



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}



Лисько В.В.

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatyach@gmail.com

ПРО ПРОЄКТУВАННЯ ОКОПНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА ТА ЕЛЕКТРИКИ

Наведено фізичну та математичну моделі окопного термоелектричного джерела тепла та електрики, призначеного для обігріву військових та живлення малопотужної військової апаратури, систем мобільного та спеціального зв'язку, зарядки акумуляторів та освітлення, забезпечення теплом та мінімальною електричною енергією цивільного населення в місцях, де зруйнована енергетична інфраструктура, а також у неелектрифікованих районах поза зоною бойових дій. Створено комп'ютерну модель для проєктування конструкції такого джерела тепла та електрики, а також оптимізації термоелектричного матеріалу, з якого його виготовлено, для різних режимів експлуатації. Бібл. 15, рис. 1.

Ключові слова: термоелектричне джерело тепла та електрики, фізична модель, ефективність, циклічний режим.

Вступ

У даний час в якості автономних малопотужних джерел електрики для живлення військової апаратури традиційним залишається використання хімічних джерел струму. Однак, їх суттєвими недоліками є саморозряд та низька надійність, особливо при понижених температурах навколишнього середовища та в умовах підвищених механічних навантажень. Пересувні мініелектростанції є практично непридатними для застосування в місцях бойових дій у зв'язку з неприйнятними масо-габаритними характеристиками, потребою в пальному, яке в умовах бойових дій не завжди може бути в наявності, а головне – через шум, що супроводжує їх роботу, вони стають істотним демаскуючим фактором. У зв'язку з цим актуальним є пошук та створення принципово нових конструкцій автономних джерел тепла та електрики, максимально наближених до предметів військового спорядження та водночас придатних для використання в місцях проведення бойових дій.

У цьому відношенні особливо перспективними є автономні термоелектричні джерела електрики, що працюють від тепла спалювання довільного палива. Вони можуть мати високий ресурс роботи, володіють підвищеною надійністю та стійкістю до кліматичних і ударних навантажень, є універсальними, безшумними в роботі та зручними в експлуатації. Над створенням таких джерел активно працюють вчені та інженери багатьох країн. Термоелектричні

генератори електричною потужністю 2 – 20 Вт, що призначені для зарядки мобільних телефонів, MP3-плеєрів, навігаторів під час мандрівок та туристичних походів розроблено рядом закордонних фірм (TES, Power Pot, Biolite) [1 – 5]. Розроблено також термоелектричні генератори, робота яких заснована на використанні тепла від печей на твердому паливі [6 – 9]. Вони серійно виробляються рядом закордонних підприємств [8 – 10]. Проте, всі ці термоелектричні генератори є високовартісними, мають виключно побутове призначення і не підходять для військових потреб.

При цьому, головною перешкодою для їх широкого практичного використання є відносно висока вартість, в першу чергу зумовлена високою вартістю термоелектричного матеріалу, з якого вони виготовлені. Отже, важливим є проведення досліджень, спрямованих на істотне зниження вартості матеріалів для автономних термоелектричних джерел електрики та тепла, а також пошуку оптимальних конструкцій таких джерел, спеціалізованих за умовами їх використання.

Тому *метою роботи* є створення засобів (фізичних та математичних моделей, комп'ютерних програм), необхідних для проектування автономних термоелектричних генераторів та оптимізації термоелектричного матеріалу, з якого вони виготовлені, для максимально наближених до реальності умов їх експлуатації.

Фізична модель

Фізична модель термоелектричного генератора (рис. 1) містить: джерела тепла 1 (нагріту поверхню), теплообмінники для підведення 3 та відведення 8 теплового потоку до/від термоелектричної батареї 6, теплову ізоляцію 5, ємність з водою 10, електронний пристрій стабілізації вихідної напруги з акумулятором електричної енергії 11. У моделі також враховані теплові контактні опори 2, 4, 7 та 9: між джерелом тепла (нагрітою поверхнею) і гарячим теплообмінником – K_1 ; між гарячим теплообмінником і термоелектричною батареєю – K_2 ; між термоелектричною батареєю і холодним теплообмінником – K_3 ; між холодним теплообмінником та ємністю з водою – K_4 .

На рис. 1: Q_1 – тепло, що надходить до гарячого теплообмінника від джерела тепла; Q_2 – втрати тепла з бічної поверхні гарячого теплообмінника в оточуюче середовище шляхом випромінювання та конвекції; Q_3 – тепло, що надходить до гарячої сторони термоелектричної батареї від гарячого теплообмінника; Q_4 – втрати тепла з бічної поверхні термоелектричної батареї; Q_5 – тепло, що надходить від холодної сторони термоелектричної батареї до холодного теплообмінника; Q_6 – тепло, що передається від бічної поверхні холодного теплообмінника в оточуюче середовище шляхом випромінювання та конвекції; Q_7 – тепло, що передається від холодного теплообмінника до ємності з водою; Q_8 – тепло, що передається від бічної поверхні ємності з водою в оточуюче середовище шляхом випромінювання та конвекції; Q_9 – тепло, що передається від ємності з водою в оточуюче середовище шляхом випаровування; P – електрична потужність термоелектричної батареї.

Термоелектричний генератор може мати два режими роботи:

- 1) розігрів води у ємності до температури кипіння та поступове зменшення кількості води через випаровування;
- 2) розігрів води у ємності до температури кипіння та її заміна на воду з кімнатною температурою.

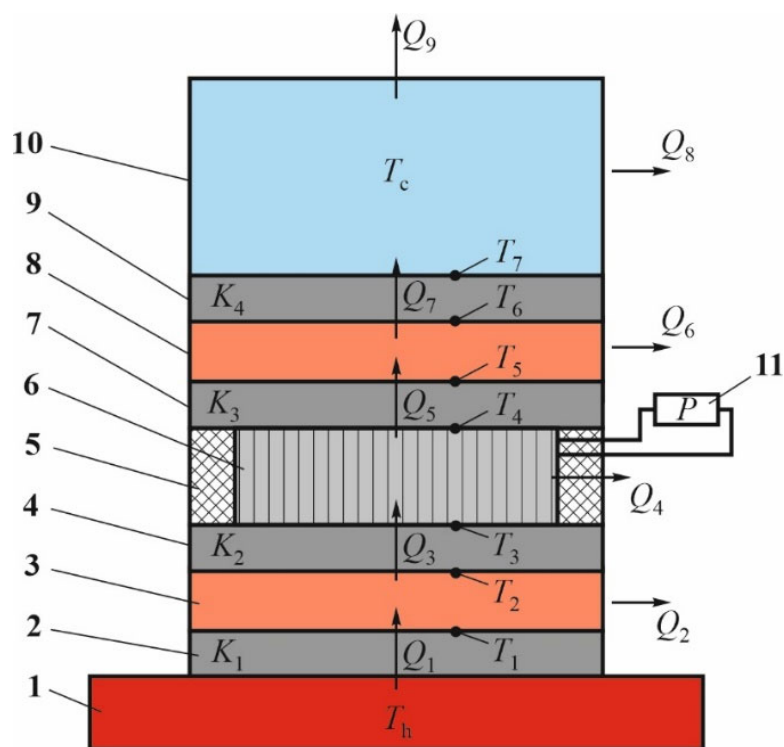


Рис. 1 Фізична модель окопного термоелектричного генератора:
 1 – джерело тепла (нагріта поверхня); 2, 4, 7, 9 – теплові контактні опори;
 3 – гарячий теплообмінник; 5 – теплова ізоляція; 6 – термоелектрична батарея;
 8 – холодний теплообмінник; 10 – ємність з водою;
 11 – електронний пристрій стабілізації вихідної напруги
 з акумулятором електричної енергії.

Оскільки вважається, що генератор вмонтований на нагрітій поверхні з постійною температурою T_h , процеси теплообміну між реальним джерелом горіння палива та цією поверхнею не розглядаються.

Математичний і комп'ютерний описи моделі

Для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до його фізичної моделі (рис. 1) використано систему рівнянь теплового балансу:

$$\begin{cases} Q_1 = Q_2 + Q_3, \\ Q_3 = P + Q_4 + Q_6 + Q_8 + Q_9. \end{cases} \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термобатареї та відведення тепла від її холодних спаїв до холодного теплообмінника здійснюється за рахунок теплопровідності та описується рівняннями:

$$Q_3 = \frac{\kappa_h S_h}{l_h} (T_2 - T_3), \quad (2)$$

$$Q_7 = \frac{\kappa_c S_c}{l_c} (T_6 - T_7), \quad (3)$$

де: κ_h , κ_c – теплопровідність матеріалу гарячого і холодного теплообмінників; l_h , l_c , S_h , S_c – товщина та площа гарячого і холодного теплообмінників.

Теплова потужність Q_5 відводиться від холодної сторони термоелектричної батареї холодним теплообмінником, що представляє собою ємність з водою.

При цьому для розрахунку коефіцієнту теплообміну при кипінні можуть бути використані різні наближені формули, що добре співпадають з експериментальними даними [11]. Зокрема, у роботі [12] наведено наступний підхід до розрахунку коефіцієнту теплообміну при кипінні

$$h_{\text{кип}} = \frac{q}{\Delta T}, \quad (4)$$

де q – густина теплового потоку на поверхні розділу фаз тверде тіло-рідина; ΔT – температурний напір між поверхнею T_2 і рідиною T_1 ,

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (5)$$

Вважається, що густина теплового потоку на стінці:

$$q_c = q_{\text{конв}} + q_{\text{пароут}}, \quad (6)$$

де $q_{\text{конв}}$ – враховує перенесення теплоти конвекцією однофазної рідини; $q_{\text{пароут}}$ – враховує перенесення теплоти бульбашками пари, що відриваються від стінки.

Густина теплового потоку, що відповідає перенесенню теплоти бульбашками пари дорівнює:

$$q_{\text{пароут}} = V \rho_n r \frac{N_z}{\Delta F} f, \quad (7)$$

де: V – середній об'єм бульбашки в момент відриву від поверхні нагріву; ρ_n – густина пари на лінії насичення; N_z – число діючих центрів пароутворення на площі ΔF ; f – середня частота відриву парових бульбашок; r – теплота пароутворення.

Припускаючи, що основна кількість теплоти передається за рахунок кипіння, а вплив конвекції враховується введенням поправки, можна записати:

$$q_c = q_{\text{конв}} + q_{\text{пароут}} = q_{\text{пароут}} \varepsilon = V \rho_n r \frac{N_z}{\Delta F} f \varepsilon, \quad (8)$$

де, ε – поправка на $q_{\text{конв}}$, яка враховує частку теплоти, що переноситься конвекцією.

Підставивши значення $V = \frac{\pi}{6} d_0^3$ і зробивши деякі перестановки, одержимо:

$$\frac{q_c}{r \rho_n f d_0} = \frac{\pi}{6} \frac{N_z}{\Delta F} d_0^2 \varepsilon \quad (9)$$

Тут ліва частина рівності – відношення середньої швидкості пароутворення $\frac{q_c}{r \rho_n}$ (ця величина має розмірність м/с) до середньої швидкості росту парових бульбашок $d_0 f = w''$.

У цілому залежність для розрахунку коефіцієнту теплообміну матиме вигляд [12]:

$$\frac{h_{\text{кип}} \delta}{\lambda_p} = 75 \left(\frac{q_c}{r p_n f d_0} \right)^{0.7} \left(\frac{v_p}{a_p} \right)^{-0.2}, \quad (10)$$

де δ – характерний розмір, у цьому випадку – капілярна постійна Лапласа

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}. \quad (11)$$

Середня швидкість росту парових бульбашок визначається залежністю:

$$w'' = w_n = d_0 f = 0.36 \cdot 10^{-3} \Pi^{1.4}, \quad (12)$$

де $\Pi = \frac{P_{\text{кр}}}{P}$; визначальна температура $t_{\text{визн}} = t_p = t_{\text{нас}}$.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричною батареєю пропорційна Q_3 та ККД термобатареї η

Основні втрати тепла:

- з бічної поверхні гарячого теплообмінника шляхом конвекції та випромінювання

$$Q_2 = h_h A_h \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_0 \right) + \varepsilon_h \sigma_{C-B} A_h \left(\left(\frac{T_2 + T_3}{2} \right)^4 - T_0^4 \right), \quad (13)$$

де: h_h – коефіцієнт теплообміну конвекцією між бічною поверхнею гарячого теплообмінника і оточуючим середовищем; A_h – площа бічної поверхні гарячого теплообмінника; ε_h – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні гарячого теплообмінника; σ_{C-B} – постійна Стефана-Больцмана.

- з бічної поверхні термоелектричної батареї через теплову ізоляцію

$$Q_4 = \frac{\kappa_{i3} S_{i3}}{l_{i3}} (T_4 - T_5), \quad (14)$$

де: κ_{i3} – теплопровідність ізоляційного матеріалу; S_{i3} – площа поверхні гарячого теплообмінника, яка не зайнята термоелектричною батареєю; l_{i3} – товщина шару теплоізоляції.

Електрична потужність P , яка генерується термоелектричною батареєю, пропорційна Q_3 та ККД термобатареї η та визначається, в першу чергу, робочими температурами термобатареї T_4 та T_5 , а також властивостями термоелектричного матеріалу, з якого вона виготовлена.

Розв'язок системи рівнянь (1) з врахуванням формул (2) – (15) дає можливість визначити основні енергетичні та конструктивні параметри термоелектричного генератора для різних властивостей термоелектричного матеріалу, конструкцій генератора та режимів його експлуатації.

При цьому для комп'ютерного представлення математичної моделі термоелектричної батареї використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [13]. Для цього необхідно представити рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (15)$$

й електричного заряду

$$\text{div} \vec{j} = 0, \quad (16)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (17)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (18)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (19)$$

Тут $\vec{E}$ – густина потоку енергії, $\vec{q}$ – густина теплового потоку, $\vec{j}$ – густина електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α , σ , κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

З рівнянь (17) – (19), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (20)$$

Тоді закони збереження (15), (16) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla[(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (21)$$

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (22)$$

З розв'язку рівнянь (21) – (22) можна одержати розподіли фізичних полів, а також значення ефективності та потужності термоелектричної батареї в залежності від термоелектричних властивостей матеріалу термоелектричної батареї та температурних режимів її роботи, отриманих при розв'язанні теплової частини моделі.

Ця інформація є основою для створення спеціалізованих термоелектричних модулів на основі оптимізованих для різних режимів їх експлуатації термоелектричних матеріалів. Істотне зменшення вартості термоелектричних генераторів може бути досягнуте, зокрема, за рахунок створення та застосування оптимізованих функціональних термоелектричних матеріалів; використання плоских екструдованих термоелектричних матеріалів тощо. При цьому оптимізацію матеріалу зазвичай виконують експериментально. Для цього різними методами виготовляють зразки різного хімічного складу та з різною концентрацією домішок в очікуваному інтервалі її значень. Отриманий таким чином набір термоелектричних матеріалів піддається вимірюванням σ , α , κ у потрібних інтервалах температур. Результати вимірювань дають інформацію, яка використовується для коректування вихідного хімічного складу та концентрації домішок і, відповідно, знаходження їх оптимальних значень. Вирішальну роль при цьому відіграватиме точність вимірювань та їх швидкодія [14, 15].

Висновки

1. Наведено фізичну модель окопного термоелектричного генератора, призначеного для живлення малопотужної військової та цивільної апаратури, а також математичний та комп'ютерний опис цієї моделі.
2. Створена комп'ютерна модель дозволяє визначати динамічну та усереднену потужності термоелектричного генератора, проводити проектування конструкції генератора з спеціалізованими термоелектричними модулями на основі оптимізованих для різних режимів їх експлуатації термоелектричних матеріалів.

Література

1. Pat. CN216524233U. Thermoelectric water kettle water level detection circuit. Published 13.05.2022.
2. Pat. CN105167597B. A kind of thermo-electric generation hot-water bottle. Published 02.01.2018.
3. Pat. CN209391675U. A kind of heating vessel. Published. 17.09.2019.
4. Pat. CN208806757U. Thermo-electric generation wild cooker. Published. 30.04.2019.
5. Pat. GB2605345A. Cooking vessel. Published 28.09.2022.
6. Montecucco A. & Siviter J. & Knox A.R. (2017). Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Applied Energy*, Elsevier, 185(P2), 1336-1342. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.132.
7. Żołądek Maciej, Papis Karolina, Kuś Jakub, Zając Michał, Figaj Rafał and Rudykh Kyrylo (2020). The use of thermoelectric generators with home stoves. *E3S Web Conf.*, 173 (2020) 03005. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017303005>.
8. Wood stove thermoelectric generator rabbit ears. Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
9. 45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
10. Thermoelectric power generator for fireplace heater. Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.
11. Є.В. Шевель, М.В. Воробйов. Теплообмін при кипінні: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 55 с.
12. Толубінський, В.І. Теплообмін під час кипіння. / В.І. Толубинський. – Київ: Наукова думка, 1980. – 316 с.
13. COMSOL Multiphysics User's Guide. COMSOLAB, 2010. – 804 p.
14. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2019). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. Chernivtsi: Bukrek.
15. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, 43 (10), 3863 – 3869.

Надійшла до редакції: 13.02.2023.

Anatychuk L.I., Acad. NAS Ukraine^{1,2}
Lysko V.V., Cand. Sc (Phys & Math)^{1,2}

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

² Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine e-mail: anatych@gmail.com

ON THE DESIGN OF A TRENCH THERMOELECTRIC SOURCE OF HEAT AND ELECTRICITY

The article presents physical and mathematical models of a trench thermoelectric source of heat

and electricity intended for heating the military and powering low-power military equipment, mobile and special communications systems, charging batteries and lighting, providing heat and minimal electrical energy to the civilian population in places where the energy infrastructure has been destroyed, as well as in non-electrified areas outside the combat zone. A computer model has been created for designing the structure of such a heat and electricity source, as well as optimizing the thermoelectric material it is made of, for various operating modes. Bibl. 15, Figs. 1.

Key words: thermoelectric source of heat and electricity, physical model, efficiency, cyclic mode.

References

1. Pat. CN216524233U. Thermoelectric water kettle water level detection circuit. Published 13.05.2022.
2. Pat. CN105167597B. A kind of thermo-electric generation hot-water bottle. Published 02.01.2018.
3. Pat. CN209391675U. A kind of heating vessel. Published. 17.09.2019.
4. Pat. CN208806757U. Thermo-electric generation wild cooker. Published. 30.04.2019.
5. Pat. GB2605345A. Cooking vessel. Published 28.09.2022.
6. Montecucco A. & Siviter J. & Knox A.R. (2017). Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators. *Applied Energy*, Elsevier, 185(P2), 1336-1342. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.132.
7. Żołądek Maciej, Papis Karolina, Kuś Jakub, Zajac Michal, Figaj Rafal and Rudykh Kyrylo (2020). The use of thermoelectric generators with home stoves. *E3S Web Conf.*, 173 (2020) 03005. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017303005>.
8. Wood stove thermoelectric generator rabbit ears. Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
9. 45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling. Retrieved from: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
10. Thermoelectric power generator for fireplace heater. Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.
11. Shevel E.V., Vorobyov M.V. (2021). *Teploobmin pry kypinni: navchalnyi posibnyk [Heat transfer during boiling: a tutorial]*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI.
12. Tolubinskii V.I. (1980). *Teploobmen pri kipenii [Heat transfer during boiling]*. Kyiv: Naukova dumka
13. COMSOL Multiphysics User's Guide. COMSOLAB, 2010. – 804 p.
14. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2019). *Thermoelectricity: Vol. 5. Metrology of Thermoelectric Materials*. Chernivtsi: Bukrek.
15. Anatychuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, 43 (10), 3863 – 3869.

Submitted: 13.02.2023.