

Іваночко М.М., канд. фіз.-мат. наук²
Константинович І.А., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Кадельник К.О.^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

ПРО ПРОЄКТУВАННЯ ПОРТАТИВНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

Наведено фізичну та математичну моделі портативного універсального термоелектричного генератора, призначеного для живлення малопотужної апаратури, систем мобільного та спеціального зв'язку, зарядки акумуляторів та освітлення, забезпечення мінімальною електричною енергією цивільного населення в місцях, де зруйнована енергетична інфраструктура, а також у неелектрифікованих районах. Розглянуто рішення спрощених задач теплообміну в одношарових та багатошарових структурах в стаціонарних та нестаціонарних умовах. Створено комп'ютерну модель для проєктування конструкції портативного універсального термоелектричного генератора, а також оптимізації термоелектричного матеріалу, з якого його виготовлено, для різних режимів експлуатації. Бібл. 17, рис. 7.

Ключові слова: джерело тепла та електрики, термоелектричний генератор, фізична модель, ефективність, джерело тепла.

Вступ

На сьогодні для живлення апаратури, у тому числі і військової, в польових умовах, зазвичай використовуються хімічні джерела струму. Проте їх основними недоліками є схильність до саморозряду та низька надійність, особливо за низьких температур навколишнього середовища та в умовах значних механічних навантажень. Переносні мініелектростанції виявляються малопридатними в польових умовах через великі розміри й вагу, необхідність у пальному, яке часто недоступне, а також через створюваний ними шум. Тому особливо актуальним є пошук нових і розробка вже існуючих конструкцій автономних джерел тепла та електрики, які б відповідали даним вимогам, були компактними, зручними у використанні та придатними для застосування у польових умовах.

Перспективним рішенням у цьому контексті є автономні термоелектричні джерела живлення, які працюють на тепло від спалювання будь-якого пального. Такі джерела мають тривалий ресурс роботи, високу надійність, стійкість до кліматичних умов та механічних впливів, а також є універсальними, безшумними та простими в експлуатації. У розробці подібних систем беруть участь науковці та інженери багатьох країн світу. Зокрема, термоелектричні генератори потужністю 2–20 Вт для зарядки мобільних телефонів, навігаторів та інших пристроїв під час туристичних походів розроблені закордонними компаніями, такими як TES, Power Pot та Biolite [1–5]. Також створені термоелектричні генератори, що використовують тепло

печей на твердому паливі, які серійно виробляються закордонними підприємствами [6–11]. Однак ці генератори є дорогими, призначені переважно для побутових потреб і мають ряд недоліків.

Основною перешкодою для широкого впровадження таких пристроїв залишається висока вартість, зумовлена дороговизною термоелектричних матеріалів. Таким чином, важливими завданнями є проведення досліджень, спрямованих на зниження собівартості матеріалів, розробка доступних автономних термоелектричних джерел енергії та створення оптимальних конструкцій, адаптованих до специфічних умов експлуатації.

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 портативного універсального термоелектричного генератора

У загальному випадку конструкція портативного універсального термоелектричного генератора представлена на рис. 1. Вона складається з наступних частин: джерело тепла (1) (нагріта поверхня); «гарячий» теплообмінник (2); термоелектричні генераторні модулі (3); «холодний» теплообмінник (4); ємність з водою (5); вода (6); високотеплопровідна паста (7, 13); керамічні пластини (8, 12); комутаційні пластини (9, 11); вітки термоелектричного матеріалу n - та p -типів (10); струмовиводи термоелектричних модулів (14).

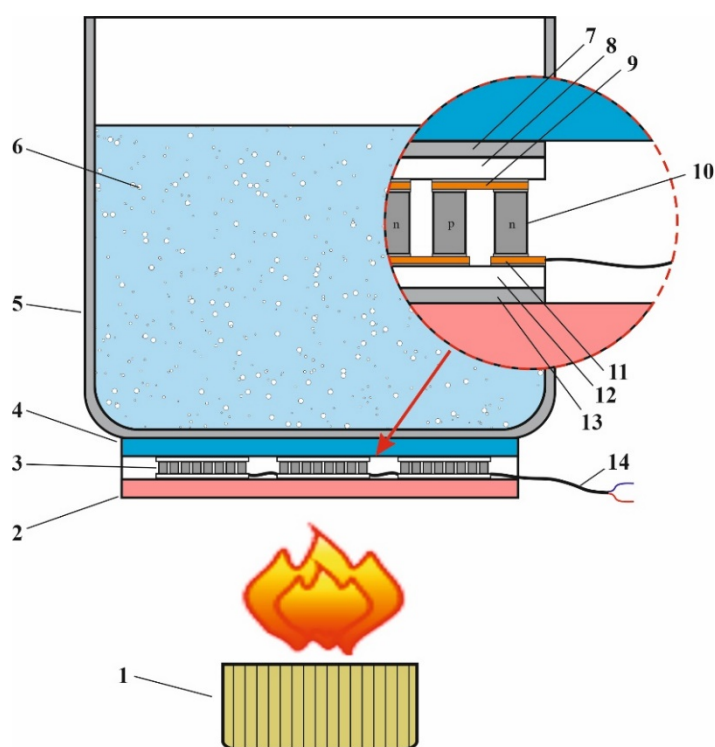


Рис. 1. Конструкція портативного універсального термоелектричного генератора:
1 – джерело тепла (нагріта поверхня); 2 – «гарячий» теплообмінник; 3 – термоелектричні генераторні модулі; 4 – «холодний» теплообмінник; 5 – ємність з водою; 6 – вода; 7, 13 – високотеплопровідна паста; 8, 12 – керамічні пластини; 9, 11 – комутаційні пластини; 10 – вітки термоелектричного матеріалу n - та p -типів; 14 – струмовиводи термоелектричних модулів.

Фізична модель портативного універсального термоелектричного генератора представлена на рис. 2, де 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; P – електрична потужність термоелектричної батареї.

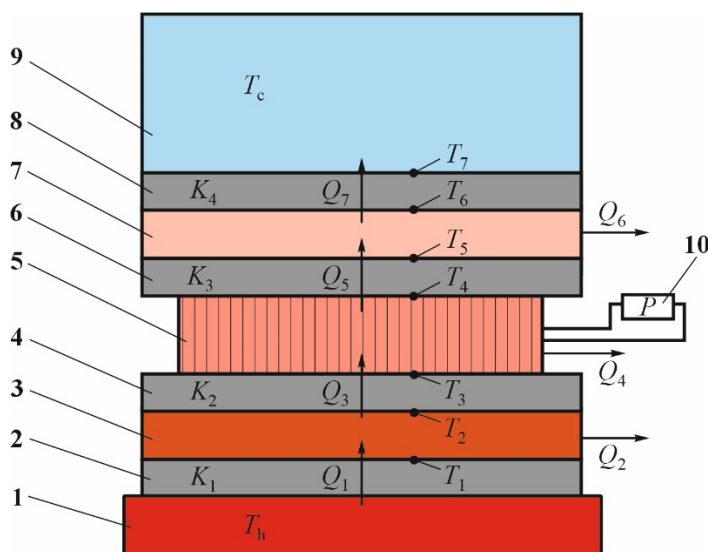


Рис. 2. Фізична модель портативного універсального термоелектричного генератора:

1 – джерело тепла (нагріта поверхня); 2, 4, 6, 8 – теплові контактні опори; 3 – гарячий теплообмінник; 5 – термоелектрична батарея; 7 – холодний теплообмінник; 9 – ємність з водою; 10 – електронний пристрій стабілізації вихідної напруги з акумулятором електричної енергії.

Термоелектричний генератор може мати два режими роботи:

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

Теплопередачею у розглядуваній задачі є типовий для практики теплообмін між двома середовищами через тверду стінку (частіше багатошарову), яка їх розділяє. Цей процес теплопередачі включає тепловіддачу (здебільшого випромінюванням) від першого середовища до поверхні стінки, включає в себе теплопровідність крізь стінку і далі тепловіддачу (теж частіше випромінюванням) від протилежної поверхні до іншого середовища.

Явища переносу теплоти розглядаються на основі феноменологічного методу, в якому розглядаються співвідношення між параметрами, котрі в цілому характеризують розглядуване явище, без врахування мікроструктури середовища, в якому відбувається процес.

Задача з оптимізації даної конструкції портативного універсального термоелектричного генератора є багатопараметричною і надзвичайно складною для рішення в загальному випадку, тому далі в роботі розглядаються спрощені моделі та перехід від простих задач до складніших.

Теплопровідність при стаціонарному режимі

1. Передача теплоти через пласку стінку за відсутності внутрішніх джерел тепла ($q_v = 0$)

Розглянемо процес теплопередачі через пласку однорідну ізотропну стінку товщиною δ з постійним коефіцієнтом теплопровідності λ . Температури на поверхнях стінок постійні $T_{Cm1} > T_{Cm2}$. Тепловий потік q напрямлений вздовж осі Ox , направленої перпендикулярно до площини стінки, а тому температура змінюватиметься тільки вздовж Ox , залишаючись постійною в напрямках Oy і Oz .

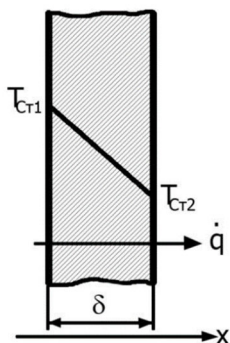


Рис. 3. Розподіл температур в пласкій стінці.

Стаціонарним рівнянням теплопровідності в даному випадку є рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Температура змінюється тільки вздовж осі Ox , тому $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$, $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$, тоді

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Проінтегрувавши це диференційне рівняння, отримаємо

$$T = C_1 x + C_2. \quad (3)$$

Рівняння (2) – це рівняння прямої, отже, температура в пласкій стінці змінюється по лінійному закону.

Задамо граничні умови першого роду в цій задачі:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } x = 0 \quad T = T_{Cm1} \\ \text{при } x = \delta \quad T = T_{Cm2} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Тоді рівняння прямої, яке описує розподіл температур у пласкій стінці, матиме вигляд:

$$T = -\frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\delta} x + T_{Cm1}. \quad (5)$$

Рівняння (5) уможливує розрахувати температуру в довільній точці стінки. Запишемо закон Фур'є для розрахунку теплопровідності через пласку стінку:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (6)$$

В даному випадку:

$$\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \frac{\partial T}{\partial x} = C_1 = -\frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\delta}, \quad (7)$$

тоді

$$q = \lambda \frac{T_{cm1} - T_{cm2}}{\delta}. \quad (8)$$

Необхідно відзначити, що тепловий потік визначається не абсолютним значенням температур, а їх різницею $T_{Cm1} - T_{Cm2} = \Delta T$, яку прийнято називати температурним напором.

Або для загальної кількості переданої теплоти:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} F (T_{Cm1} - T_{Cm2}). \quad (9)$$

Загальна кількість теплоти Q_τ , яка передається через поверхню F стінки за проміжок часу τ :

$$Q_\tau = qF\tau = \frac{\lambda}{\delta} F (T_{Cm1} - T_{Cm2})\tau. \quad (10)$$

Рівняння (9) описує процес перенесення теплоти теплопровідністю в одношаровій пласкій стінці в стаціонарному режимі. Відношення λ/δ , Вт/(м²×К) називається тепловою провідністю стінки, а обернена величина – тепловим або термічним опором стінки.

2. Теплопровідність багатшарової пласкої стінки

Розглянемо процес стаціонарної теплопровідності через трьохшарову пласку стінку. Шари різної товщини ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$), які прилягають щільно один до одного і мають різні значення теплопровідності ($\lambda_{T1}, \lambda_{T2}, \lambda_{T3}$). Оскільки процес стаціонарний, то $q = const$ і напрямлений вздовж осі Ox .

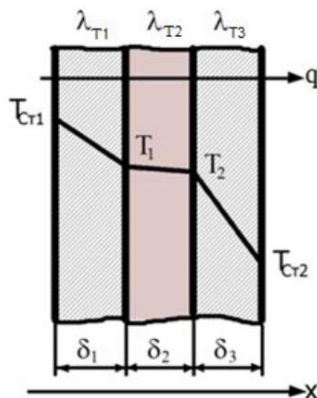


Рис. 4. Розподіл температур в багатшаровій пласкій стінці

Приймаємо, що на поверхнях зовнішніх площин температури T_{Cm1} і T_{Cm2} , причому $T_{Cm1} > T_{Cm2}$, а між шарами температури T_1 і T_2 .

По аналогії до (8) запишемо рівняння переносу тепла через кожний шар структури:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_{Cm1} - T_1), \quad (11)$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_1 - T_2), \quad (12)$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (T_2 - T_{Cm2}). \quad (13)$$

З останньої системи рівнянь визначимо тепловий потік q через шарову пласку стінку:

$$q = \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (14)$$

Величини $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – термічні опори окремих шарів, які утворюють багат шарову стінку.

Рівняння теплопровідності при встановленому процесі теплообміну матиме вигляд:

$$\dot{Q} = F \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = F \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (15)$$

В кожному шарі по товщині температура змінюється лінійно, в цілому, профіль температур має вигляд ламаної лінії, причому на рис. 4 $\lambda_{T_2} > \lambda_{T_1} > \lambda_{T_3}$.

Задача моделювання нестационарних процесів поширення тепла у циліндричній шаруватій структурі

Постановка задачі: Необхідно записати рівняння теплопровідності та сформулювати граничні умови для моменту часу $\tau > 0$ для розв'язування нестационарної теплової задачі в області, яка є трьохшаровою суцільною однорідною областю кругового циліндра з радіусом R , різних товщин δ_i ($i = 1, 2, 3$) шарів з різними теплопровідностями λ_i ($i = 1, 2, 3$) та густинами середовищ ρ_i ($i = 1, 2, 3$) кожен в ній.

Задача вважається циліндрично симетричною, а тому розв'язок задачі не залежатиме від азимутального кута ϕ .

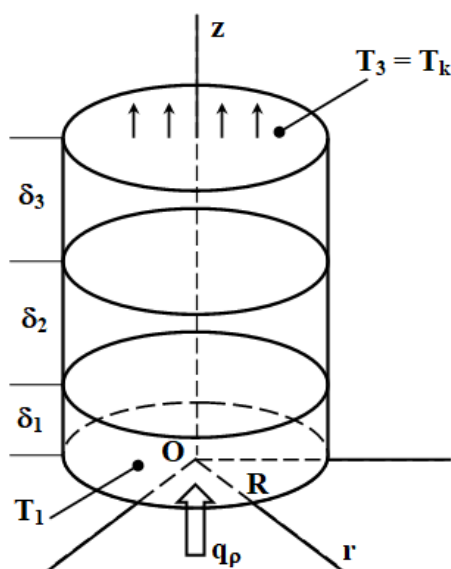


Рис. 5. Модель циліндричної трьохшарової структури

В початковий момент часу $\tau = 0$ до нижньої основи першого ($i = 1$) шару циліндричної області при $z = 0$ (в циліндричних координатах r, ϕ, z) підводиться потік тепла \bar{q} , потужність якого є такою, що ця основа по закону Ньютона нагрівається до температури $T \sim 300 - 400^\circ\text{C}$.

Тепло поширюється з часом $\tau > 0$ всередину циліндричної структури вздовж вісі Oz , напрямленої по осі циліндричної шаруватої структури, через границі шарів $z = \delta_1$ та $z = \delta_1 + \delta_2$, а на поверхні при $z = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ останнього третього верхнього шару при досягненні нею температури $T_k = 100^\circ\text{C}$, тепло від цієї поверхні відводиться, так що її температура залишається сталою з часом T_k .

Теплообміном бічних поверхонь структури з оточуючим середовищем конвекцією знехтуємо через малу площу бічних поверхонь порівняно з площами поверхонь шарів.

1) Рівняння теплопровідності

Для кожного шару $i = 1, 2, 3$ задача описується рівнянням теплопровідності в нестационарному вигляді

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (16)$$

де $T_i(r, z, \tau)$ – температура в i -му шарі; λ_i, ρ_i, c_i – відповідно, теплопровідність, густина, теплоємність для i -го шару; τ – час.

2) Граничні умови:

Нижня основа ($z = 0, i = 1$).

Нагрівання нижньої основи відбувається за законом Ньютона завдяки заданому потоку тепла q_p :

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = q_p, \quad T_1|_{z=0} \approx 300^\circ\text{C} \div 400^\circ\text{C} \quad (17)$$

Межі між шарами ($z = \delta_1, z = \delta_1 + \delta_2$).

Умова безперервності температури та теплового потоку на межах між сусідніми шарами:

$$T_i = T_{i+1}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}. \quad (18)$$

Верхня поверхня ($z = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$).

Температура на цій поверхні підтримується сталою $T_k = 100^\circ\text{C}$.

$$T_3|_{z=\delta_1+\delta_2+\delta_3} = T_k. \quad (19)$$

Бічна поверхня ($r = R$).

Знехтувано тепловим обміном через бічні поверхні шарів так як площі цих поверхонь малі порівняно з площею поверхонь шарів структури. Тому приймається умова:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (20)$$

3) Початкова умова

На початку ($\tau = 0$) температура в усій області рівномірна:

$$T_i(r, z, 0) = T_{\text{поч}}, \quad (21)$$

де $T_{поч}$ – початкова температура, що відповідає кімнатній або іншій заданій температурі.

Температура $T(r, z, \tau)$ є функцією лише r, z, τ через циліндричну симетрію поставленої задачі, а тому розв'язок задачі не залежить від азимутального кута ϕ .

Умови на межах шарів описують як фізичну безперервність, так і враховують зміну теплопровідності між матеріалами.

Наше завдання визначити температурне поле $T(r, z, \tau)$ для всіх трьох шарів при заданих властивостях (λ_i, ρ_i, c_i) , геометричних параметрах $(R, \delta_1, \delta_2, \delta_3)$ та теплових потоках.

Аналітичний розв'язок нестационарної задачі поширення тепла у циліндричній шаруватій структурі

Рівняння теплопровідності (16) розв'яжемо методом розділення змінних. Розв'язок шукаємо у вигляді:

$$T_i(r, z, \tau) = T_{r,i}(r)T_{z,i}(z)T_{\tau,i}(\tau), \quad (22)$$

де $T_{r,i}(r)$, $T_{z,i}(z)$, $T_{\tau,i}(\tau)$ – окремі функції від r , z та τ . Це дозволяє розв'язати задачу методом розділення змінних.

Для радіальної компоненти в циліндричній системі координат отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial^2 T_{r,i}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r,i}}{\partial r} = -\lambda_{r,i} T_{r,i}. \quad (23)$$

Розв'язками такого рівняння є модифіковані функції Бесселя I_0 та K_0 .

Для компоненти вздовж осі Oz рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 T_{z,i}}{\partial z^2} = -\lambda_{z,i} T_{z,i}, \quad (24)$$

рішення якого є експоненційними функціями:

$$T_{z,i}(z) = C_1 e^{kz} + C_2 e^{-kz}. \quad (25)$$

Для часової компоненти $T_{\tau,i}(\tau)$ рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial T_{\tau,i}}{\partial \tau} = -\lambda_{\tau,i} T_{\tau,i}, \quad (26)$$

рішення якого теж є експоненційними функціями:

$$T_{\tau,i}(\tau) = A e^{-\alpha \tau}. \quad (27)$$

Граничні умови

Розв'язки повинні задовольняти граничні умови на межах середовищ:

- Нижня основа ($z = 0$):

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = q_p. \quad (28)$$

Це накладає умову на коефіцієнти C_1 та C_2 для розв'язку $T_{z,i}(z)$ з (25).

- Межі між шарами ($z = \delta_1, \delta_1 + \delta_2$):

$$T_i = T_{i+1}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}. \quad (29)$$

З цих умов визначаються коефіцієнти узгодження температури та теплових потоків на межах.

- Верхня поверхня ($z = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$):

$$T_3 = T_k = 100^\circ\text{C} \text{ (частковий випадок)}. \quad (30)$$

З рівняння теплового балансу $P \cdot t = m \cdot c(T(t) - T_0)$, знаходимо залежність $T(t)$ в загальному випадку:

$$T(t) = \begin{cases} T_0 + \frac{P \cdot t}{m \cdot c}, & \text{якщо } T(t) < T_{\text{кин}} \\ T_{\text{кин}}, & \text{якщо } T(t) \geq T_{\text{кин}} \end{cases} \quad (31)$$

Повний розв'язок

Загальний розв'язок задачі є сумою часткових рішень, а тому остаточно аналітичний розв'язок поставленої задачі має вигляд нескінченного збіжного ряду:

$$T_i(r, z, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} [A_{n,i} I_0(k_{r,n} r) + B_{n,i} K_0(k_{r,n} r)] \cdot (C_{n,i} e^{k_{z,n} z} + D_{n,i} e^{-k_{z,n} z}) e^{-\alpha_n \tau}. \quad (32)$$

Коефіцієнти ряду $A_{n,i}$, $B_{n,i}$, $C_{n,i}$, $D_{n,i}$ визначаються з початкової $T_i(r, z, 0) = T_{\text{поч}}$ та граничних умов.

Задача нестационарної теплопровідності обмеженого шаруватого циліндра, поміщеного у середовище зі змінною в часі температурою, розв'язується числовими методами. Рішення нелінійної нестационарної задачі методом кінцевих елементів є складним завданням, яке передбачає використання чисельних методів для вирішення диференціальних рівнянь теплопровідності. Розробка раціональних методик та алгоритмів чисельного вирішення нестационарних завдань теплофізики зі значною температурною залежністю теплофізичних властивостей є надзвичайно важливою та актуальною.

Комп'ютерне проектування портативного універсального термоелектричного генератора

Для складніших випадків, з врахуванням теплообміну з оточуючим середовищем, температурних залежностей параметрів моделі і інших факторів, доцільно використовувати комп'ютерне моделювання. Далі розглянуто розподіл температур у генераторі знаходився за допомогою пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics [12], рівняння теплопровідності для кожного елемента фізичної моделі записано у вигляді

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q = Q, \quad (33)$$

де ρ – густина, C_p – теплоємність матеріалу, κ – теплопровідність, u – швидкість руху середовища, яка в досліджуваній задачі рівна нулю, T – температура, Q – зовнішній тепловий потік.

На рис. 6 представлені залежності температур на «гарячій» (синя крива) та «холодній» (зелена крива) сторонах термоелектричного перетворювача від часу. Результати отримані з використанням параметрів термоелектричних перетворювачів енергії, отриманих експериментально [13-17].

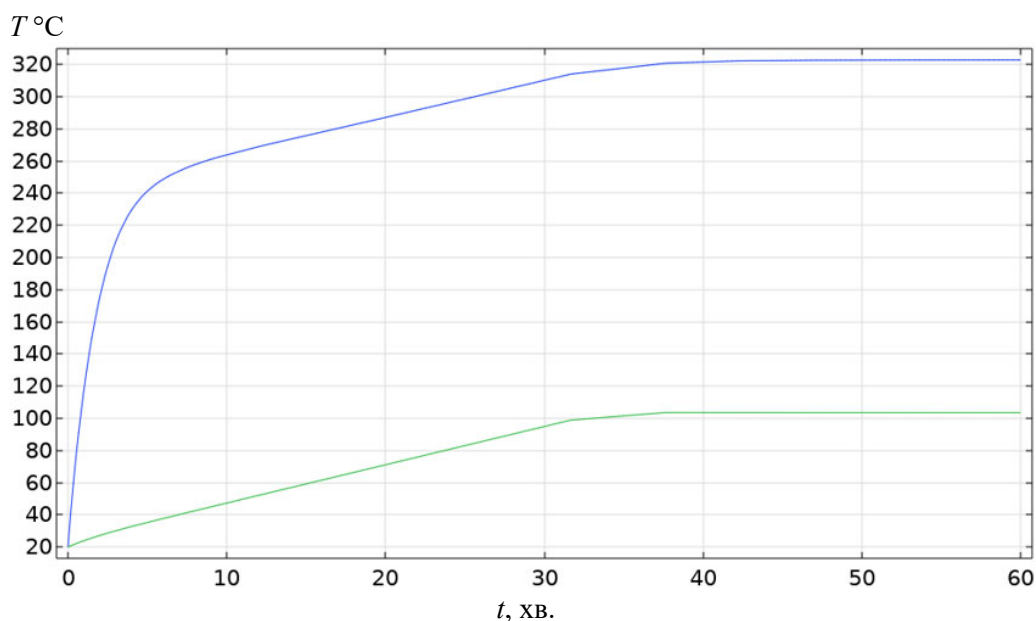


Рис. 6. Залежність температур на «гарячій» (синя крива) та «холодній» (зелена крива) сторонах термоелектричного перетворювача від часу.

А на рис. 7 представлено розподіл температури у портативному універсальному термоелектричному генераторі в момент часу $t = 3600$ с, отриманого за допомогою пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics.

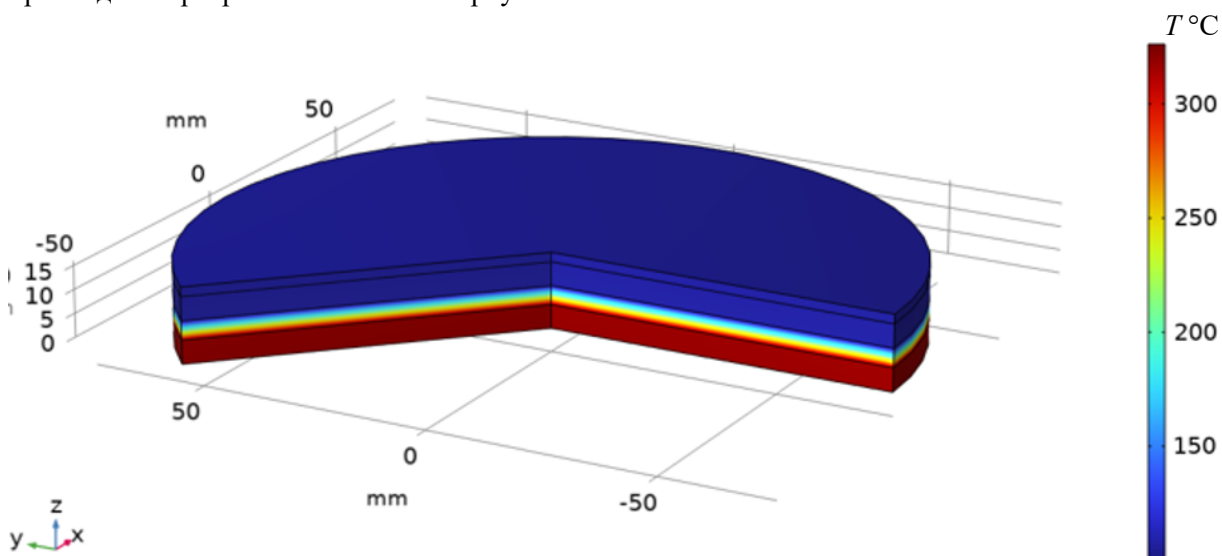


Рис. 7. Розподіл температури у портативному універсальному термоелектричному генераторі в момент часу $t = 3600$ с.

Результати даної статі будуть враховані при виготовленні реальної конструкції портативного універсального термоелектричного генератора.

Автори висловлюють подяку Лиську В.В. за корисні поради та слушні зауваження під час підготовки даної роботи.

Висновки

1. Наведено фізичну модель портативного універсального термоелектричного генератора, призначеного для живлення малопотужної апаратури, а також математичний та комп'ютерний опис цієї моделі. Розглянуті рішення спрощених задач теплообміну в

одношарових та багатошарових структурах в стаціонарних та нестационарних умовах.

2. Створена комп'ютерна модель дозволяє визначати динамічну та усереднену потужності портативного універсального термоелектричного генератора, проводити проектування конструкції генератора з спеціалізованими термоелектричними модулями оптимізованими для різних режимів їх експлуатації.

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. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 43–67.
7. 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.
8. 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>.
9. Wood stove thermoelectric generator rabbit ears. Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
10. 45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling. Retrieved from: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
11. Thermoelectric power generator for fireplace heater. Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.
12. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
13. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
14. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lys'ko V.V., Puhantseva O.V., Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *Journal of Thermoelectricity*, 5, 65–72.
15. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Automation and computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 60–70.
16. Havryliuk M.V., Lysko V.V., Rusnak O.S. (2022). Experimental studies of thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric modules. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 24–32.
17. Mykhailovsky V.Y., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. (2017). Research on thermoelements based on *n-PbTe* and *p-TaGS* materials for thermoelectric generator cascade module. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–44.

Надійшла до редакції: 24.01.2024.

М.М. Ivanochko, Cand. Sc (Phys-Math)²
І.А. Konstantynovych, Cand. Sc (Phys-Math)^{1,2}
К.О. Kadelnyk^{1,2}

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

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

ON THE DESIGN OF A PORTABLE UNIVERSAL THERMOELECTRIC GENERATOR

A physical and mathematical model of a portable universal thermoelectric generator designed to power low-power equipment, mobile and special communication systems, charge accumulators and lighting, and provide the civilian population in places where the energy infrastructure is destroyed, as well as in non-electrified areas, with minimal electrical energy is presented. The solution to simplified heat transfer problems in single-layer and multilayer structures in stationary and non-stationary conditions is considered. A computer model has been elaborated for developing the design of a portable universal thermoelectric generator, together with optimizing the thermoelectric material from which it is made, for various operating modes. Bibliography 17, Fig. 7.

Key words: heat and electricity source, thermoelectric generator, physical model, efficiency, heat source.

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. Anatychuk L.I., Lysko V.V., Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 43–67.
7. 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.
8. 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>.
9. Wood stove thermoelectric generator rabbit ears. Retrieved from: <https://thermoelectric-generator.com/product/wood-stove-thermoelectric-generator-rabbit-ears/>.
10. 45-watt teg generator for wood stoves with air-cooling. Retrieved from: <https://www.tegmart.com/thermoelectric-generators/wood-stove-air-cooled-45w-teg>.
11. Thermoelectric power generator for fireplace heater. Retrieved from: http://www.thermonamic.com/pro_view.asp?id=828.

12. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
13. Anatyчук L.I., Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
14. Anatyчук L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lys'ko V.V., Puhantseva O.V., Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *Journal of Thermoelectricity*, 5, 65–72.
15. Anatyчук L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Automation and computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 60–70.
16. Havryliuk M.V., Lysko V.V., Rusnak O.S. (2022). Experimental studies of thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric modules. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 24–32.
17. Mykhailovsky V.Y., Lysko V.V., Antoniuk V.V., Maksymuk M.V. (2017). Research on thermoelements based on *n-PbTe* and *p-TaGS* materials for thermoelectric generator cascade module. *Journal of Thermoelectricity*, (3), 36–44.

Submitted: 24.01.2024.