

УДК 621.436

М.Б. ЛІТВИНОВА, О.Д. ШТАНЬКО, С.О. КАРПОВА, К.О. ЯНОВСЬКА
Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ГЕНЕРАТОРІ, ПРИЗНАЧЕНОМУ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ПОБУТОВОЇ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Зменшення запасів органічного палива у світі та його подорожчання для споживачів викликає необхідність скорочення витрат на енергоспоживання будівель. В українських селах у більшості випадків використовується грубе опалення. Тому актуальним є забезпечення вироблення електричної енергії за рахунок використання термоелектричного генератора (ТЕГ), що приєднується до дымоходу і використовує енергію димових газів. В результаті будинок в опалювальний сезон генеруватиме електричну енергію і може бути практично незалежним по цьому виду енергії.

Незважаючи на те, що існує значна кількість досліджень, присвячених термоелектричним матеріалам, роботі різних пристроїв теплообміну, різним конструкціям ТЕГ (включаючи опис правил їх проектування), математична модель безпосереднього використання енергії відпрацьованих газів побутової печі, в якій біомаса спалюється на відкритому вогні, досі відсутня.

В роботі розглянуто математичну модель процесу теплообміну під час використання ТЕГ для утилізації залишкової енергії димових газів побутової печі, що дозволяє одержати електричну енергію для внутрішньо-побутового споживання.

За основу генератора обрано термоелектричний модуль Альтек-1024 виготовлення української фірми. За певною конструкцією термоелектричного генератора проведений тепловий розрахунок на основі рівнянь теплового балансу. Було отримано систему двох рівнянь переносу енергії димових газів через поверхню ТЕМ. Вирішення цієї системи з урахуванням залежності від температури основних характеристик димових газів, таких як щільність, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, надало можливість одержати залежність потужності відбору теплової енергії від площі внутрішньої поверхні генератора. З одержаної залежності випливає, що застосування модулів Альтек-1024 у кількості 3 штук надає можливість відібрати із димових газів потужність біля 1 кВт. Відповідна розрахункова кількість електричної енергії складає 100 Вт. Таке значення, у середньому, перевищує мінімальну норму споживання електричної енергії індивідуального будинку.

Ключові слова: термоелектричний генератор, теплообмін, математична модель, побутова піч, рекуперація, димові газ.

М.Б. ЛИТВИНОВА, А.Д. ШТАНЬКО, С.О. КАРПОВА, К.А. ЯНОВСЬКАЯ
Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОМ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ БЫТОВОЙ ОТОПИТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Уменьшение запасов органического топлива в мире и его подорожание для потребителей вызывает необходимость сокращения расходов на энергопотребление зданий. В украинских селах в большинстве случаев используется печное отопление. Поэтому актуальным является обеспечение выработки электрической энергии за счет использования термоэлектрического генератора (ТЭГ), который присоединяется к дымоходу и использует энергию димовых газов. В результате дом в отопительный сезон генерирует электрическую энергию и может быть практически независимым по этому виду энергии.

Несмотря на то, что существует значительное количество исследований, посвященных термоэлектрическим материалам, работе различных устройств теплообмена, различным конструкциям ТЭГ (включая описание правил их проектирования), математическая модель непосредственного использования энергии отработанных газов бытовой печи, в которой биомасса сжигается на открытом огне, до сих пор отсутствует.

В работе рассмотрена математическая модель процесса теплообмена при использовании ТЭГ для утилизации остаточной энергии димовых газов бытовой печи, которая позволяет получить электрическую энергию для внутреннего бытового потребления.

За основу генератора выбран термоэлектрический модуль Альтек-1024 изготовления украинской фирмы. Согласно определенной конструкции термоэлектрического генератора проведен тепловой расчет на основе уравнений теплового баланса. Было получено систему двух уравнений переноса энергии дымовых газов через поверхность ТЭМ. Решение этой системы с учетом зависимости от температуры основных характеристик дымовых газов, таких как плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, позволило получить зависимость мощности отбора тепловой энергии от площади внутренней поверхности генератора. Из полученной зависимости следует, что применение модулей Альтек-1024 в количестве 3 штук предоставляет возможность отобрать из дымовых газов мощность около 1 кВт. Соответствующее расчетное количество электрической энергии составляет 100 Вт. Такое значение, в среднем, перекрывает минимальную норму потребления электроэнергии индивидуального дома.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, теплообмен, математическая модель, бытовая печь, рекуперация, дымовые газы.

M.B. LITVINOVA, O.D. SHTANKO, S.O. KARPOVA, K.A. YANOVSKA
Kherson branch of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN THERMOELECTRIC GENERATOR DESIGNED FOR RECOVERY OF ENERGY OF DOMESTIC HEATING OVEN

Declining stocks of fossil fuels in the world and its rise in price for consumers makes it necessary to reduce the cost of energy consumption of buildings. In Ukrainian villages, in most cases, rough heating is used. Therefore, it is important to ensure the production of electricity through the use of a thermoelectric generator (TEG), which connects to the chimney and uses the energy of flue gases. As a result, the house will generate electricity during the heating season and can be virtually independent of this type of energy.

Despite the fact that there is a significant amount of research on thermoelectric materials, the operation of various heat exchangers, different designs of TEG (including a description of the rules of their design), the mathematical model of direct use of exhaust gas energy in a household stove burning biomass is still absent.

The paper considers a mathematical model of the heat exchange process during the use of TEG for utilization of residual energy of flue gases of a household furnace, which allows to obtain electric energy for domestic consumption.

The thermoelectric module manufactured by the Ukrainian company Altek-1024 was chosen as the basis of the generator. According to a certain design of the thermoelectric generator, a thermal calculation was performed on the basis of the heat balance equations. A system of two equations for the transfer of flue gas energy through the TEM surface was obtained. The solution of this system, taking into account the temperature dependence of the main characteristics of flue gases, such as density, specific heat, thermal conductivity, made it possible to obtain the dependence of thermal energy extraction power on the inner surface area of the generator. From the obtained dependence it follows that the use of Altek-1024 modules in the amount of 3 pieces makes it possible to extract power from the flue gases of about 1 kW. The corresponding estimated amount of electrical energy is 100 watts. This value, on average, exceeds the minimum rate of electricity consumption of an individual house.

Key words: thermoelectric generator, heat exchange, mathematical model, household stove, recuperation, flue gases.

Постановка проблеми

Зменшення запасів органічного палива у світі та його подорожчання для споживачів викликає необхідність скорочення витрат на енергоспоживання будівель. Найдорожчим для окремо взятої родини є система опалення, без якої не обходиться жоден будинок. В українських селах у більшості випадків використовується грубе опалення. Таке опалення має дуже низький ККД, але при цьому також має перевагу у широкому діапазоні палива: вугілля, торф, дрова та ін. У більшості випадків дешевина палива компенсує низький ККД у фінансовому відношенні. До цієї переваги можна додати виробку електричної енергії за рахунок використання термоелектричного генератора (ТЕГ), що приєднується до димоходу і використовує енергію димових газів. Для підтвердження доцільності використання ТЕГ для рекуперації енергії побутової

опалювальної печі необхідно здійснити математичне моделювання відповідних процесів теплообміну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом можливість утилізації тепла, що викидається різними нагрівними джерелами, з використанням ТЕГ вивчається дуже широко. Так дослідження [1] спрямоване на розробку 50-ватного термоелектричного генератора для використання низькоякісного тепла в системах охолодження промислових процесів і високоактивних радіоізотопних джерел. В роботі [2] вивчалися можливості оснащення дров'яних печей термоелектричними генераторами. В лабораторних умовах були проведені тести, які показали, що при нормальній роботі піч видаватиме приблизно 28 Вт/год. Існує значна кількість досліджень, присвячених термоелектричним матеріалам, роботі різних пристроїв теплообміну, різним конструкціям термоелектричних генераторів (включаючи опис правил їх проектування), можливостям поліпшення майбутніх високотемпературних термоелектричних перетворювачів [3,4]. Однак математична модель безпосереднього використання енергії відпрацьованих газів побутової печі, в якій біомаса спалюється на відкритому вогні, досі не розглядалася.

Мета дослідження

Метою роботи є розгляд математичної моделі процесу теплообміну під час використання термоелектричного генератора для утилізації залишкової енергії димових газів побутової печі, що дозволяє одержати електричну енергію для внутрішньо-побутового споживання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Конструкція термоелектричного генератора показана на рисунку 1. Частина корпусу генератора 1 вставляється в димохід, звідки надходить газ з енергією Q . Металевий корпус 2 забирає теплову енергію Q_1 і Q_2 від внутрішньої енергії димових газів Q . Енергія Q_1 проходить через корпус і надходить на термоелектричний модуль 4, нагріваючи його поверхню до температури T_1 . При проходженні через термоелектричний модуль відбирається енергія потужністю P . Радіатор 3 охолоджує поверхню модуля до температури T_2 . Радіатор продувається за допомогою вентилятора 6. Назовні виділяється енергія нагрітого повітря Q_4 .

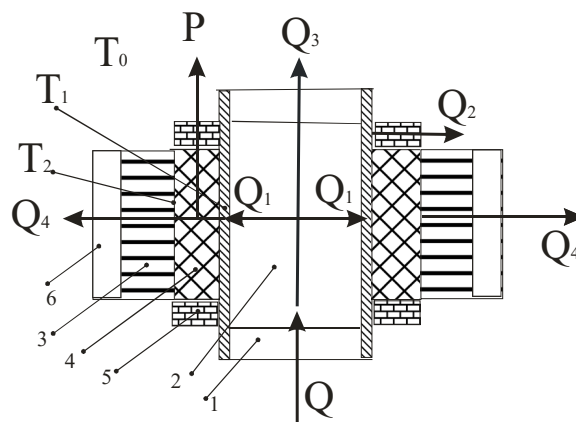


Рис. 1. Конструкція термоелектричного генератора

На виході з генератора відпрацьовані гази мають енергію Q_3 . Температура навколишнього повітря дорівнює T_0 . Частина корпуса 1 вставляється в димохід. Частина Q_2 енергії від Q_1 проходить через ізоляцію 5 і розсіюється.

За основу генератора вибирається термоелектричний модуль (ТЕМ) Альтек-1024 виготовлення української фірми. Радіатор розраховується на максимальну потужність ТЕМ. Він повинен при цьому забезпечити температуру не вище $50\text{ }^\circ\text{C}$ (рекомендується за паспортним даними модуля) охолоджуваної поверхні ТЕМ.

Тепловий розрахунок будемо проводити згідно з рівняннями теплового балансу

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 + Q_1 + Q_3, \\ Q_1 - Q_4 &= P + Q_2 \end{aligned} \quad (1)$$

відповідно до моделі теплообміну, що описувалася нами раніше в роботі [5].

Кількість енергії, що отримана від відпрацьованих газів, залежить від температури газу і температури внутрішньої поверхні генератора. Остання залежить від ефективності відводу теплової енергії через внутрішню поверхню всередині корпуса генератора і термоелектричний модуль. А відвід теплової енергії через ТЕМ, у свою чергу, залежить від температури зовнішньої поверхні внутрішнього корпуса генератора і температури зовнішнього повітря. Рівняння під таке завдання є дуже громіздким. Тому пропонуються наступні спрощення:

- температура зовнішнього повітря та температура зовнішньої поверхні внутрішнього корпуса генератора є сталою, рівною $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- температура відпрацьованих газів (диму) на вході складає $650\text{ }^\circ\text{C}$;
- поперечний переріз генератора для протоки відпрацьованих газів 0.04 м^2 ;
- швидкість руху димових газів $v = 0.030\text{ м}^3/\text{с}$ або відповідна лінійна швидкість v_L дорівнює 0.75 м/с ;
- рух димових газів є ламінарним.

Характеристики димових газів, а саме, щільність ρ , питома теплоємність C_p , коефіцієнт теплопровідності λ_2 залежно від температури T надані в таблиці 1 [6].

Таблиця 1

Температура $T, \text{ }^\circ\text{C}$	Щільність $\rho, \text{ кг/м}^3$	Теплоємність $C_p, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	Теплопровідність $\lambda_2 \cdot 10^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
400	0,525	1,151	5,70
500	0,457	1,185	6,56
600	0,405	1,214	7,42
700	0,363	1,239	8,27
800	0,330	1,264	9,15
900	0,301	1,290	10,0
1000	0,275	1,306	10,90

Наведені умови надають можливість розглянути математичну модель процесу теплообміну.

Енергія, що пройшла через ділянку δl площею δS стінки внутрішнього корпусу, визначається її теплопровідністю λ , градієнтом температури стінки генератора (дорівнює різниці зовнішньої T_p і внутрішньої T_0 температур, поділеної на товщину L стінки) і площею стінки δS :

$$\delta Q = \lambda \frac{T_0 - T_p}{L} \delta S. \quad (2)$$

Ця ж енергія надходить на площадку стінки і, відповідно до виразу (1):

$$\delta Q = [\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) + \alpha(T - T_0)]\delta S, \quad (3)$$

де ε – коефіцієнт сірості матеріалу стінки, сталь покрита шаром сажі, 0.80; σ – коефіцієнт Стефана-Больцмана, $5.671 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · К⁴); α – коефіцієнт теплопередачі дим – сталь, 5.8 Вт/(м² · К).

Прирівнявши вирази (2) і (3), маємо перше рівняння щодо температури стінки генератора, що нагрівається:

$$p(T) = \lambda \frac{T_0 - T_p}{L} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) + \alpha(T - T_0) \quad (4)$$

Для елементарного об'єму димових газів δV рівняння має вид:

$$\frac{dU}{dT} = Q \quad \text{або} \quad C_p V \frac{dT}{dt} = p(T) dS. \quad (5)$$

де V – елементарний об'єм ($V = a^2 dx$, a – довжина сторони квадратного перерізу внутрішньої поверхні генератора), U – внутрішня енергія димових газів зазначеного об'єму, dS – елементарна поверхня по периметру об'єму ($dS = 4a \cdot dx$).

Із рівнянь (1)-(5) одержимо рівняння:

$$C_p a^2 dx \frac{dT}{dt} = P(T) \cdot 4a dx. \quad (6)$$

Після скорочень
$$dx = C_p a v \frac{dT}{P(T)},$$

де: $v = dx / dt$ – швидкість руху димового газу.

У результаті отримуємо перше підсумкове рівняння теплообміну:

$$S = 4ax = C_p a^2 v \int_{T_1}^T \frac{dT}{P(T)}. \quad (7)$$

Разом із тим, різниця енергій димових газів, що ввійшли у генератор, і вийшли з нього в одиницю часу є інтегральною потужністю, що залишається димовими газами генератора. Звідси отримуємо друге підсумкове рівняння теплообміну:

$$P(T) = \frac{C_p dV(T - T_0)}{dt} = C_p \frac{a^2 dx}{dt} (T - T_0) = C_p a^2 v (T - T_0). \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння (7) і (8), одержуємо з одного рівняння $S(T_K)$, а з іншого – $P(T)$. У результаті можливо побудувати графік залежності $P(S)$, наведений на рисунку 2.

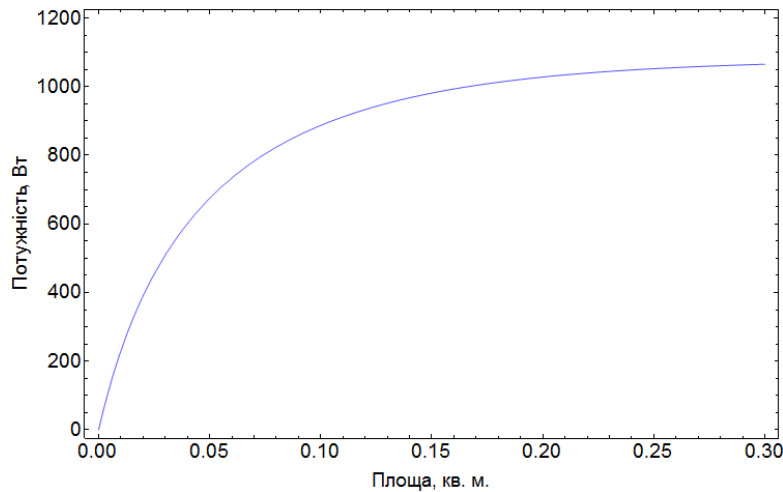


Рис. 2. Залежність потужності відбору теплової енергії від площі внутрішньої поверхні генератора

Максимальна потужність, що пропускається через модуль Альтек-1024, становить 330 Вт. З одержаної залежності на рис. 2 випливає, що застосовуючи такий модуль у кількості 3 штук при площі корпусу $S = 0.25 \text{ м}^2$ (його відповідна довжина $L = 31 \text{ см}$), потужність, яку можна відібрати із димових газів побутової печі за допомогою ТЕГ складає близько 1 кВт.

Виходячи з того, що значення ККД генератора, приблизно, можна вважати рівним $\eta_{\text{ген}} = 10\%$, відповідна розрахункова кількість електричної енергії буде складати 100 Вт. Це, в середньому, перевищує мінімальну норму споживання електричної енергії індивідуального будинку. Таким чином, термоелектричні модулі, вбудовані в теплообмінник між димарем і баком для гарячої води, можуть живити витяжний вентилятор, а також виробляти невелику кількість енергії для інших основних цілей.

Висновки

Створено математичну модель процесу теплообміну в термоелектричному генераторі, призначеному для рекуперації енергії побутової опалювальної печі. Розрахунок величини теплової енергії, яка відбирається від відпрацьованих газів за допомогою ТЕГ складає близько 1 кВт, відповідна розрахункова кількість електричної енергії складає 100 Вт. В результаті вирішується завдання підвищення енергоефективності системи опалення і одночасного одержання електричної енергії для внутрішнього споживання.

Список використаної літератури

1. Punnachaiya S., Kovitcharoenkul P., Thong-aram D. Development of low grade waste heat thermoelectric power generator Songklanakar. *Journal of Science and Technology*. 2010. Vol. 32, № 3. P. 307–313.
2. Favarel C., Champier D. et all. Thermoelectricity, a Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-Grid-Areas. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2015. Vol. 3. Issue 33. P. 256–268. DOI:10.13044/j.sdewes.2015.03.0020.

3. Weidenkaff A. Thermoelectricity for future sustainable energy technologies. *The European Physical Journal Conferences*. 2017. Vol. 148. P. 11. DOI:10.1051/epjconf/201714800010.
4. 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.
5. Politicin B. M., Litvinova M. B., Shtanko O. D., Karpova S. O. Energy recovery device for the internal combustion engine. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2017. № 3. P. 82–89.
6. Хамза А. А. Вибір та обґрунтування параметрів дизель-електричної станції із системою утилізації теплоти: дис. ... канд. техн. наук за спец. 05.05.03. НТУ "Харківський політехнічний ун-т". Харків, 2017. 254 с.

References

1. Punnachaiya, S. & Kovitcharoenkul, P., Thong-aram, D. (2010). Development of low grade waste heat thermoelectric power generator Songklanakarin. *Journal of Science and Technology*. **32** (3), 307–313.
2. Favarel, C. & Champier, D. et all. (2015). Thermoelectricity, a Promising Complementarity with Efficient Stoves in Off-Grid-Areas. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. **3** (33), 256–268. DOI:10.13044/j.sdewes.2015.03.0020.
3. Weidenkaff, A. Thermoelectricity for future sustainable energy technologies. (2017). *The European Physical Journal Conferences*. **148**, 11. DOI: 10.1051/epjconf/201714800010.
4. Ismailov, T. A. & Mirzemagomedova, M. M. (2016). Issledovaniye statsionarnykh rezhimov raboty ustroystv termoelektricheskogo teploobmena. *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta: Tekhnicheskiye nauki*. **40** (1), 23–30. DOI:10.21822 / 2073-6185-2016-40-1-23-30.
5. Politicin, B. M., Litvinova, M. B., Shtanko, O. D. & Karpova, S. O. (2017). Energy recovery device for the internal combustion engine. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. **3**, 82–89.
6. Khamza, A. A. (2017). Vybir ta obhruntuvannya parametriv dyzel'-elektrychnoyi stantsiyi iz systemoyu utylizatsiyi teploty: dys. ... kand. tekhn. nauk za spets. 05.05.03. NTU "Khar'kivs'kyu politekhnichnyy un-t". Kharkiv.

Літвінова Марина Борисівна – доктор педагогічних наук, кандидат фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: lmb965@gmail.com, ORCID:0000-0002-4917-2132.

Штанько Олександр Дмитрович – кандидат фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: sadmar954@gmail.com, ORCID:0000-0003-3572-7915.

Карпова Світлана Олегівна – старший викладач кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: sokarova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7208-3595.

Яновська Ксенія Олександрівна – студентка кафедри інформаційних технологій та фіз.-мат. дисциплін Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: kanovskaa595@gmail.com.