportunities for Light-duty Vehicles, Ford Motor Company [Brochure]. Retrieved from: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/03/f10/maranville.pdf>

- [6] Mastbergen, D., Willson, B. (2005). Generating Light from Stoves using a Thermoelectric Generator. ETHOS 2005 Engineers in Technical and Humanitarian Opportunities of Service international stove research conference. Seattle, Washington. 367-372.
- [7] Joshi, S., Mastbergen, D., Willson, B. (2007). Field testing of Stove-powered Thermoelectric Generators. ETHOS 2007. Engineers in Technical and Humanitarian Opportunities of Service international stove research conference. Warsaw. Poland. 451-466.
- [8] Rinalde, G., Juanica, L., Tagliavere E. et al. (2010). Development of Thermoelectric Generators for Electrification of Isolated Rural Homes. International Journal of Hydrogen Energy, 35(11), 5818-5822. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.093>
- [9] O'Shaughnessy, S., Deasy, M., Kinsella, C. et al. (2013). Small Scale Electricity Generation from a Portable Biomass Cookstove: Prototype Design and Preliminary Results. Applied Energy, 102, 374-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.032>
- [10] Champier, D., Bédécarrats, J.-P., Rivaletto, M., Strub F. (2010). Thermoelectric Power Generation from Biomass Cook Stoves. Energy, 35(2), 935-942. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.015>
- [11] Singh, S.K., Kaushik, S.C., Tyagi, V.V. et al. (2022). Experimental and computational investigation of waste heat recovery from combustion device for household purposes. Int J Energy Environ Eng 13, 353–364 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00430-z>
- [12] Champier, D., Favarel, C., Bédécarrats, J.-P. et al. (2013). Prototype combined Heater/thermoelectric Power Generator for Remote Applications. Journal of Electronic Materials, 42(7), 1-12. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2459-x>
- [13] Favarel, C., Bédécarrats, J.-P. et al. (2015) Thermoelectricity – A Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-grid-areas. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 3(3), 256-268. doi: 10.13044/j.sdewes.2015.03.0020
- [14] Information materials. How to choose a heating stove for the house. Which stove is better? (2018). Retrieved from: <http://farbateka.com.ua/rizne/yak-vibrati-opalyvalnu-pich-dlya-budinku-yaka-pich-krashha.html>
- [15] State building regulations of Ukraine: heating, ventilation, air conditioning. (2021). (SBN B.2.5-67:2021). Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine. Retrieved from: <https://saee.gov.ua/en/news/296>
- [16] Documentation. (2022). Retrieved from: Physical properties of flue gases, tables. <https://cabel-set.ru/uk/house-of-logs/fizicheskie-svoistva-dymovyh-gazov-tablica-teplofizicheskie/>
- [17] Marigo, M., Zulli, F., Bordignon, S. et al. (2022). Energy analysis of a wood or pellet stove in a single-family house equipped with gas boiler and radiators. Build. Simul. 15, 1577–1593. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0884-1>
- [18] Politicin, B.M., Shtanko, O.D., Litvinova, M.B., Karpova, S.O. (2017). Energy recovery device for the internal combustion engine. Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. 3, 82-89.
- [19] Altek-1024. (2021). Retrieved from: Technical documentation. Retrieved from: <https://altek.ua/ru/documents/>
- [20] DYMOLA and system design. (2022). Multiprojection and modeling based on the Modelica language and the FM interface. Retrieved from: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/produkty/dymola/>

© М. Б. Літвінова, О. Д. Штанько, А. Є. Кудренко
Дата надходження статті до редакції: 18.03.2023
Дата затвердження статті до друку: 29.03.2023