

# ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у грудні 1993 р.,  
видається 6 разів на рік

---

№ 2

2018

---

## Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

П.І. Баранський

Б.І. Стадник

Л.М. Вихор

О.Я. Лусте

В.В. Лисько

О.І. Рогачова

С.В. Мельничук

А.О. Снарський

## Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

Засновники – Національна академія наук України,  
Інститут термоелектрики Національної академії  
наук та Міністерства освіти і науки України

Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 15496-4068 ПР

Редактори

В.М. Крамар, П.В. Горський, О.Я. Лусте, Т.Г. Подбегаліна

Схвалено до друку Вченою радою Інституту термоелектрики  
Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України

Адреса редакції:

Україна, 58002, м. Чернівці, Головноштамт, а/с 86

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс : +(380-3722) 4 19 17

E-mail: [jt@inst.cv.ua](mailto:jt@inst.cv.ua)

<http://www.jt.inst.cv.ua>

---

Підписано до друку: 25.05.2018 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк  
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

---

Надруковано з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу «Термоелектрика»,  
у типографії видавництва “Букрек”,  
Україна, 58000, м. Чернівці, вул. Радищева, 10.

© Інститут термоелектрики Національної академії  
наук та Міністерства освіти і науки України, 2018

## ЗМІСТ

### **Теорія**

- Горський П.В.* Оцінка електричного та теплового контактних опорів та термоЕРС перехідного контактного шару «термоелектричний матеріал-метал» на основі теорії композитів 5

### **Конструювання**

- Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.* Комп'ютерне моделювання нестационарного температурного впливу на шкіру людини 14
- Анатичук Л.І., Максимук М.В., Прибила А.В., Розвер Ю.Ю.* Термоелектричні генератори з полум'яними джерелами тепла змінної потужності і стабілізаторами температури термобатареї 22
- Зайков В.П., Мещеряков В.І., Журавльов Ю.І.* Вплив середньоб'ємної температури гілок термоелемента на основні параметри, показники надійності та динаміку функціонування термоелектричного теплового насоса 31
- Максимук М.В.* Натурні дослідження термоелектричного передпускового джерела тепла для автомобілів 47
- Кішевецький О.С.* Оцінка ефективності частинного випадку процесів тепломасообміну між тепловими насосами і рухомою речовиною, частина 2 57

### **Термоелектричні вироби**

- Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю.* Розподіл температури в нагрівнику зі змінним по довжині опором у термоелектричному перетворювачі 70
- Кокодий Н.Г., Разіньков В.В.* Термоелектричний матричний приймач оптичного й терагерцевого випромінювання 75

### **Метрологія і стандартизація**

- Анатичук Л.І., Гаверилук М.В., Лисько В.В.* Шляхи підвищення якості вимірів термоелектричних властивостей матеріалів абсолютним методом 87



УДК 537



Горський П.В.

Горський П. В.,<sup>1,2</sup> докт. фіз.-мат. наук

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
e-mail: anatysh@gmail.com;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна e-mail: anatysh@gmail.com

## ОЦІНКА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ТЕПЛОВОГО КОНТАКТНИХ ОПОРІВ ТА ТЕРМОЕРС ПЕРЕХІДНОГО КОНТАКТНОГО ШАРУ «ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ-МЕТАЛ» НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ КОМПОЗИТІВ

*Теоретично досліджено електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС, фактор потужності та термоелектричну добротність перехідного контактного шару «термоелектричний матеріал-метал», зумовленого дифузією частинок металу у напівпровідник без утворення нових фаз. Дослідження виконано на основі теорії композитів на прикладі пари «телурид вісмуту – нікель». Встановлено, що термоелектричні характеристики перехідного контактного шару залежать як від його товщини, так і від режиму створення, за основну характеристику якого взято інтенсивність дифузії металу у напівпровідник. При цьому як від товщини так і від режиму створення істотно залежать електричний і тепловий контактні опори, фактор потужності та добротність перехідного шару, в той час, як термоЕРС не залежить від товщини шару і мало залежить від режиму створення. В інтервалі товщин перехідного шару від 20 до 150 мкм за розглянутих режимів створення електричний контактний опір змінюється в інтервалі від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>, тепловий контактний опір змінюється в інтервалі від 0.674 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, термоЕРС – в інтервалі від 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор потужності – в інтервалі від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), термоелектрична добротність – в інтервалі від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** електричний контактний опір, тепловий контактний опір, термоЕРС, перехідний шар, композит, дифузія, інтенсивність дифузії.

### Вступ

Відомо, що створення контактів термоелектричний матеріал (ТЕМ) – метал у процесі виготовлення термоелектричних перетворювачів енергії може відбуватись в основному двома шляхами: прямого припаювання контактного металу до напівпровідника і зі створенням андидифузійного шару з металу, попередньо гальванічно осадженого на поверхню ТЕМ. У першому випадку припій, який сполучається з ТЕМ, утворює нові фази, питомий опір, теплопровідність, термоЕРС і товщина шару яких в основному і визначають термоелектричні параметри та характеристики перехідного шару [1]. У другому випадку метал андидифузійного шару, дифундує у ТЕМ, в залежності від технології та режимів створення може як

утворювати нові фази з ТЕМ, так і не утворювати їх [2 – 5]. Зазвичай при створенні антидифузійного шару шляхом гальванічного осадження з наступним припаюванням контактного металу метал антидифузійного шару частково дифундує у ТЕМ, а припій може проникати у нього лише внаслідок утворення тріщин у ТЕМ. При цьому метал антидифузійного шару не утворює нових фаз з ТЕМ [5]. Тому для оцінки термоелектричних параметрів перехідного шару у цьому випадку придатна теорія композитів [6]. Така оцінка і є метою даної статті.

### Розрахунок електричного контактного опору та термоЕРС перехідного контактного шару «ТЕМ-метал», зумовлених дифузією металу у ТЕМ, та обговорення отриманих результатів.

Даний розрахунок почнемо з побудови моделі розподілу частинок металу у ТЕМ. Для цього запишемо рівняння одновимірної стаціонарної дифузії за наявності джерела:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} = -Q, \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії металу у ТЕМ,  $n$  – концентрація частинок металу на глибині  $x$ ,  $Q$  – інтенсивність джерела, яким слугує шар металу. За кімнатної температури правомірно вважати, що  $Q$  дорівнює нулеві або є малою додатною величиною. Але у процесі паяння як  $D$  так і  $Q$  внаслідок підвищення температури істотно збільшуються. Якщо товщина шару дорівнює  $d_0$ , то рівняння (1) повинно бути розв'язане за граничних умов  $n(0) = n_0, n(d_0) = 0$ . При переході до безрозмірної змінної  $y = x/d_0$  розв'язок рівняння (1) за вказаних граничних умов матиме вигляд:

$$n(y) = n_0 [1 - (1 - A)y - Ay^2], \quad (2)$$

де безрозмірний параметр  $A = Qd_0^2 / 2Dn_0$  характеризує режим і умови створення контакту.

Перейдемо тепер до розрахунків електричного та теплового контактних опорів, термоЕРС, фактору потужності та термоелектричної добротності перехідного контактного шару. Для цього спочатку, використовуючи співвідношення (2), визначимо об'ємні частки фаз (компонентів), тобто металу  $v_m$  та напівпровідника  $v_s$  у перехідному контактному шарі:

$$v_m = \int_0^1 \frac{(A_m / \rho_m) [1 - (1 - A)y - Ay^2]}{(A_m / \rho_m) [1 - (1 - A)y - Ay^2] + (A_s / \rho_s) [(1 - A)y + Ay^2]} dy. \quad (3)$$

$$v_s = 1 - v_m$$

У цих співвідношеннях  $A_m, A_s, \rho_m, \rho_s$  атомні (молекулярні) маси та густини металу та ТЕМ відповідно.

Подальші розрахунки виконуємо з використанням теорії композитів у наступному порядку. Електропровідність  $\sigma$  та теплопровідність  $k$  перехідного шару знаходимо за формулами:

$$\sigma = 0.25 \left\{ \sigma_s (2 - 3v_m) + \sigma_m (3v_m - 1) + \sqrt{[\sigma_s (2 - 3v_m) + \sigma_m (3v_m - 1)]^2 + 8\sigma_m \sigma_s} \right\}, \quad (4)$$

$$\kappa = 0.25 \left\{ \kappa_s (2 - 3v_m) + \kappa_m (3v_m - 1) + \sqrt{[\kappa_s (2 - 3v_m) + \kappa_m (3v_m - 1)]^2 + 8\kappa_m \kappa_s} \right\}. \quad (5)$$

Електричний  $r_c$  та тепловий  $r_{ct}$  контактні опори знаходимо за формулами:

$$r_c = d_0 / \sigma, \quad (6)$$

$$r_{ct} = d_0 / \kappa. \quad (7)$$

ТермоЕРС перехідного шару визначимо за формулою:

$$\alpha = \frac{\alpha_m \kappa_s v_m + \alpha_s \kappa_m (1 - v_m)}{\kappa_s v_m + \kappa_m (1 - v_m)}. \quad (8)$$

Після цього визначаємо фактор потужності  $P = \alpha^2 \sigma$  та термоелектричну добротність  $z = \alpha^2 \sigma / \kappa$ . Результати розрахунків перелічених характеристик перехідного контактного шару за температури 300 К в залежності від  $A$  наведено на рис. 1 – 5.

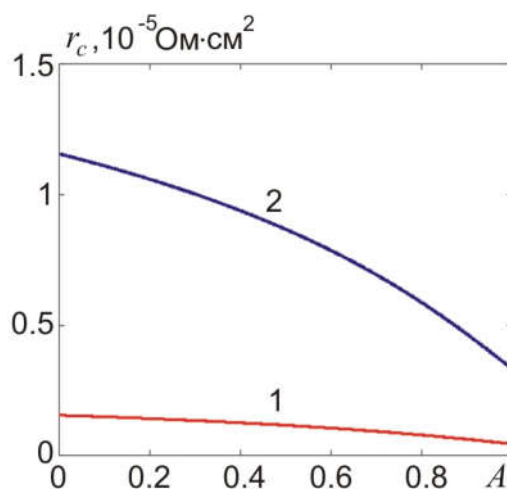


Рис. 1. Залежність електричного контактного опору за 300К від параметру  $A$  за товщини перехідного шару: 1) 20 мкм; 2) 150 мкм.

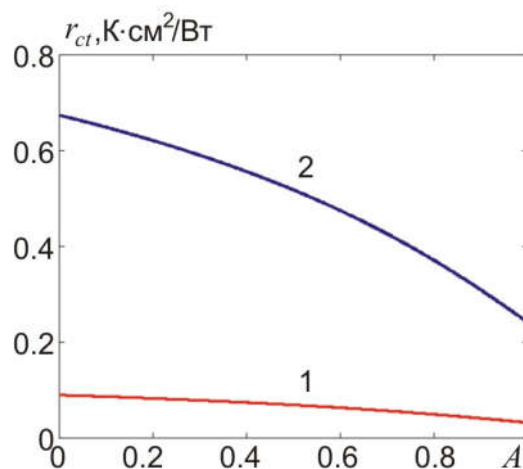
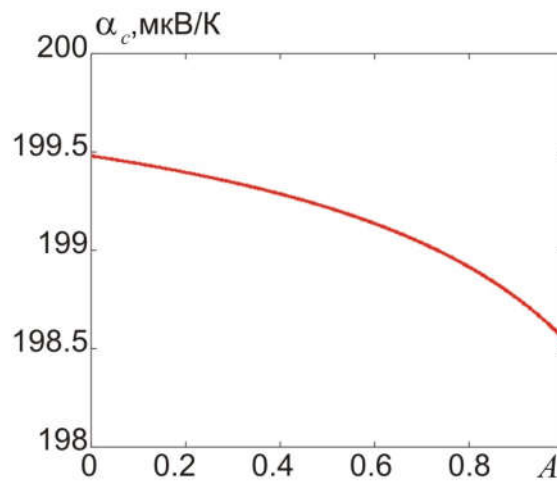
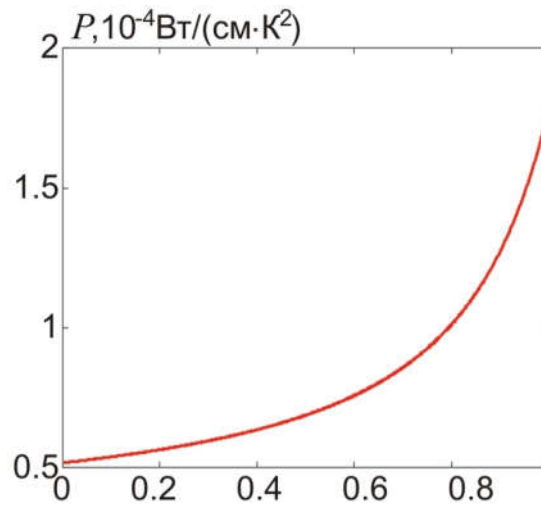
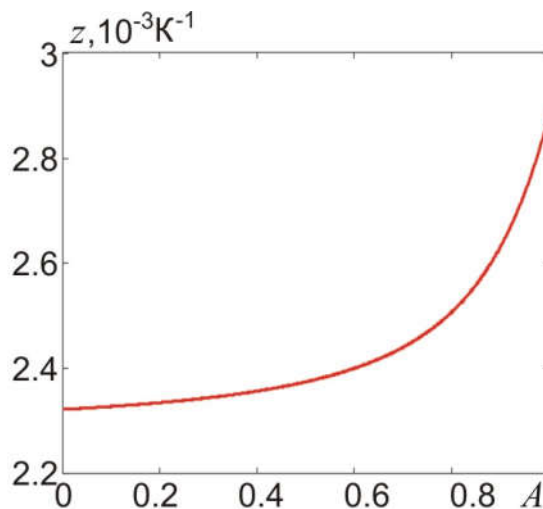


Рис. 2. Залежність теплового контактного опору за 300К від параметру  $A$  за товщини перехідного шару: 1) 20 мкм; 2) 150 мкм.

Рис.3. Залежність термоЕРС перехідного шару за 300К від параметру  $A$ Рис.4. Залежність фактору потужності перехідного шару за 300К від параметру  $A$ Рис.5. Залежність термоелектричної добротності перехідного шару за 300К від параметру  $A$



Оскільки в якості прикладу розглядалась контактна пара «телурид вісмуту – нікель», то у процесі розрахунків використовувались такі параметри матеріалів:  $\sigma_s = 800$  См/см,  $\sigma_m = 1.667 \cdot 10^5$  См/см,  $\kappa_s = 1.4 \cdot 10^{-2}$  Вт/(см·К),  $\kappa_m = 9.2$  Вт/(см·К),  $A_s = 801$ ,  $A_m = 58$ ,  $\rho_s = 7700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_m = 8900$  кг/м<sup>3</sup>.

З рис. 1 видно, що за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм електричний контактний опір при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $3.31 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а за товщини перехідного шару 20 мкм – від  $1.55 \cdot 10^{-6}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>. Таке зменшення електричного контактного опору відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник електропровідність композиту повинна зростати. Так само з рисунка 2 видно, що за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм тепловий контактний опір при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від 0.674 до 0.24 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, а за товщини перехідного шару 20 мкм – від 0.090 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт. Таке зменшення теплового контактного опору відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник теплопровідність композиту також повинна зростати. З рисунка 3 видно, що термоЕРС перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від 199.5 до 198.5 мкВ/К. Це відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник термоЕРС композиту повинна зменшуватись. З рисунка 4 видно, що фактор потужності перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зростає від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), а з рисунка 5 видно, що термоелектрична добротність перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зростає від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Зростання фактору потужності відбувається завдяки зростанню електропровідності, а зростання термоелектричної добротності – завдяки тому, що у даному інтервалі параметру  $A$  електропровідність зростає швидше за теплопровідність. З характеру отриманих залежностей і того факту, що за великої концентрації частинок металу термоЕРС повинна істотно зменшуватись, впливає, що, принаймні формально, існує таке значення безрозмірного параметру  $A$ , за якого фактор потужності та термоелектрична добротність перехідного шару досягають максимуму. З цієї точки зору такі перехідні шари можна було б вважати оптимізованими, але питання про досяжність цього значення параметру  $A$  у реальному технологічному процесі потребує окремого дослідження. Однак зміст цього параметру можливо деталізувати. Для цього будемо вважати, що товщина  $d_0$  перехідного контактного шару визначається дифузією, і, отже, у відповідності з результатами розв'язання нестационарного рівняння дифузії для напівобмеженого середовища [7]  $d_0 = 6\sqrt{D\tau}$ , де  $\tau$  – час, протягом якого відбувається найбільш інтенсивна дифузія металу у напівпровідник. Отже,  $A = 18Q\tau/n_0$ . Отже, якщо час  $\tau$  фіксований, то параметр  $A$  тим більший, чим більше швидкість  $Q$  надходження частинок металу у напівпровідник у процесі стаціонарної дифузії, і вона повинна бути досить великою, оскільки  $n_0$  досить значна величина. Для нікелю вона дорівнює  $9.14 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup> [8]. Тоді виходить, що при фіксованому часі товщина перехідного шару залежить від коефіцієнта дифузії, що цілком зрозуміло, оскільки цей коефіцієнт залежить, зокрема, від наявності у матеріалі дефектів та порушень, які сприяють дифузії, і, отже, збільшенню товщини перехідного шару.

Торкаючись співставлення отриманих результатів з експериментальними даними, зазначимо, що з одного боку величина електричного контактного опору за 300К для термоелектричних модулів висотою близько 0.25 мм, зазначена у праці [9], отримана у поліпшеному технологічному процесі, дорівнює  $1.12 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. А це лише у 2.5 рази більше

за нижню межу контактного опору, зазначену у даній статті. З іншого боку за товщини перехідного шару 20 мкм у найгіршому випадку, тобто за  $A = 0$ , розрахункове значення електричного контактного опору складає  $1.55 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. А це лише в 1.38 рази більше за значення електричного контактного опору за 300 К, отримане у поліпшеному технологічному процесі створення контактів.

З іншого боку, у працях [3] та [5] наводяться і такі значення електричних контактних опорів для термоелектричних гілок з антидифузійним шаром нікелю, які досить істотно перевищують верхню межу електричного контактного опору, зазначену у даній статті, тобто  $1.16 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>. Таким чином ми бачимо, що існують досить значні технологічні резерви зниження величин електричного та теплового контактних опорів.

## Висновки

1. Шляхом розв'язання одновимірного рівняння дифузії знайдено стаціонарний розподіл концентрації частинок нікелю в телуриді вісмуту по глибині перехідного шару.
2. З використанням теорії композитів розраховано електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС, фактор потужності та добротність перехідного контактного шару в залежності від інтенсивності надходження частинок нікелю при стаціонарній дифузії.
3. Встановлено, що при зростанні інтенсивності надходження частинок нікелю електричний та тепловий контактні опори та термоЕРС перехідного контактного шару зменшуються, а фактор потужності та термоелектрична добротність – зростають.
4. У розглянутому інтервалі інтенсивностей надходження частинок нікелю за стаціонарної дифузії за товщин перехідного шару 20 – 150 мкм електричний контактний опір може змінюватись в інтервалі від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>, тепловий контактний опір – в інтервалі від 0.674 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, термоЕРС – в інтервалі від 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор потужності – в інтервалі від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), а термоелектрична добротність – в інтервалі від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Інтервали зміни електричного та теплового контактних опорів можуть змінитись і розширитись з одного боку з-за наявності потенціальних бар'єрів між ТЕМ та металом, які долаються шляхом тунелювання або емісії, з іншого – за рахунок наявності тонкої оксидної плівки на поверхні ТЕМ, але ці чинники у даній статті не розглядаються.

## Література

1. Алиева Т.Д. Структура и электрические свойства границ раздела кристаллов  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  с некоторыми сплавами / Т.Д. Алиева, Б.Ш. Бархалов, Д.Ш. Абдинов // Неорганические материалы. – 1995. – Т.31. – №2. – С.194-198.
2. Chuang C.-H., Lin Y.-C., Lin C.-W. Intermetallic reactions during the solid-liquid interdiffusion bonding of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$  thermoelectric materials with Cu electrodes using a Sn interlayer / C.-H. Chuang, Y.-C. Lin, C.-W. Lin//Metals. – 2016. – Vol.6. – Is.92. – P.1 – 10. (doi: 103390/met.6040092).
3. Сабо Є.П. Технологія халькогенних термоелементів. Фізичні основи. Розділ 3. Технологія комутації віток термоелемента. Продовження. 3.5. Електрохімічна металізація / Сабо Є.П. // Термоелектрика. – 2011. – №1. – С.26-35.
4. Kuznetsov G.D. The metallization of the thermoelement branches by ionic sputtering of the nickel and cobalt / G.D. Kuznetsov, Y.G. Polystanskiy, V.A. Evseev // XIV international

- conference on thermoelectrics. Proceedings. June 27-30, 1995. – St. Petersburg-1995. – P.166-167.
5. Бублик В.Т. Изменение структуры приконтактной области термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута при повышенных температурах/ В.Т. Бублик, А.И. Воронин, В.Ф. Пономарев, Н.Ю. Табачкова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – №2. – С.17-20.
  6. Снарський А.О. Про закон Відемана-Франца в термоелектричних композитах / А.О. Снарський, М.І. Женіровський, І.В. Безсуднов // Термоелектрика – 2006. – №3. – С.59-65.
  7. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 736с.
  8. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792с.
  9. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric devices / Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. // J. of electron. mat. – 2013. – P.1-5 (doi: 10.1007/s11664-013-2806-6).
  10. Драбкин И.А. Контактные сопротивления в составных термоэлектрических ветвях/ И.А. Драбкин, В.Б. Освенский, А.И. Сорокин и др. // ФТП. – 2017. – Т.51. – Вып.8. – С. 1038-1040.

Надійшла до редакції 12.04.2018

**Горський П. В.,<sup>1,2</sup> докт. физ.-мат. наук**

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyach@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58000, Украина, e-mail: anatyach@gmail.com

## **ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ТЕРМОЭДС ПЕРЕХОДНОГО КОНТАКТНОГО СЛОЯ «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ-МЕТАЛЛ» НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОМПОЗИТОВ**

*Теоретически исследованы электрический и тепловой контактные сопротивления, термоЭДС, фактор мощности и термоэлектрическая добротность переходного контактного слоя «термоэлектрический материал-металл», обусловленного диффузией частиц металла в полупроводник без образования новых фаз. Исследование выполнено на основе теории композитов на примере пары «теллурид висмута – никель». Установлено, что термоэлектрические характеристики переходного контактного слоя зависят как от его толщины, так и от режима создания, в качестве основной характеристики которого взята интенсивность диффузии металла в полупроводник. При этом как от толщины, так и от режима создания существенно зависят электрическое и тепловое контактные сопротивления, фактор мощности и добротность переходного слоя, в то время, как термоЭДС не зависит от толщины слоя и мало зависит от режима создания. В интервале*

тощини переходного слоя от 20 до 150 мкм при рассмотренных режимах создания электрическое контактное сопротивление изменяется в интервале от  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ , тепловое контактное сопротивление изменяется в интервале от 0.674 до  $0.032 (\text{К} \cdot \text{см}^2) / \text{Вт}$ , термоЭДС – в интервале от 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор мощности – в интервале от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}^2)$ , термоэлектрическая добротность – в интервале от  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Библ. 10, рис. 5.

**Ключевые слова:** электрическое контактное сопротивление, тепловое контактное сопротивление, термоЭДС, переходной слой, композит, диффузия, интенсивность диффузии.

**P. V. Gorskiy,<sup>1,2</sup> Doctor fiz.-mat. science**

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine, e-mail: anatyach@gmail.com;

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine,  
e-mail: anatyach@gmail.com

**ESTIMATION OF THE ELECTRICAL AND THERMAL CONTACT  
RESISTANCES AND THERMOEMF OF TRANSIENT CONTACT LAYER  
“THERMOELECTRIC MATERIAL-METAL” BASED ON THE  
THEORY OF COMPOSITES**

**References**

1. Alieva T.D., Barkhalov B.Sh., Abdinov D.Sh. (1995). Struktura i elektricheskie svoystva granits razdela kristallov  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  i  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  s nekotorymi splavami [Structure and electrical properties of interfaces of  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  crystals with some alloys]. Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials, 31(2), 194-198 [in Russian].
2. Chuang C.-H., Lin Y.-C., Lin C.-W. (2016). Intermetallic reactions during the solid-liquid interdiffusion bonding of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$  thermoelectric materials with Cu electrodes using a Sn interlayer. Metals, 6(92), 1-10. (doi: 103390/met.6040092).
3. Sabo E.P. (2011). Technology of chalcogen thermoelements. Physical foundations. Section 3. Technology of connection of thermoelement legs. Continuation. 3.5. Electrochemical metallization. J.Thermoelectricity, 1, 26-35.
4. Kuznetsov G.D., Polystanskiy Y.G., Evseev V.A. (1995). The metallization of the thermoelement branches by ionic sputtering of the nickel and cobalt. Proc. of XIV International Conference on Thermoelectrics (Russia, St.Petersburg, June 27-30, 1995) (pp.166-167).
5. Bublik V.T., Voronin A.I., Ponomarev V.F., Tabachkova N.Yu. (2012). Izmeneniie struktury prikontaktnoi oblasti termoelektricheskikh materialov na osnove telluride vismuta pri povyshennykh temperaturakh [Change in the structure of near-contact area of thermoelectric materials based on bismuth telluride at elevated temperatures] Izvestiia vysshykh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki - News of Higher Educational Institutions. Electronic Technique Materials, 2, 17-20 [in Russian].
6. Snarskiy A.O., Zhenirovskiy M.I., Besudnov I.V. (2006). On the law of Wiedemann-Franz in thermoelectric composites. J.Thermoelectricity, 3, 59-65.

7. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. (1972). *Uravneniia matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow: Nauka [in Russian].
8. Kittel Charles. *Vvedeniie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Nauka, 1978 [Russian transl].
9. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2013). Practical contact resistance measurement method for bulk Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric devices. *J. of Electron. Mat.*, 1-5 (doi: 10.10007/s11664-013-2806-6).
10. Drabkin I.A., Osvenskiy V.B., Sorokin A.I. et al. (2017). Kontaknyie soprotivleniia v sostavnykh termoelektricheskikh vetviakh [Contact resistances in composite thermoelectric legs]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov – Semiconductors*, 51 (8), 1038-1040.

Submitted 12.04.2018

УДК 537.32



*Анатичук Л.І.*

**Анатичук Л.І.** *ак. НАН України,<sup>1,2</sup>*  
**Кобилянський Р.Р.** *канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна,  
*e-mail: anatysh@gmail.com*



*Кобилянський Р.Р.*

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА ШКІРУ ЛЮДИНИ

---

*У роботі наведено результати комп'ютерного моделювання циклічного температурного впливу на шкіру людини у нестационарному режимі. Побудовано тривимірну комп'ютерну модель біологічної тканини з врахуванням кровообігу та метаболізму. Як приклад, розглянуто випадок, коли на поверхні шкіри знаходиться робочий інструмент, температура якого змінюється за законом  $T(t) = A \cos \omega t$  у діапазоні температур  $[-30 \div +30]^{\circ}\text{C}$ . Визначено розподіли температури у різних шарах шкіри людини в режимах охолодження та нагріву. Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання біологічної тканини при заданому температурному впливі. Бібл. 20, рис. 4.*

**Ключові слова:** температурний вплив, шкіра людини, нестационарний режим, комп'ютерне моделювання.

### Вступ

Кріотерапія широко використовується у косметології для омолодження шкіри. Відомо, що при проведенні косметологічних процедур за допомогою холоду стимулюється вироблення колагену і еластину, за рахунок яких посилюються процеси регенерації в шкірі, вона підтягується і тонізується, а також злущуються ороговілі клітини верхнього шару шкіри (пілінг). Проте, слід зазначити, що реакція організму багато в чому залежить від часу та температури кріовпливу [1 – 3].

У дерматологічній практиці при проведенні кріомасажу покращуються обмінні й репаративні процеси та прискорюється регрес запальних процесів у випадках хронічних дерматозів; відбувається посилене теплоутворення і покращення трофічної функції тканини як шкіри, так і внутрішніх органів, стимулюється робота серця і судин, покращується венозний відтік, посилений теплообмін сприяє втраті маси тіла. Завдяки позитивному впливові на шкіру метод кріомасажу застосовують у комплексному лікуванні таких захворювань шкіри, як осередкова алопеція, рожеві та вульгарні вугрі, нейродерміт обмежений, шкірний свербіж, хронічна екзема, червоний плоский лишай, плоскі бородавки, кільцеподібна гранульома тощо [4 – 7].

У літературі зустрічається опис позитивних застосувань термоелектричного охолодження у дерматології та косметології, зокрема для лікування поверхневих гемангіом у дітей та інших поверхневих новоутворень [8]. У цій роботі доктор Н. Vause описує лікування гемангіом у дітей за допомогою термоелектричного охолодження. Під обстеженням перебували 673 дитини протягом

4-х місяців. Лікування відбувалося при температурі  $-32^{\circ}\text{C}$ , оптимальний час проведення терапевтичних процедур становив 20 секунд (при експозиції 40 секунд спостерігався некроз клітин). У 58 % пацієнтів лікування було успішним з першого разу, у 25 % довелося пройти повторний курс кріотерапії, у 11 % – 3 рази та близько 6 % більше 3 разів. Отже, спостерігався позитивний лікувальний ефект у більшості пацієнтів при проведенні кріотерапії за допомогою термоелектричного охолодження. Це, в свою чергу, показує, що для лікування деяких захворювань шкіри, особливо при проведенні кріомасажу, не обов'язково використовувати наднизькі температури (рідкий азот  $-196^{\circ}\text{C}$ ), а достатньо помірного охолодження.

Основною кріомасажу є швидке зниження температури (охолодження) біологічної тканини під впливом холодного фактора в межах кріостійкості ( $5-10^{\circ}\text{C}$ ) без значних порушень терморегуляції організму. При охолодженні біологічної тканини нижче порога кріостійкості через кристалізацію тканинної рідини настає їх руйнування (кріодеструкція). Це дуже складний процес, оскільки важливо повністю контролювати терапевтичний вплив, щоб не «переступити» поріг кріостійкості і не пошкодити здорові тканини. У більшості випадків контролювати цей процес дуже складно [9, 10], тому необхідно навчитися прогнозувати глибину промерзання шарів шкіри при заданому температурному впливі в різні моменти часу.

Отже, метою даної роботи є розробити методику комп'ютерного моделювання розподілу температури в шкірі людини у нестационарному режимі.

### Комп'ютерна модель циклічного температурного впливу на шкіру людини у нестационарному режимі

У даній роботі використано фізичну модель біологічної тканини, наведену в роботах [11-15], на поверхні якої знаходиться медичний робочий інструмент, температура якого змінюється з часом по наперед заданому закону. У цих роботах показано, що біологічна тканина тіла людини представляє собою структуру із трьох шарів шкіри (епідерміс, дерміс, підшкірно-жирова клітковина) і внутрішньої тканини. Вказані шари шкіри мають різні фізичні властивості, а саме теплопровідність  $\kappa$ , густину  $\rho$ , питому теплоємність  $C_p$  та перфузію крові  $\omega_b$ , значення яких наведені у роботі [12].

Для такої моделі біологічної тканини процеси теплообміну описуються системою нестационарних рівнянь теплопровідності у вигляді [16]:

$$\rho_i C_{p_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa_i \nabla T_i) + (\rho_b C_{p_b}) \omega_b (T_b - T_i) + q_m, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

де  $\rho_i$ ,  $C_{p_i}$ ,  $\kappa_i$  – густина, питома теплоємність, теплопровідність  $i$ -го шару шкіри людини;  $\rho_b$  – густина крові людини;  $C_{p_b}$  – питома теплоємність крові людини;  $\omega_b$  – перфузія крові людини;  $T_b$  – температура артеріальної крові ( $T_b = 37^{\circ}\text{C}$ );  $T_i$  – температура  $i$ -го шару біологічної тканини;  $q_m$  – тепло, що виділяється внаслідок метаболізму.

Рівняння теплообміну в біологічній тканині (1) розв'язується з наступними граничними умовами (2) на поверхнях вибраного об'єму біологічної тканини для довільного моменту часу:

$$T_4(x, y, z, t) \Big|_{\substack{z=b \\ 0 \leq x \leq a \\ 0 \leq y \leq a}} = T_b, \quad T_1(x, y, z, t) \Big|_{\substack{z=0 \\ 0 \leq x \leq c \\ 0 \leq y \leq c}} = T_f(t), \quad q_1(x, y, z, t) \Big|_{\substack{z=0 \\ c \leq x \leq a \\ c \leq y \leq a}} = \alpha \cdot (T_0 - T_1(x, y, 0, t)),$$

$$q_i(x, y, z, t) \Big|_{\substack{0 \leq x \leq b \\ y=0 \\ 0 \leq y \leq a}} = 0, \quad q_i(x, y, z, t) \Big|_{\substack{0 \leq x \leq b \\ x=a \\ 0 \leq y \leq a}} = 0, \quad q_i(x, y, z, t) \Big|_{\substack{0 \leq x \leq b \\ 0 \leq x \leq a \\ y=0}} = 0, \quad q_i(x, y, z, t) \Big|_{\substack{0 \leq x \leq b \\ 0 \leq x \leq a \\ y=a}} = 0, \quad (2)$$

де  $i = 1, \dots, 4$ ,  $q_i(x, y, z, t)$  – густина теплового потоку  $i$ -го шару шкіри людини,  $T_i(x, y, z, t)$  – температура всередині біологічної тканини,  $T_0$  – температура оточуючого середовища ( $T_0 = 22^\circ\text{C}$ ),  $a$  – коефіцієнт конвективного теплообміну поверхні шкіри з оточуючим середовищем,  $a = 10 \text{ мм}$ ,  $y = 10 \text{ мм}$ ,  $z = 43 \text{ мм}$ ,  $c = 2 \text{ мм}$ .

Граничні умови між шарами шкіри людини зводяться до рівності температур і теплових потоків. У початковий момент часу  $t=0$  с вважається, що температура у всьому об'ємі біологічної тканини становить  $T=37^\circ\text{C}$ , тобто початкові умови для розв'язання рівняння (1) наступні:

$$T_i(x, y, z, 0) = T_b, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (3)$$

У результаті розв'язання початково-крайової задачі (1)-(3) визначаються розподіли температури  $T_i(x, y, z, t)$  і теплових потоків у довільний момент часу в усіх 4-х шарах біологічної тканини.

Як приклад, у даній роботі розглянуто випадок, у якому температура робочого інструменту  $T_f(t)$  змінюється в діапазоні робочих температур  $[-30 \div +30]^\circ\text{C}$  за наступним законом:

$$T_f(t) = A \cos \omega t, \quad (4)$$

де  $A = 303 \text{ К}$  – амплітуда,  $\omega = 2\pi/p$  – частота,  $p = 60 \text{ с}$  – період,  $t = 240 \text{ с}$  – тривалість температурного впливу.

## Результати комп'ютерного моделювання

Було створено тривимірну комп'ютерну модель біологічної тканини у циліндричній системі координат, на поверхні якої знаходиться охолоджуючий елемент. Для побудови комп'ютерної моделі використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [17], що дає можливість проводити моделювання теплофізичних процесів у біологічній тканині з врахуванням кровообігу та метаболізму.

Розрахунок розподілів температур та густини теплових потоків у біологічній тканині здійснювався методом скінченних елементів, суть якого полягає в тому, що досліджуваний об'єкт розбивається на велику кількість скінченних елементів і в кожному з них шукається значення функції, яке задовольняє заданим диференціальним рівнянням другого порядку з відповідними граничними умовами. Точність розв'язання поставленої задачі залежить від рівня розбиття і забезпечується використанням великої кількості скінченних елементів [17].

Як приклад, на рис.1-4 наведено розподіли температури та ізотермічних поверхонь в об'ємі шкіри людини, на поверхні якої розміщено робочий інструмент, температура якого змінюється за косинусоїдальним законом у діапазоні робочих температур  $[-30 \div +30]^\circ\text{C}$  в початковий та кінцевий моменти часу циклу нагріву-охолодження.

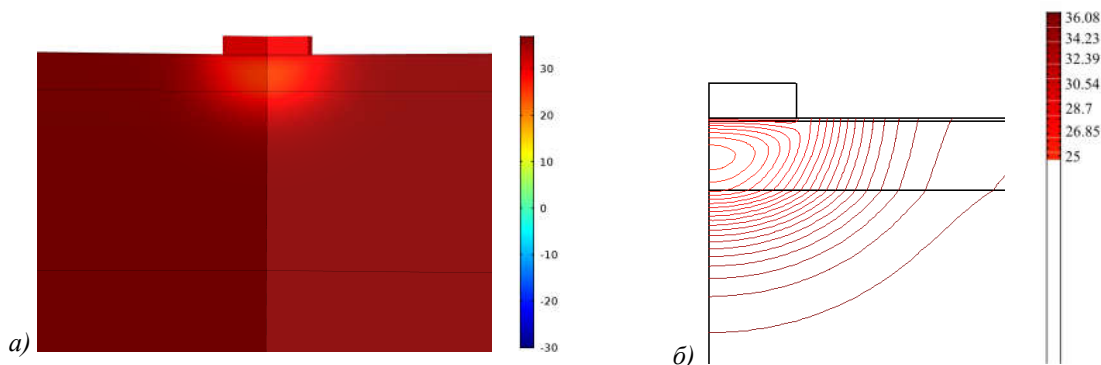


Рис. 1. Розподіл температури (а) та ізотермічних поверхонь (б) в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі  $T = +30^\circ\text{C}$  в момент часу  $t = 30 \text{ с}$



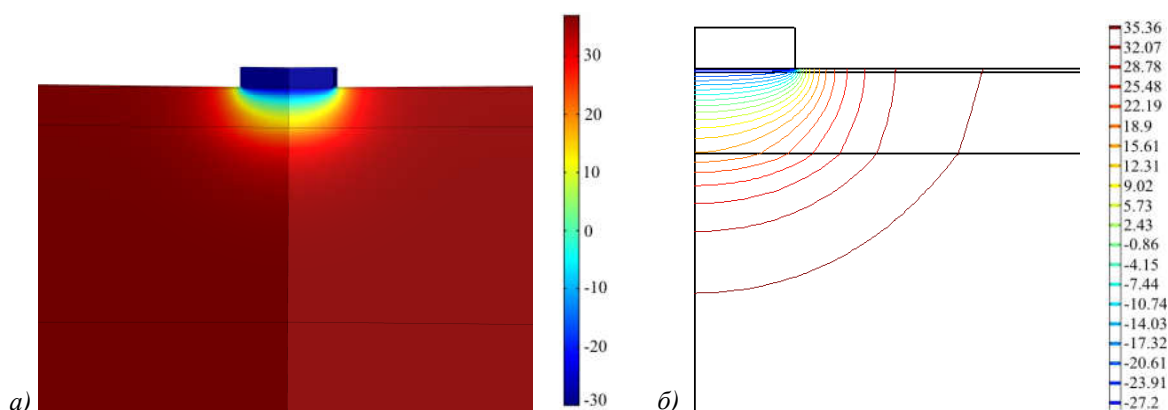


Рис. 2. Розподіл температури (а) та ізотермічних поверхонь (б) в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі  $T=-30^{\circ}\text{C}$  в момент часу  $t=60\text{c}$

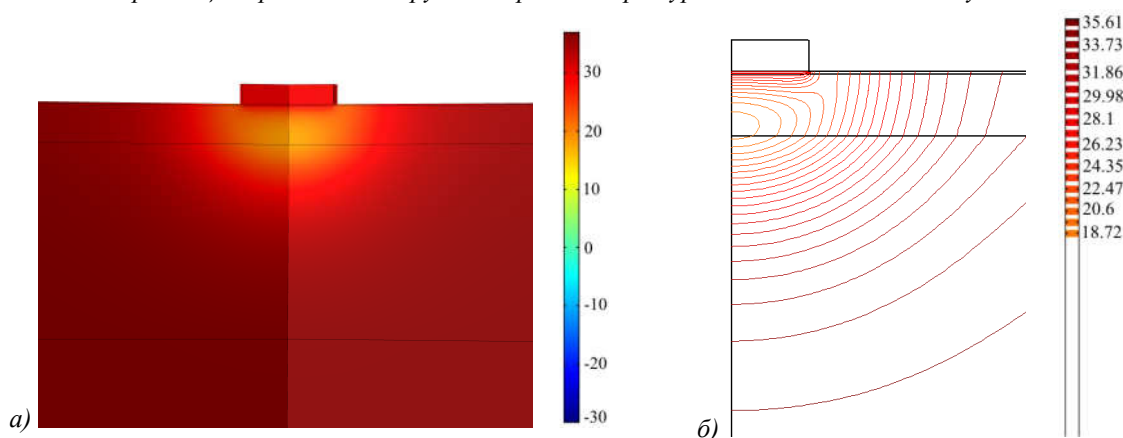


Рис. 3. Розподіл температури (а) та ізотермічних поверхонь (б) в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі  $T=+30^{\circ}\text{C}$  в момент часу  $t=210\text{c}$

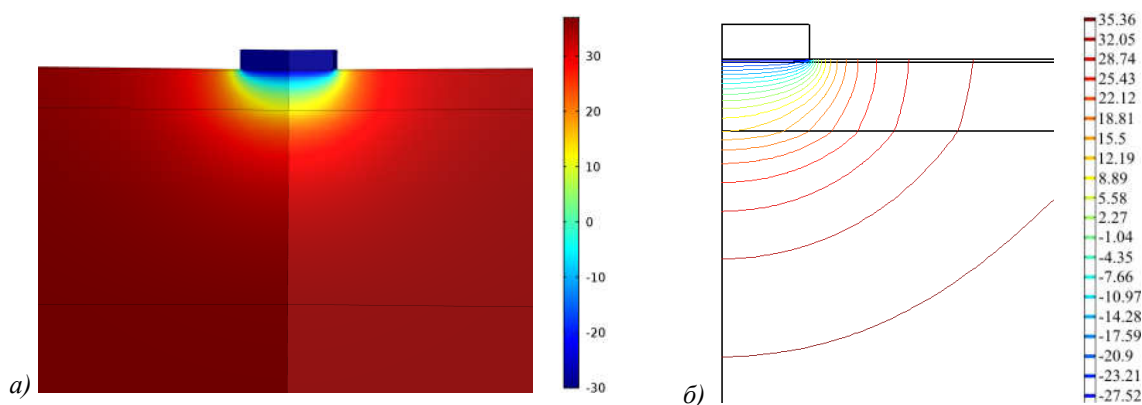


Рис. 4. Розподіл температури (а) та ізотермічних поверхонь (б) в об'ємі шкіри, на поверхні якої розміщено робочий інструмент при температурі  $T = -30^{\circ}\text{C}$  в момент часу  $t = 240\text{c}$

З рис.1, 2 видно, що при  $t = 30\text{ c}$  епідерміс прогрівається до температури  $28.7^{\circ}\text{C}$ , а при  $t = 60\text{ c}$  температура у епідермісі знижується до  $-28.8^{\circ}\text{C}$ . Оскільки, верхній шар шкіри (епідерміс) має найменшу товщину і перфузія крові у ньому  $\omega_b = 0$ , то температура всередині цього шару близька до температури робочого інструменту. На границі епідерміс-дерміс температура рівна  $-23.9^{\circ}\text{C}$ , на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура рівна  $15.6^{\circ}\text{C}$ . В подальшому при повторному циклічному температурному впливі спостерігається, що при  $t = 210\text{ c}$  після

охлаждения температура всередині шкіри, до прикладу, на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура досягає  $18^{\circ}\text{C}$ , що сприяє швидкому розширенню судин, припливу крові до поверхневих шарів шкіри та покращує метаболізм (рис.3, 4). При  $t = 240$  с відбувається краще охолодження шкіри: на границі епідерміс-дерміс температура рівна  $-24.2^{\circ}\text{C}$ , на границі дерміс-підшкірно-жирова клітковина температура рівна  $8.8^{\circ}\text{C}$ . Встановлено, що при збільшенні експозиції температурного впливу досягається глибше охолодження шарів шкіри. Тобто, при тривалому температурному впливі ( $T = -30^{\circ}\text{C}$ ) можна досягти деструкції приповерхневих новоутворень шкіри [8].

Слід зазначити, що розглянутий у даній роботі циклічний температурний вплив на шкіру людини має високу ефективність при лікуванні деяких захворювань шкіри та усуненні косметологічних дефектів шкіри [18 – 20]. Під впливом низьких температур спочатку відбувається короткочасне різке звуження судин шкіри, яке згодом швидко змінюється їх розширенням за рахунок активації адренергічних волокон. Це, у свою чергу, сприяє збільшенню швидкості обмінних процесів всередині тканин і відбувається регенерація клітин, збільшується приплив крові, що постачає кисень і поживні речовини до клітин. Активний метаболізм всередині тканин призводить до оновлення організму на клітинному рівні, насиченню клітинних структур поживними речовинами, киснем, стимулює перебіг обмінних процесів на клітинному рівні. Контрастні циклічні зміни температури стимулюють тонус судин дерми, підвищують легеневу вентиляцію і утилізацію кисню, підсилюють тканинне дихання.

Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання шарів шкіри людини при заданому циклічному температурному впливі для досягнення максимального ефекту при проведенні кріомасажу або кріодеструкції. Розроблена методика комп'ютерного моделювання у нестационарному режимі дозволяє визначати розподіли температури в різних шарах шкіри людини при наперед заданій довільній функції зміни температури робочого інструменту з часом  $T_f(t)$ . Також слід зазначити, що наведені вище результати стануть в основі розробки конструкції модернізованого термоелектричного приладу для лікування захворювань шкіри.

## Висновки

1. Розроблено методику комп'ютерного моделювання розподілу температур в шкірі людини у нестационарному режимі, що дає можливість прогнозувати результати локального температурного впливу на шкіру та визначати розподіли температури в різних шарах шкіри при наперед заданій довільній часовій функції зміни температури робочого інструменту  $T_f(t)$ .
2. Як приклад, шляхом комп'ютерного моделювання визначено розподіли температури у різних шарах шкіри в режимах охолодження та нагріву при зміні температури робочого інструменту за законом  $T_f(t) = A \cos \omega t$  у діапазоні температур  $[-30; +30]^{\circ}\text{C}$ . Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання біологічної тканини при заданому циклічному температурному впливі.

## Література

1. Дерматология, венерология. Учебник / Под редакцией. Степаненко В.И. Киев, 2012. – 904с.
2. Ахтямов С.Н., Бутов Ю.С. Практическая дерматокосметология. Учебное пособие. Москва, 2003. – 394 с.
3. Буренина И.А. Современные методики криотерапии в клинической практике. Вестник современной клинической медицины. 2014. Том 7 приложение 1. 57 – 61 с.

4. Deonizio J., Werner B., Fabiane A. Mulinari-Brenner. Histological Comparison of Two Cryopeeling Methods for Photodamaged Skin. *Hindawi Publishing Corporation*. 2014. p. 1 – 5.
5. Mourot L., Cluzeau C.. Jacques regnard hyperbaric gaseous cryotherapy: effects on skin temperature and systemic vasoconstriction. *archives of physical medicine and rehabilitation*, November 2007. 1339 – 1343p.
6. Земсков В.С. Гасанов Л.И. Низкие температуры в медицине – К.: Наукова думка. – 1988. – 278 с.
7. Грищенко В.И., Сандомирський Б.П., Колонтай Ю.Ю. Практическая криомедицина. – К.: Здоровье. – 1987. – 248 с
8. H. Bause. Kryotherapie lokalisierter klassischer, Neues Verfahren mit Peltier-Elementen (–32°C) Erfahrungsbericht Hamangiome. *Monatsschr Kinderheilkd* – 2004. 152:16–22.
9. Пономаренко Г. Н. Физиотерапия в косметологии. - СПб.: ВМедА, 2002. - 356 с.
10. Задорожный Б.А. Криотерапия в дерматологии (Библиотека практического врача). – К.: Здоров'я. – 1985. –72 с.
11. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Оптимальне керування часоною залежністю температури охолодження в термоелектричних пристроях // Термоелектрика. – № 5. – 2016. – С.5-11.
12. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Комп'ютерне моделювання локального теплового впливу на шкіру людини // Термоелектрика. – № 1. – 2017. – С.69-79.
13. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Комп'ютерне моделювання та оптимізація динамічних режимів роботи термоелектричного приладу для лікування захворювань шкіри // Термоелектрика. – № 2. – 2017. – С.44-57.
14. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я., Зварич О.В. Комп'ютерне моделювання та оптимізація динамічних режимів роботи термоелектричного приладу для рефлексотерапії // Термоелектрика. – № 3. – 2017. – С.68-78.
15. L. Anatychuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylanskyi, T. Kadenuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes // *International Journal of Thermophysics*". – *International Journal of Thermophysics* (2018) 39:108. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2430-z>.
16. Pennes H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm *J. Appl. Physiol.* 1948. Vol. 1. no. 2. P. 93 – 122.
17. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. 2010. 804 p.
18. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Про використання термоелектричного охолодження в дерматології та косметології // Термоелектрика. – № 3. – 2015. – С. 57-71.
19. Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Про перспективи використання термоелектрики для лікування захворювань шкіри холодом // *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка.* – Т. 5, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. – С. 67-72.
20. Анатичук Л.І., Денисенко О.І., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я., Перепічка М.П. Сучасні методи кріотерапії в дерматологічній практиці // *Клінічна та експериментальна патологія.* – Том XVI. – №1 (59). – 2017. – С. 150-156.

Надійшла до редакції: 16.05.2018

Анатичук Л.І. ак. НАН України,<sup>1,2</sup>  
Кобылянський Р.Р. канд. физ.-мат. наук,<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,  
Черновці, 58029, Україна, e-mail: anatyach@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицький національний університет ім. Ю. Федьковича,  
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна,  
e-mail: anatyach@gmail.com

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВЛИЯНИЯ НА КОЖУ ЧЕЛОВЕКА

*В работе приведены результаты компьютерного моделирования циклического температурного влияния на кожу человека в нестационарном режиме. Построена трехмерная компьютерная модель биологической ткани с учетом кровообращения и метаболизма. В качестве примера рассмотрен случай, когда на поверхности кожи находится рабочий инструмент, температура которого изменяется по закону  $T(t) = A \cos \omega t$  в диапазоне температур  $[-30 \div +30]^{\circ}\text{C}$ . Определены распределения температуры в разных слоях кожи человека в режимах охлаждения и нагрева. Полученные результаты дают возможность прогнозировать глубину промерзания биологической ткани при заданном температурном влиянии. Библ. 20, Рис. 4.*

**Ключевые слова:** температурное влияние, кожа человека, нестационарный режим, компьютерное моделирование.

L.I. Anatyachuk acad. National Academy of Sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>,  
R.R. Kobylanskyi Candidate Phys.-math. sciences<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Yu. Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubinsky str.,  
Chernivtsi, 58012, Ukraine; e-mail: anatyach@gmail.com

*This paper presents the results of computer simulation of cyclic temperature effect on human skin in the unsteady mode. A three-dimensional computer model of biological tissue with regard to blood circulation and metabolism has been built. As an example, the case is considered when the skin surface accommodates a work tool whose temperature varies by the law  $T(t) = A \cos \omega t$  in the temperature range  $[-30 \div +30]^{\circ}\text{C}$ . Temperature distributions in different human skin layers in heating and cooling modes have been determined. The results obtained make it possible to predict the depth of biological tissue freezing with a given temperature effect. Bibl. 20, Fig. 4.*

**Keywords:** temperature effect, human skin, unsteady mode, computer simulation.

### References

1. *Dermatologiya, venerologiya. Uchebnik [Dermatology, venerology. Textbook].* Stepanenko V.I. (Ed.). Kyiv: 2012 [in Russian].
2. Akhtiamov S.N., Butov Yu.S. (2003). *Prakticheskaya dermatokosmetologiya. Uchebnoye posobie. [Practical dermatocosmetology. Manual].* Moscow: Meditsina [in Russian].

3. Burenina I.A. (2014). Sovremennyye metodiki krioterapii v klinicheskoi praktike [Modern cryotherapy methods in clinical practice]. *Vestnik sovremennoi klinicheskoi meditsiny – Bulletin of Modern Clinical Medicine*, 7, 1, 57 – 61 [in Russian]
4. Deonizio J., Werner B., Fabiane A. Mulinari-Brenner. (2014). *Histological comparison of two cryopeeling methods for photodamaged skin*. Hindawi Publishing Corporation, 2014, 1–5.
5. Mourot L., Mourot L., Cluzeau C., Regnard J. (2007). Hyperbaric gaseous cryotherapy: effects on skin temperature and systemic vasoconstriction. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, November 2007, 1339 – 1343.
6. Zemskov V.S., Gasanov L.I. (1988). *Nizkiiye temperatury v meditsine [Low temperatures in medicine]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
7. Hryshchenko V.I., Sandomyrskiy B.P., Kolontai Yu.Yu. (1987). *Prakticheskaya kriomeditsina [Practical cryomedicine]*. Kyiv: Zdorovie [in Russian].
8. H. Bause. (2004). Kryotherapie lokalisierter klassischer, Neues Verfahren mit Peltier-Elementen (–32°C) Erfahrungsbericht Hamangiome. *Monatsschr Kinderheilkd – 2004*. 152:16–22.
9. Ponomarenko G.N. (2002). *Fizioterapiya v kosmetologii [Physiotherapy in cosmetology]*. St.Petersburg: Voenno-Meditsinskaia Akademiya [in Russian].
10. Zadorozhnyi B.A. (1985). *Krioterapiya v dermatologii (Biblioteka prakticheskogo vracha). [Cryotherapy in dermatology (Library of practicing physician)]*. Kyiv: Zdorovie [in Russian].
11. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kotsur M.P., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya. (2016). Optimal control of time dependence of cooling temperature in thermoelectric devices. *J.Thermoelectricity*, 5, 5-11.
12. Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya. (2017). Computer simulation of local thermal effect on human skin. *J. Thermoelectricity*, 1, 66 – 75.
13. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric device for treatment of skin diseases. *J.Thermoelectricity*, 2, 44-57.
14. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya., Zvorych O.V. (2017). Computer simulation and optimization of the dynamic operating modes of thermoelectric reflexotherapy device. *J.Thermoelectricity*, 3, 68-78.
15. L. Anatyshuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylianskyi, T. Kadaniuk. (2018). Optimal control of time dependence of temperature in thermoelectric devices for medical purposes. *International Journal of Thermophysics*. 39:108. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2430-z>.
16. Pennes H.H. (1948). Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting forearm *J. Appl. Physiol.* 1 (2), 93 – 122.
17. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. 2010. 804 p.
18. Anatyshuk L.I., Denisenko O.I., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya. (2015). On the use of thermoelectric cooling in dermatology and cosmetology. *J.Thermoelectricity*, 3, 57-71.
19. Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya. (2016) Pro perspektyvy vykorystannia termoelektryky dlia likuvannia zakhvoriuvan shkiry kholodom [On the prospects of using thermoelectricity for treatment of skin diseases with cold]. *Naukovy visnyk Chernivetskogo universitetu: zbirnyk naukovykh prats. Fizyka. Elektronika - Scientific Bulletin of Chernivtsi University: Collection of Scientific Papers. Physics. Electronics*, 5, 1, 67 – 72 [in Ukrainian].
20. Anatyshuk L.I., Denisenko O.I., Kobylianskyi R.R., Kadaniuk T.Ya., Perepichka M.P. (2017). Modern methods of cryotherapy in dermatological practice. *Klinichna ta etsperymentalna patologiia- Clinical and Experimental Pathology*, XVI, 1 (59), 150-156 [in Ukrainian].

Submitted: 16.05.2018

**Анатичук Л.І. ак. НАН України<sup>1,2</sup>, Максимук М.В.<sup>1</sup>,  
Прибила А.В. канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>, Розвер Ю.Ю.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна, e-mail: anatykh@gmail.com

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ З ПОЛУМ'ЯНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА ЗМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ І СТАБІЛІЗАТОРАМИ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОБАТАРЕЙ**

*У роботі виконано розрахунки динамічної потужності термоелектричного генератора з полум'яними джерелами тепла змінної потужності. Наводяться результати експериментальних досліджень температурних режимів роботи печей, що використовують тверде паливо, а також оцінки можливостей підвищення вихідної потужності термоелектричного генератора. Бібл. 8, рис. 5.*

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, комп'ютерне проектування, фізична модель.

### **Вступ**

*Загальна характеристика проблеми.* Для живлення різноманітної малопотужної апаратури зазвичай використовують хімічні джерела струму. Проте, поряд із беззаперечними перевагами, їх використання пов'язане із певними недоліками – наявністю саморозряду, малим ресурсом роботи, обмеженим терміном зберігання та експлуатації за умов низьких температур, а також проблеми їх утилізації [1, 2].

Вказаних недоліків позбавлені термоелектричні генератори (ТЕГ) із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі, зокрема на дровах та пресованих брикетах, що широко використовуються для обігріву приміщень і приготування їжі, особливо у сільській місцевості та віддалених районах [2, 3].

Серійне виробництво термоелектричних генераторів із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі здійснюється багатьма виробниками, зокрема російськими компаніями «Кріотерм» та «Термофор» [4, 5] розроблено термоелектричні печі електричною потужністю 25 - 50 Вт, що призначені для освітлення, живлення малопотужних побутових приладів, зарядки акумуляторів, а також опалення приміщень площею до 50 м<sup>2</sup> [4, 5]. Китайською компанією «Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd.» розроблено серію термогенераторів потужністю 15 - 45 Вт [6]. Загальним підходом при розробці таких термогенераторів є використання термоелектричних модулів, виготовлених з матеріалів на основі телуриду вісмуту з граничною «гарячою» температурою 300 °С. Проте температура поверхонь твердопаливних джерел тепла, на які встановлюється ТЕГ, досягає і 600 °С та постійно змінюється у часі. Це призводить до зменшення ресурсу роботи ТЕГ і, як наслідок, до швидкого виходу генератора з ладу. Для усунення цього в конструкції термогенератора передбачається наявність стабілізатора температури гарячої поверхні печі, що відсікає

температури, які перевищують 300 °С. Зрозуміло, що це призводить до зменшення електричної потужності ТЕГ, адже він використовує вже не всю теплову потужність печі.

Крім того, як показує аналіз температури, при проектуванні ТЕГ використовуються фізичні моделі із постійною температурою джерела тепла, що не відповідає реальній ситуації. Під час роботи печі температура її поверхні динамічно змінюється, що відображається на вихідній потужності ТЕГ.

Метою даної роботи є розробка теорії та методів проектування термоелектричного генератора із нестабільними джерелами тепла змінної потужності, зокрема на дровах.

### Фізична модель

У розрахунках використано фізичну модель блока термоелектричного генератора (рис. 1), яка містить нагріту поверхню джерела тепла змінної потужності 1, стабілізатор температури, що відсікає температури на гарячій поверхні термоелектричного генератора вище 300 °С 2, теплообмінники для підведення 3 та відведення 6 теплового потоку до/від термоелектричного модуля 4, теплову ізоляцію 5, стабілізатор електричної напруги 7 та акумулятор електричної енергії 8.

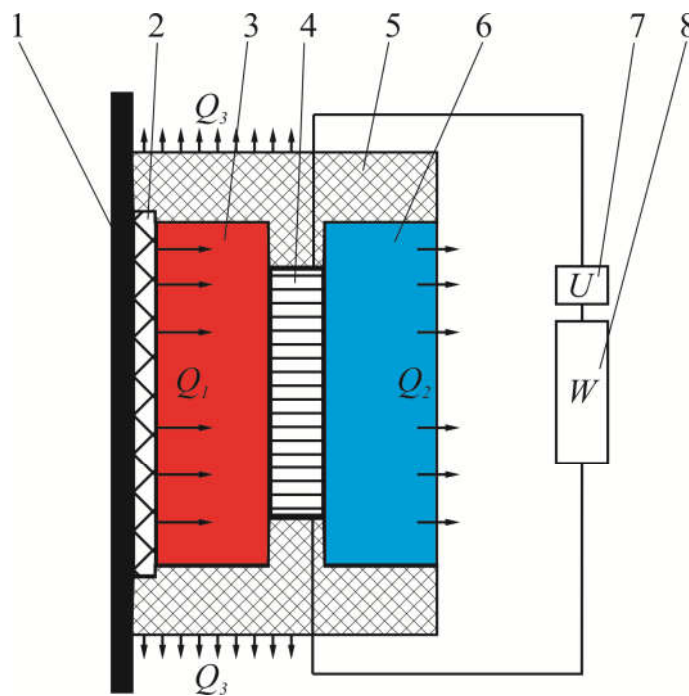


Рис. 1. Фізична модель блоку термоелектричного генератора:

1 – нагріта поверхня; 2 – стабілізатор температури; 3 – гарячий теплообмінник;

4 – термоелектричний модуль; 5 – теплоізоляція; 6 – холодний теплообмінник;

7 – стабілізатор напруги; 8 – акумулятор електричної енергії.

Оскільки генератор встановлений на нагріту поверхню, у моделі не розглядаються процеси теплопереносу від реального джерела горіння палива до цієї поверхні. Замість цього, для визначення температури нагрітої поверхні 1, використовуються експериментальні залежності її температури від часу при реальному циклі використання джерела тепла на твердому паливі (рис. 3).

## Математичний і комп'ютерний описи моделі

Таким чином, для розрахунку термоелектричного генератора відповідно до фізичної моделі (рис. 1) використано рівняння балансу теплот.

На гарячій стороні міститься джерело тепла змінної потужності  $Q_1 [T_1(t)]$ . Його теплова потужність залежить від температури цієї поверхні  $T_1$ , яка, в свою чергу, змінюється із часом  $t$  (рис. 3), та подається у вигляді деякої функції  $f [T_1(t)]$ .

$$Q_1 = f [T_1(t)], \quad (1)$$

Підведення тепла від нагрітої поверхні до гарячої сторони термоелектричного модуля та відведення тепла до холодного теплообмінника описується рівняннями:

$$Q_1 = \chi_1 [T_1(t) - T_T], \quad (2)$$

$$Q_2 = \chi_2 [T_X - T_2], \quad (3)$$

де  $\chi_1, \chi_2$  – теплові опори гарячого і холодного теплообмінників;  $T_T, T_X$  – температури гарячої та холодної сторони термоелектричного модуля відповідно;  $T_2$  – температура зовнішньої поверхні холодного теплообмінника.

Теплова потужність  $Q_2$  відводиться від холодного теплообмінника шляхом примусової конвекції повітря у навколишнє середовище:

$$Q_2 = \alpha (T_2 - T_0) S_m, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну між поверхнею теплообмінника і навколишнім середовищем;  $S_m$  – площа поверхні теплообміну;  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Електрична потужність, яка генерується термоелектричним модулем пропорційна  $Q_1 [T_1(t)]$  та його ККД  $\eta$ :

$$W = Q_1 [T_1(t)] \cdot \eta, \quad (5)$$

Основні втрати тепла  $Q_3$  відбуваються через теплову ізоляцію:

$$Q_3 = \chi_4 (T_M - T_0), \quad (6)$$

де  $\chi_4$  – тепловий опір ізоляції,  $T_M$  – температура внутрішньої поверхні теплової ізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного генератора можна записати у вигляді:

$$Q_1 = W + Q_2 + Q_3. \quad (7)$$

Для комп'ютерного представлення математичної моделі ТЕГ використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [7]. Для цього необхідно представити наші рівняння у наступному вигляді.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (8)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (9)$$

де



$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{q} = \kappa\nabla T + \alpha T\vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{j} = -\sigma\nabla U - \sigma\alpha\nabla T. \quad (12)$$

Тут  $\vec{E}$  – щільність потоку енергії,  $\vec{q}$  – щільність теплового потоку,  $\vec{j}$  – щільність електричного струму,  $U$  – електричний потенціал,  $T$  – температура,  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності.

Враховуючи (10) – (12), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T - (\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U. \quad (13)$$

Тоді закони збереження (8), (9) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T] - \nabla[(\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U] = 0, \quad (14)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння (14) - (15) ми одержимо розподіли фізичних полів, а також інтегральні значення ефективності та потужності ТЕГ.

## Експериментальні дослідження теплових режимів джерела тепла змінної потужності

Для визначення реальних температурних умов на нагрітих поверхнях пічок із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі (дровах) проведено експериментальні дослідження із використанням пічки зображеної на рис. 2.

У ході експерименту визначено залежності температур нагрітих поверхонь пічки від часу, протягом якого із рівними інтервалами відбувалося додавання однакової кількості дров. Загальний час експерименту склав 3.2 години. Дрова у кількості 5 кг деревини породи «верба» додавалися із інтервалом часу 50 хв.

На рис. 3 наведено результати вимірювань температури гарячих поверхонь пічки. Криві 1 та 2 на рис.3 відповідають температурам бічних поверхонь пічки, а крива 3 – задньої поверхні пічки. I, II, III, IV – інтервали часу протягом яких відбувалося додавання дров у пічку.

Як видно з рис. 3 температура поверхонь пічок циклічно змінювала відповідно до інтервалів додавання дров. При чому, температури бічних поверхонь (криві 1 і 2 на рис. 3) не перевищують 430 °С, а температура задньої поверхні пічки (крива 3 на рис.3) досягає значень ~ 600 °С.

Отримані дані оброблені у вигляді функціональних залежностей температур нагрітих поверхонь пічки від часу і використані при розрахунках характеристик термоелектричного генератора із полум'яними джерелами тепла змінної потужності на твердому паливі.



Рис. 2. Зовнішній вигляд пічки

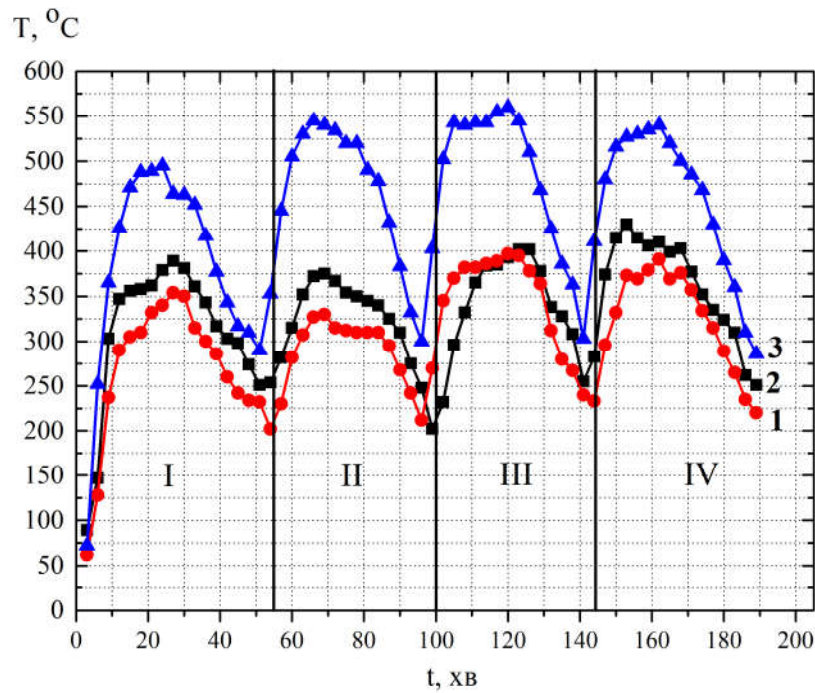


Рис. 3. Експериментальні залежності температури нагрітих поверхнь пічки від часу: 1, 2 – температури бічних поверхнь пічки, 3 – температура задньої поверхні пічки

### Опис динамічних потужностей ТЕГ

Таким чином, використовуючи комп'ютерні методи, проведено розрахунок динамічних потужностей ТЕГ за умов його встановлення на бічній і задній поверхнях пічки (рис. 4, 5).

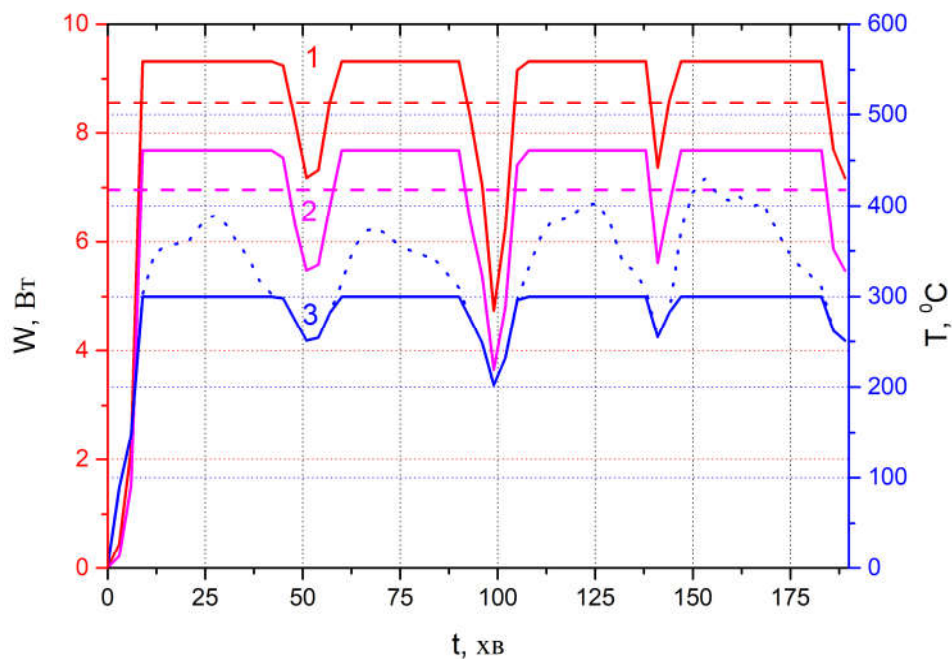


Рис. 4. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на бічній поверхні пічки від часу: 1 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{Х}}=30^{\circ}\text{C}$ , 2 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{Х}}=50^{\circ}\text{C}$ ; 3 – температура поверхні пічки.

У якості термоелектричних перетворювачів для ТЕГ використано 1 термоелектричний модуль АЛТЕК - 1061 із матеріалу на основі телуриду вісмуту ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). Характеристики такого модуля наведено в [8]. Його гранична «гаряча» температура становить  $300^\circ\text{C}$ . Тому, відповідно до фізичної моделі (рис.1), між поверхнею гарячої стінки і ТЕГ знаходиться стабілізатор температури, що відсікає температури, які перевищують  $300^\circ\text{C}$ .

На рис.4 наведено залежність потужності ТЕГ, розміщеного на бічній поверхні пічки, від часу для температур холодної сторони ТЕГ  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  (1 на рис.4) і  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$  (2 на рис.4). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 3 на рис.4, а температура бічної поверхні пічки – пунктирною кривою на рис.4.

Як видно із рис.4, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. Для випадку температур холодної сторони  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля, за вибраний відрізок часу становить 8.6 Вт, а для  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$  – 7 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 30$  кДж для  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  і  $\sim 25$  кДж для  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$ .

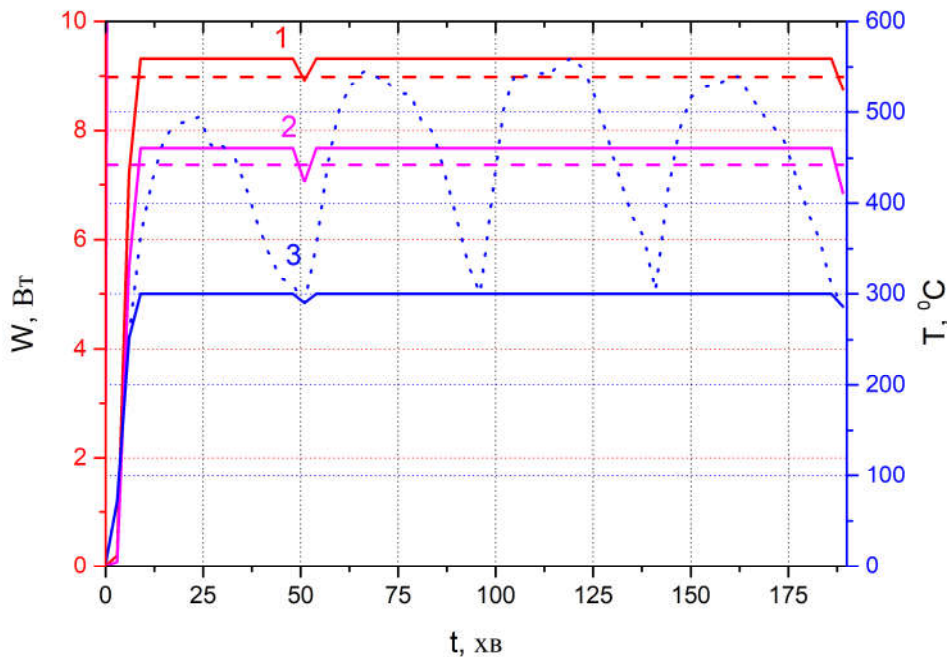


Рис. 5. Залежність потужності ТЕГ розміщеного на задній поверхні пічки від часу:

1 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$ , 2 – потужність ТЕГ при  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$ ;

3 – температура поверхні пічки.

На рис. 5 наведено аналогічну залежність потужності ТЕГ, розміщеного на задній поверхні пічки, від часу для температур холодної сторони ТЕГ  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  (1 на рис.5) і  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$  (2 на рис. 5). Температура гарячої сторони ТЕГ показана суцільною кривою 3 на рис. 4, а температура задньої поверхні пічки – пунктирною кривою на рис.4.

Як видно із рис. 4, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. Для випадку температур холодної сторони  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  усереднене значення потужності ТЕГ, що складається із одного термоелектричного модуля, за вибраний відрізок часу становить 9 Вт, а для  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$  – 7.4 Вт. При цьому енергія, що генерується ТЕГ у розрахунку на 1 год, становить  $\sim 32$  кДж для  $T_{\text{X}}=30^\circ\text{C}$  і  $\sim 27$  кДж для  $T_{\text{X}}=50^\circ\text{C}$ .

Таким чином, попри значні відмінності між температурами бічних і задньої стінок печі, потужності ТЕГ для першого і другого випадків відрізняються лише на  $\sim 5\%$ , що пов'язано із використанням стабілізатора температури гарячої сторони ТЕГ.

Однак, якщо проаналізувати криві 3 на рис. 4 і 5, стає зрозуміло, що така вимушена стабілізація температури поверхні печі веде до значних втрат у потужності ТЕГ. Ці втрати можна оцінити, адже, як уже зазначалося, характер залежності динамічної потужності від часу в цілому відтворює залежності температури поверхні пічки. І якщо допустити, що ми будемо використовувати замість стабілізованої температури (суцільна синя лінія 3 на рис.4 і 5) всю температуру поверхні печі (пунктирна синя лінія 3 на рис.4 і 5), то виграш у вихідній потужності ТЕГ становитиме  $\sim 30 - 40\%$ .

Отже, для подальшого покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, важливим є дослідження направлені на пошук можливостей використання повної теплової потужності печей, зокрема розробка ТЕГ із високотемпературних матеріалів, а також використання каскадних генераторів, оптимізованих на необхідні інтервали температур.

## Висновки

1. Визначено експериментальні залежності динамічної температури гарячих поверхонь пічки для спалювання дров, в режимі її циклічного використання.
2. На основі експериментальних даних, розраховано динамічну потужність ТЕГ із полум'яними джерелами тепла на твердому паливі із стабілізаторами температури термобатарей. Усереднене значення потужності ТЕГ, який складається із одного термоелектричного модуля, встановленого на задній поверхні печі, у заданому часовому відрізку становить 9 Вт (за температури його холодної сторони  $T_x = 30^\circ\text{C}$ ).
3. Встановлено, що вимушена стабілізація температури поверхні печі веде до значних втрат у потужності ТЕГ, які досягають  $\sim 30 - 40\%$ .
4. Проаналізовано можливості покращення якості термоелектричних генераторів, що використовують полум'яні джерела тепла змінної потужності на твердому паливі, зокрема за рахунок розробки ТЕГ із високотемпературних матеріалів, а також використання каскадних генераторів, оптимізованих на необхідні інтервали температур.

## Література

1. Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ. 2005.
2. Анатичук Л.І., Мочернюк Р.М., Гаврилюк М.В., Андрусак І.С. Термоелектричний генератор, що використовує тепло нагрітих поверхонь // Термоелектрика. – 2017. №2. – С 84 – 95.
3. Вихор Л.М., Максимук М.В. Проектування термоелектричних каскадних модулів для ТЕГ на твердому паливі // Термоелектрика. – 2017. №4. – С 40 – 48.
4. <http://www.energopech.ru>
5. <http://kryothermtec.com/ru>
6. Thermonamic electronic (Jiangxi) Corp. Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermonamic.com> (дата обращения: 05.09.2018).
7. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
8. <http://www.ite.inst.cv.ua>

Надійшла до редакції: 30.04.2018

**Анатичук Л.І. ак. НАН України<sup>1,2</sup>, Максимук М.В.<sup>1</sup>,  
Прибыла А.В. канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>, Розвер Ю.Ю.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут термоелектричності НАН і МОН України,  
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,  
Чернівці, 58012, Україна, e-mail: anatykh@gmail.com

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ И СТАБИЛИЗАТОРАМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОБАТАРЕЙ**

*В работе выполнены расчеты динамической мощности термоэлектрического генератора с пламенными источниками тепла переменной мощности. Приведены результаты экспериментальных исследований температурных режимов работы печей, использующих твердое топливо, а также оценки возможностей повышения выходной мощности термоэлектрического генератора. Библиограф. 8, рис. 5.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, компьютерное проектирование, физическая модель.

**Anatykhuk L.I. acad. National Academy of Sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>,  
Maksimuk M.V.<sup>1</sup>, Prybyla A.V. Candidate Phys.-math. Sciences<sup>1,2</sup>,  
Rozver Yu.Yu.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;  
<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine,  
e-mail: anatykh@gmail.com

## **THERMOELECTRIC GENERATORS WITH FLAME HEAT SOURCES OF VARIABLE POWER AND TEMPERATURE STABILIZERS FOR THERMOPILES**

*In this paper, the calculations of the dynamic power of a thermoelectric generator with flame heat sources of variable power are made. The results of experimental studies of temperature operating modes of furnaces using solid fuels are presented, as well as an assessment of the possibilities of increasing the output power of a thermoelectric generator. Bibl. 8, Fig. 5.*

**Key words:** thermoelectric generator, computer design, physical model.

### **References**

1. Bubnov Yu.I., Orlov S.B. (2005). Germetichnyiye knicheskiie istochniki toka: *Elementy i akkumulyatory. Oborudovaniie dlia ispytaniy i ekspluatatsii. [Sealed chemical sources of current: Elements and batteries. Testing and operating equipment]*. Saint-Petersburg: Khimizdat [in

- Russian].
2. Anatyshuk L.I., Mocherniuk R.M., Havryliuk M.V., Andrusiak I.S. (2017). Thermoelectric generator using the heat of heated surfaces. *J. Thermoelectricity*, 2, С 84 – 95.
  3. Vikhor L.M., Maksimuk M.V. (2017). Design of thermoelectric cascade modules for solid fuel TEG. *J. Thermoelectricity*, 4, 40 – 48.
  4. <http://www.energopech.ru>
  5. <http://kryothermtec.com/ru>
  6. Thermonamic electronic (Jiangxi) Corp. Ltd. Retrieved from: <http://www.thermonamic.com> (application date: 05.09.2018).
  7. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
  8. <http://www.ite.inst.cv.ua>

Submitted: 30.04.2018

**Зайков В.П.** канд. техн. наук.<sup>1</sup>,  
**Мещеряков В.І.** доктор техн. наук.<sup>2</sup>,  
**Журавльов Ю.І.** канд. техн. наук.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Науково-дослідний інститут ШТОРМ,  
вул. Терешкової, 27, Одеса, Україна;  
*e-mail: grand@i.ua;*

<sup>2</sup>Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, Україна; *e-mail: grand@ua.fm;*

<sup>3</sup>Національний університет «Одеська морська академія»,  
вул. Дідріхсона, 8, Україна; *e-mail: zhuravlov.y@ua.ru.*

## **ВПЛИВ СЕРЕДНЬОБ'ЄМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТА НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ, ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТА ДИНАМІКУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

*Розглянуто вплив середньооб'ємної температури гілок термоелемента на основні параметри, показники надійності та динаміку функціонування термоелектричного теплового насоса за заданого теплового навантаження для різної геометрії гілок термоелементів. Визначено співвідношення для оцінки середньооб'ємної температури залежно від відносного робочого струму и відносного робочого струму, який відповідає максимуму холодопродуктивності. Показано, що з врахуванням середньооб'ємної температури зменшується холодопродуктивність на один термоелемент, збільшується відносний перепад температури, кількість термоелементів за заданого теплового навантаження, інтенсивність відмов, збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи. Бібл. 12, Рис. 9, Табл. 5.*

**Ключові слова:** термоелектричний охолоджувач, середньооб'ємна температура, динаміка функціонування термоелемента, показники надійності, перепад температур.

### **Вступ**

Перспективність термоелектричних теплових насосів обумовлена відсутністю рухомих частин, незалежністю функціонування від просторового розташування виробу, наслідком чого є підвищені, у порівнянні з парогенераторними та абсорбційними машинами, показники надійності [1]. Малі габарити й маса, принцип перетворення енергії, електричне керування дають істотний вигравш у динамічних характеристиках термоелектричних пристроїв [2]. Разом з тим, більш низька ефективність перетворення веде до того, що основною сферою застосування термоелектричних насосів є теплонавантажена радіоелектроніка, де висуваються найбільш критичні вимоги до масогабаритних та динамічних характеристик, а також показників надійності систем забезпечення теплових режимів [3]. Постійне зростання вимог до бортових інформаційних систем розповсюджується й на системи забезпечення теплових режимів, що є їх невід'ємною частиною [4]. Експлуатаційні показники надійності термоелектричних пристроїв

залежать від впливу зовнішніх кліматичних [5], механічних [6] факторів, теплового навантаження [7], конструктивних параметрів [8], струмових режимів роботи [9]. Спільне вирішення питань підвищення показників надійності й динамічних характеристик становить проблему, оскільки підвищення градієнтів перепадів температури у часі знаходиться у суперечності з показниками надійності [10]. Актуальність аналізу даної проблеми очевидна й з тих міркувань, що прискорені випробування термоелектричних пристроїв з метою встановлення показників надійності проводять у перемикальних режимах, за яких час експлуатації знижується на порядок. До даних умов можуть короткочасно наближатися робочі режими швидкодіючих термоелектричних систем забезпечення теплових режимів теплонавантажених радіоелектронних елементів.

**Метою роботи** є розробка й аналіз математичної моделі, що пов'язує показники надійності й динаміки гілки термоелемента з конструктивними параметрами й енергетичними показниками термоелектричного теплового насоса.

### **Модель взаємозв'язку показників надійності та динаміки гілок термоелемента з конструктивними та енергетичними параметрами в режимі теплового насоса**

У деяких випадках проектування термоелектричних охолоджувальних пристроїв (ТЕП), особливо в режимі теплового насоса ( $\Delta T = 0$ ), виникає необхідність оцінки середньооб'ємної температури  $\bar{T}$  гілок термоелементів, яка перевищує температуру тепловиділяючого спаю  $T$ , що суттєво позначається на основних параметрах, показниках надійності й динаміки функціонування термоелемента.

Розглянемо нелінійний розподіл температури уздовж галузі термоелемента  $T(x) = T$  при  $x = 0$  і  $T(x) = T_0$  при  $x = l$  [11]яке, можна представляти у вигляді:

$$\bar{T} = \frac{1}{l} \int_0^l \left\{ T + \frac{\Delta T_{\max}}{l} x \left[ B_K^2 \left( 1 - \frac{x}{l} \right) - \Theta \right] \right\} dx, \quad (1)$$

де  $B_K = I/I_{\max K}$  – відносний робочий струм при  $\tau$ , А;

$l$  – величина робочого струму  $\tau$ , А;

$I_{\max K} = \bar{e}T_0/R$  – максимальний робочий струм, А;

$T_0$  – температура теплопоглинального спаю, К;

$\bar{e}$  – усереднене значення термоЕРС гілки термоелемента, В/К;

$R = l/(\bar{\sigma} S)$  – електричний опір гілок термоелемента, Ом;

$\bar{\sigma}$  – усереднене значення електропровідності гілки термоелемента, См/см;

$l, S$  – відповідно, висота, см, і площа, см<sup>2</sup>, поперечного перерізу гілок термоелемента;

$\Delta t_{\max} = 0.5zT_0^2$  – максимальний перепад температури, К;

$z$  – усереднене значення добротності термоелектричного матеріалу в модулі, 1/К;

$\Theta = (T - T_0)/\Delta t_{\max}$  – відносний перепад температури.

Проінтегрувавши вираз (1), отримаємо співвідношення для визначення середньооб'ємної температури у більш простому вигляді:

$$\bar{T} = \frac{T + T_0}{2} + \frac{B_K^2 I_{\max K}^2 R}{12K}, \quad (2)$$

де  $K = \kappa S/l$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/К;



$\kappa$  – усереднене значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(см·К).

Співвідношення (2) можна представити у вигляді

$$\bar{T} = \frac{T_0 + T}{2} + \frac{B_K^2 \Delta T_{\max}}{6}. \quad (3)$$

Зі зростанням відносного робочого струму  $B_K$  збільшується середньооб'ємна температура  $\bar{T}$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300$  К в режимі теплового насоса (рис. 1, 2).

З виразу (2) можна визначити відносний перепад температури

$$\Theta = B_K^2 \frac{I_{\max K}^2 R}{12K \Delta T_{\max}} = \frac{B_K^2}{6}. \quad (4)$$

З ростом відносного робочого струму  $B_K$  збільшується відносний перепад температури для різної геометрії галузей термоелементів при  $T = 300$  К в режимі теплового насоса (мал. 3).

Співвідношення для холодопродуктивності однокаскадного ТЕП можна записати у вигляді

$$Q_0 = n I_{\max}^2 R (2B_K - B_K^2 - \Theta), \quad (5)$$

де  $n$  – кількість термоелементів.

Підставивши (4) у (5) знайдемо:

$$K = \frac{Q_0}{n I_{\max}^2 R} = 2B_K - B_K^2 - B_K^2 \frac{I_{\max K}^2 R}{12K \Delta T_{\max}}. \quad (6)$$

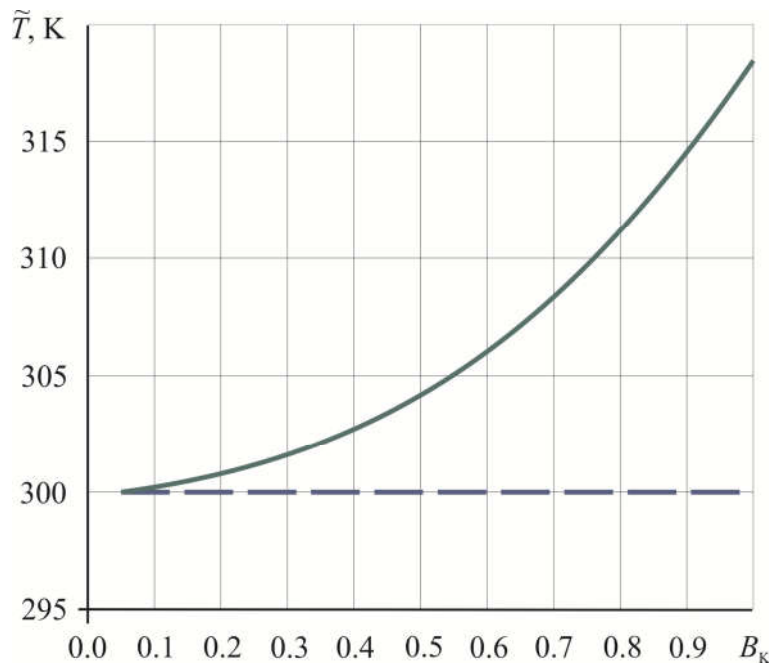


Рис. 1. Залежність середньооб'ємної температури  $\tilde{T}$  гілок однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_K$  за  $T = 300$  К: суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

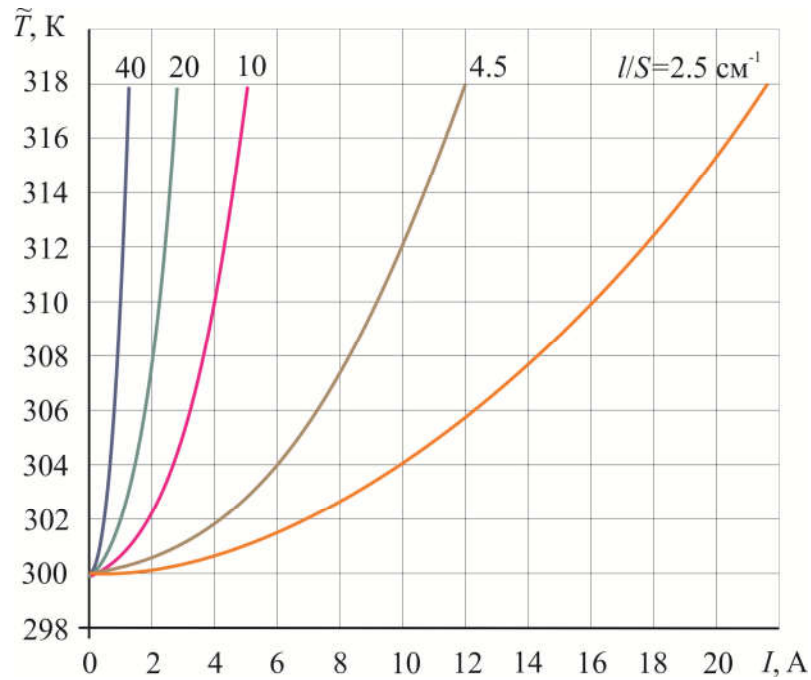


Рис. 2. Залежність середньооб'ємної температури  $\tilde{T}$  гілок однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від робочого струму  $I$  за  $T = 300$  К для різної геометрії гілок термоелементів

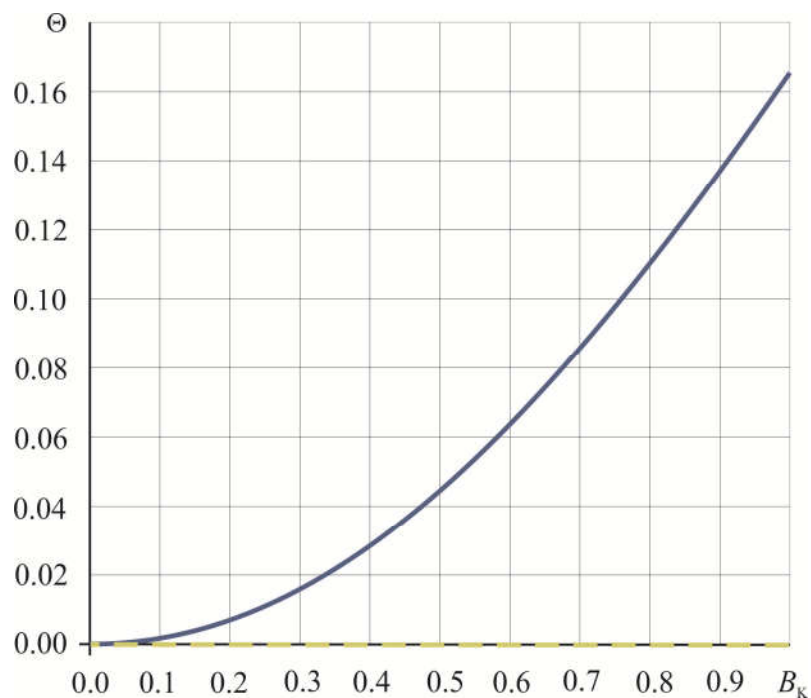


Рис. 3. Залежність відносного перепаду температури  $\Theta$  гілки однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_k$  при  $T = 300$  К: суцільна лінія – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

З умови  $dK/dB_k = 0$  одержимо співвідношення для оптимального відносного робочого струму  $B_{opt}$ , який відповідає максимуму холодопродуктивності в режимі теплового насоса:

$$B_{\text{опт}} = \left( 1 + \frac{I_{\text{макс}K}^2 R}{12K\Delta T_{\text{макс}}} \right)^{-1} = \frac{6}{7}. \quad (7)$$

Оптимальна величина відносного робочого струму  $B_{\text{опт}}$  не залежить від геометрії гілок термоелементів.

На рис. 4 представлено залежності холодопродуктивності від відносного робочого струму  $B_K$  з урахуванням і без урахування перегріву для різної геометрії гілок термоелементів за  $T = 300 \text{ K}$  для заданої кількості термоелементів  $n = 5$ .

Зі зростанням відносного робочого струму  $B_K$  функціональна залежність холодопродуктивності  $Q_0$  від відносного робочого струму  $B_K$  з урахуванням перегріву гілок термоелементів має максимум (мал. 4)

Відповідно до [12] час виходу  $\tau$  на стаціонарний режим роботи однокаскадного ТЕП можна визначити з виразу:

$$\tau = \frac{\sum_i m_i C_i}{K_K (1 + 2B_K \Delta T_{\text{макс}}/T_0)} \ln \frac{\gamma B_H (2 - B_H)}{2B_K - B_K^2 - \Theta}, \quad (8)$$

де  $\gamma = \frac{I_{\text{макс}H}^2 R_H}{I_{\text{макс}K}^2 R_K}$ ;

$I_{\text{макс}H} = e_H T / R_H$  – максимальний робочий струм за  $\tau_H = 0$  на початку процесу відведення теплової потужності, А;

$I_{\text{макс}K} = e_K T_0 / R_K$  – максимальний робочий струм у момент часу  $\tau_K$  наприкінці процесу відведення теплової потужності, А;

$e_H, e_K$  – відповідно, коефіцієнт термоЕРС гілки термоелемента на початку й наприкінці процесу відведення теплової потужності, В/К;

$R_H, R_K$  – відповідно, електричний опір галузей термоелемента на початку й наприкінці процесу відводу теплової потужності, Ом;

$B_H = I / I_{\text{макс}H}$  – відносний робочий струм у момент часу  $\tau = 0$  на початку процесу відводу теплової потужності;

$B_K = I / I_{\text{макс}K}$  – відносний робочий струм у момент часу  $\tau_K$  наприкінці процесу відводу теплової потужності;

$\Theta = \Delta T / \Delta T_{\text{макс}}$  – відносний перепад температури;

$\Delta T = T - T_0$  – робочий перепад температури в ТЕП, К;

$\sum_i m_i C_i$  – сумарна величина добутку теплоємності та маси складових конструктивних та технологічних елементів (КТЕ) ТЕП.

За умови рівності струмів на початку й наприкінці процесу відведення теплової потужності

$$I = B_H I_{\text{макс}H} = B_K I_{\text{макс}K}. \quad (9)$$

Кількість термоелементів  $n$  можна визначити зі співвідношення

$$n = \frac{Q_H}{I_{\text{макс}K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (10)$$

де  $Q_H$  – тепла потужність, що виділяється, Вт.

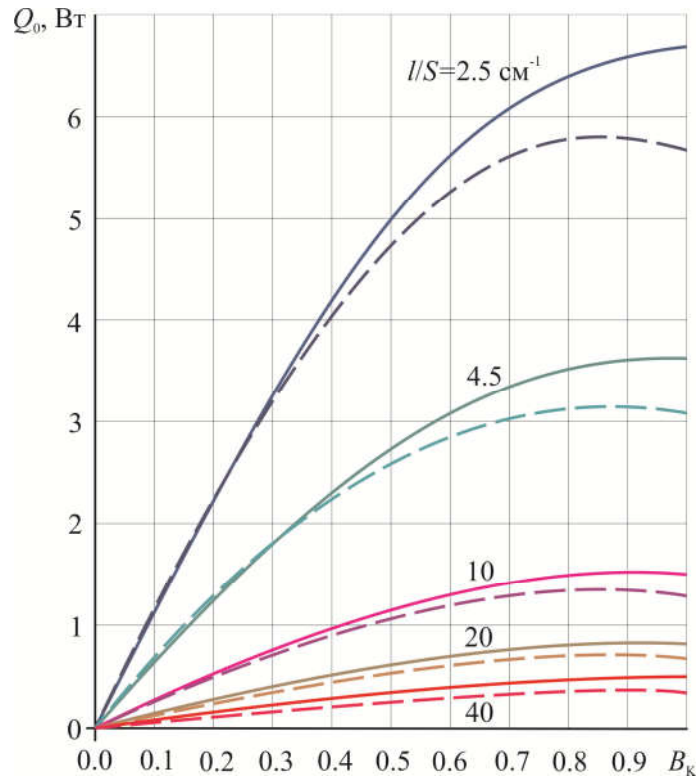


Рис. 4. Залежність холодопродуктивності  $Q_0$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_K$  для різної геометрії гілок термоелементів за  $T = 300 \text{ K}$ ,  $n = 5$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

Потужність споживання  $W_K$  ТЕП можна визначити з виразу

$$W_K = 2nI_{\max K}^2 R_K B_K \left( B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (11)$$

Спад напруги  $U_K$  можна визначити зі співвідношення:

$$U_K = W_K / I. \quad (12)$$

Тепловий коефіцієнт  $\mu$  можна обчислити за формулою:

$$m = Q_H / W_K. \quad (13)$$

Відносну величину інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  можна визначити з виразу [11]:

$$\lambda/\lambda_0 = nB_K^2 (\Theta + C) \left[ \frac{B_K + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta}{1 + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta} \right] K_{T_1}, \quad (14)$$

де  $C = Q_H/nI_{\max K}^2 R_K$  – відносне теплове навантаження;

$K_{T_1}$  – значимий температурний коефіцієнт.

Імовірність безвідмовної роботи  $P$  ТЕП можна визначити за формулою

$$P = \exp[-\lambda t], \quad (15)$$

де  $t$  – призначений ресурс, год.

### Аналіз моделі взаємозв'язку показників надійності та динаміки гілок термоелемента з конструктивними та енергетичними параметрами

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності при функціонуванні ТЕП з різною геометрією гілок термоелементів ( $l/S$ ) у режимі теплового насоса за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5$  Вт,  $l/S = 2.5; 4.5; 10; 20; 40$  см<sup>-1</sup> для різних струмових режимів роботи наведено в табл. 1 – 5.

Таблиця 1

$$T = 300 \text{ К } \Delta T_{\max} = 108 \text{ К}; Q_0 = 5,5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.114 \text{ Дж/К}; R_H = 2,78 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_K = 2.91 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; I_{\max H} = 22.0 \text{ А}; I_{\max K} = 21.3 \text{ А}; K = 6.16 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 2,5 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ К}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ К}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ с}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8} \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0,167	0,393	14.0	0.66	5.0	2.16	21.3	0.969	5.0	15.0	0.9985
		300	0,0	0,417	13.2	0.62	4.17				4.17	12.5	0.99875
15.0	0.916	315*	0,139	0,444	11.4	0.59	4.88	1.83	19.5	0.886	3.45	10.3	0.99897
		300	0,0	0,466	9.3	0.48	4.20				2.53	7.58	0.99924
13.0	0.853	313*	0,120	0,480	9.8	0.54	4.85	1.62	18.2	0.827	2.55	7.65	0.99923
		300	0,0	0,500	8.2	0.45	4.27				1.94	5.83	0.99942
10.0	0.748	310*	0,093	0,546	7.62	0.48	4.94	1.31	16.0	0.724	1.48	4.44	0.99956
		300	0,0	0,626	6.57	0.41	4.45				1.174	3.52	0.99965
5.0	0.529	305*	0,046	0,680	4.30	0.38	5.70	0.80	11.3	0.512	0.360	1.07	0.999893
		300	0,0	0,735	3.95	0.35	5.35				0.306	0.92	0.999908
3.0	0.410	303*	0,028	0,750	3.05	0.35	6.70	0.55	8.7	0.397	0.127	0.38	0.999962
		300	0,0	0,795	2.84	0.33	6.40				0.112	0.337	0.999966
1.0	0.237	301*	0,009	0,860	1.53	0.31	10.20	0.18	5.0	0.229	0.014	0.041	0.9999960
		300	0,0	0,881	1.48	0.30	9.97				0.013	0.039	0.9999961

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 2

$$T = 300 \text{ К}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ К}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.04517 \text{ Дж/К}; R_H = 5.0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_K = 5.23 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; I_{\max H} = 12.24 \text{ А}; I_{\max K} = 11.9 \text{ А}; K = 3.42 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 4.5 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ К}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ К}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ с}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8} \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	1.17	8.9	1.47	11.9	0.972	8.9	22.3	0.9973

Продовження таблиці 2

		300	0.0	0.50	11.0	0.925	7.4				7.4	22.3	0.99777
15.0	0.912	315*	0.139	0.445	11.3	1.04	8.7	1.25	10.9	0.886	6.0	18.0	0.9982
		300	0.0	0.544	9.23	0.85	7.5				4.42	13.3	0.99867
13.0	0.825	313*	0.120	0.465	9.82	0.97	8.75	1.10	10.1	0.825	4.47	13.4	0.9987
		300	0.0	0.575	8.18	0.80	7.66				3.37	10.1	0.9990
10.0	0.744	310*	0.093	0.547	7.56	0.85	8.83	0.90	8.9	0.724	2.58	7.75	0.99923
		300	0.0	0.63	6.52	0.74	8.0				2.05	6.15	0.99939
5.0	0.526	305*	0.046	0.68	4.31	0.69	10.2	0.53	6.3	0.512	0.62	1.87	0.99981
		300	0.0	0.74	3.93	0.63	9.6				0.534	1.60	0.99984
3.0	0.410	303*	0.028	0.75	3.0	0.63	12.0	0.30	4.85	0.40	0.22	0.664	0.99993
		300	0.0	0.80	2.81	0.58	11.4				0.20	0.590	0.99994
1.0	0.235	301*	0.0093	0.86	1.52	0.54	18.3	0.09	2.80	0.23	0.022	0.066	0.999993
		300	0.0	0.88	1.46	0.52	17.9				0.022	0.066	0.999994
0.5	0.166	300.5*	0.0046	0.90	1.114	0.56	24.8	0.05	1.98	0.16	0.0076	0.023	0.999997
		300	0.0	0.903	1.0	0.50	24.4				0.0056	0.017	0.999998

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 3

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.0175 \text{ Дж/К};$$

$$R_H = 1.11 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; R_K = 1.163 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 5.51 \text{ А};$$

$$I_{\max K} = 5.34 \text{ А}; K = 1.54 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 10 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	2.62	19.9	1.29	5.34	0.969	19.9	59.7	0.9940
		300	0.0	0.50	11.0	2.0	16.6				16.6	41.5	0.9959
15.0	0.914	315*	0.139	0.445	11.3	2.32	19.4	1.10	4.90	0.886	13.6	40.8	0.9959
		300	0.0	0.542	9.25	1.90	16.7				9.96	29.9	0.9970
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	0.96	19.3	0.97	4.54	0.827	10.0	30.0	0.9970
		300	0.0	0.575	8.12	0.80	16.9				7.62	22.9	0.9977
10.0	0.746	310*	0.093	0.547	7.60	1.90	19.7	0.78	4.0	0.723	5.8	17.4	0.9983
		300	0.0	0.627	6.53	1.63	17.7				4.6	13.8	0.9986
5.0	0.528	305*	0.046	0.68	4.33	1.54	22.7	0.46	2.8	0.512	1.41	4.23	0.99958
		300	0.0	0.74	3.94	1.40	21.3				1.29	3.63	0.99964
3.0	0.410	303*	0.028	0.75	3.04	1.39	26.6	0.30	2.2	0.40	0.50	1.50	0.99985
		300	0.0	0.80	2.83	1.29	25.4				0.47	1.40	0.99986
1.0	0.236	301*	0.0093	0.86	1.52	1.21	40.7	0.10	1.3	0.23	0.054	0.162	0.999984
		300	0.0	0.882	1.41	1.12	39.8				0.053	0.159	0.999984
0.5	0.167	300.5*	0.0046	0.90	1.03	1.15	55.0	0.02	0.89	0.16	0.0134	0.040	0.9999960
		300	0.0	0.916	1.0	1.13	54.2				0.0129	0.039	0.9999961

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 4

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 8.58 \cdot 10^{-3} \text{ Дж К}; R_H = 2.22 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$R_K = 2.326 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 2.76 \text{ А}; I_{\max K} = 2.67 \text{ А}; K = 7.7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/К}; l/S = 20 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	5.24	39.8	1.30	2.67	0.967	39.8	119.4	0.9881
		300	0.0	0.50	11.0	4.12	33.2				33.2	99.6	0.9900
15.0	0.914	315*	0.139	0.410	11.37	4.66	38.9	1.10	2.44	0.884	27.2	81.6	0.99187
		300	0.0	0.543	9.25	3.79	33.4				23.1	69.4	0.9931
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	4.29	38.6	0.97	2.27	0.823	20.1	60.4	0.9940
		300	0.0	0.575	8.14	3.59	33.9				17.4	52.2	0.9948
10.0	0.741	310*	0.093	0.547	7.60	3.80	39.4	0.80	2.0	0.722	11.66	35.0	0.99650
		300	0.0	0.627	6.53	3.27	35.4				10.26	30.8	0.99692
5.0	0.528	305*	0.046	0.680	4.33	3.10	45.4	0.48	1.40	0.511	2.82	8.46	0.99915
		300	0.0	0.736	3.95	2.82	42.7				2.58	7.74	0.99923
3.0	0.410	303*	0.028	0.754	3.03	2.78	53.1	0.34	1.09	0.397	1.0	3.0	0.99970
		300	0.0	0.795	2.84	2.61	51.0				0.938	2.81	0.99972
1.0	0.236	301*	0.0093	0.860	1.52	2.41	81.5	0.16	0.63	0.229	0.108	0.324	0.9999676
		300	0.0	0.880	1.41	2.24	79.7				0.106	0.318	0.999968
0.5	0.167	300,5*	0.0046	0.900	1.03	2.31	110.0	0.07	0.45	0.162	0.027	0.080	0.9999920
		300	0.0	0.916	1.0	2.25	108.4				0.026	0.77	0.9999923

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 5

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 3.61 \cdot 10^{-3} \text{ Дж К}$$

$$; R_H = 4.44 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; R_K = 4.545 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 1.378 \text{ А}; I_{\max K} = 1.35 \text{ А};$$

$$K = 3.85 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/К}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	10.4	79.7	1.09	1.35	0.967	79.7	239.1	0.9764
		300	0.0	0.50	11.0	8.15	66.4				66.4	199.2	0.9803
15.0	0.914	315*	0.139	0.410	11.4	9.32	77.8	0.92	1.22	0.884	54.4	163.2	0.9838
		300	0.0	0.543	9.25	7.58	66.8				46.2	138.6	0.9862
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	8.6	77.2	0.81	1.14	0.823	40.2	120.6	0.9880
		300	0.0	0.575	8.14	7.2	67.8				34.8	104.4	0.9895
10.0	0.746	310*	0.093	0.547	7.60	7.6	78.8	0.66	1.0	0.722	23.3	70.0	0.9930
		300	0.0	0.627	6.53	6.54	70.8				20.5	61.6	0.9939
5.0	0.528	305*	0.046	0.680	4.33	6.19	90.8	0.40	0.7	0.511	5.64	16.9	0.9983
		300	0.0	0.736	3.95	5.64	85.4				5.16	15.5	0.99845
3.0	0.410	303*	0.028	0.754	3.03	5.51	106.2	0.31	0.55	0.397	2.0	6.0	0.99940

Продовження таблиці 5

		300	0.0	0.795	2.84	5.16	102.0				1.88	5.63	0.99944
1.0	0.236	301*	0.0093	0.860	1.52	4.90	163.0	0.12	0.31	0.229	0.22	0.65	0.999935
		300	0.0	0.880	1.41	4.55	160.0				0.21	0.64	0.999936
0.5	0.167	300.5*	0.0046	0.900	1.03	4.64	220.0	0.04	0.22	0.162	0.054	0.161	0.999984
		300	0.0	0.916	1.0	4.50	216.8				0.052	0.155	0.999985

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Для однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5$  Вт і різної геометрії гілок термоелементів  $l/S$  функціональна залежність кількості термоелементів від відносного робочого струму  $n = f(B_K)$ , визначена з урахуванням перегріву гілок термоелементів, має мінімум при  $B_{\text{опт}} = 0.856$ ; якщо ж перегріву не враховувати, екстремум функції  $n = f(B_K)$  не спостерігається (рис. 5).

За заданої величини відносного робочого струму  $B_K$  кількість термоелементів  $n$ , визначена з урахуванням перегріву гілок термоелементів, збільшується в порівнянні з  $n$ , отриманим без такого врахування. Для різної геометрії гілок термоелементів у максимумі для  $B_K = 1$  збільшення ( $\Delta n/n$ , %) становить у середньому 20 %. При цьому зі зменшенням відносного робочого струму  $B_K$  величина  $\Delta n/n$  теж зменшується.

Зі зменшенням відносного робочого струму  $B_K$ :

- зменшується величина теплового коефіцієнта  $\mu$  як при розрахунках з урахуванням перегріву гілок термоелементів, так і без нього (рис. 6). При  $B = 1$   $\Delta\mu/\mu$  становить 22 %, тобто тепловий коефіцієнт, визначений з урахуванням перегріву, зменшується на 22 %. Зі зменшенням  $B_K$  величина  $\Delta\mu/\mu$  теж зменшується. При цьому слід зазначити, що величина  $\Delta\mu/\mu$  не залежить від геометрії галузей термоелементів;

- збільшується відносна величина інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  (рис. 7). За заданої величини відносного робочого струму  $B$  величина  $\lambda/\lambda_0$  збільшується при врахуванні перегріву. Для різних  $l/S$  ця різниця ( $[\Delta\lambda/\lambda_0]/[\lambda/\lambda_0]$ , %) для  $B = 1$  становить близько 20%. З ростом  $l/S$  величина  $\lambda/\lambda_0$  збільшується. Зі зменшенням відносного робочого струму  $B$  величина  $[\Delta\lambda/\lambda_0]/[\lambda/\lambda_0]$  теж зменшується;

- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$  (рис. 8). За заданої величини відносного робочого струму  $B$  ймовірність безвідмовної роботи  $P$  для різних  $l/S$  при врахуванні перегріву зменшується при розрахунках з урахуванням перегріву. Зі зростанням  $l/S$  ймовірність безвідмовної роботи  $P$  також зменшується;

- збільшується час виходу на стаціонарний режим  $\tau$  (рис. 9) для різної геометрії галузей термоелементів  $l/S$ . При заданій величині відносного робочого струму  $B_K$  з ростом  $l/S$  час виходу на стаціонарний режим  $\tau$  зменшується.



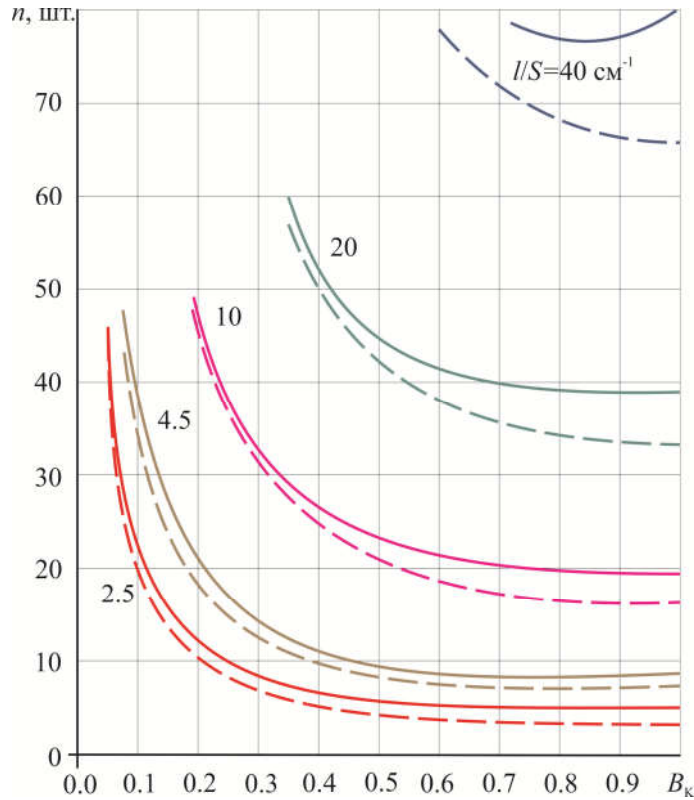


Рис. 5. Залежність кількості термоелементів  $n$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5,5\text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без врахування перегріву

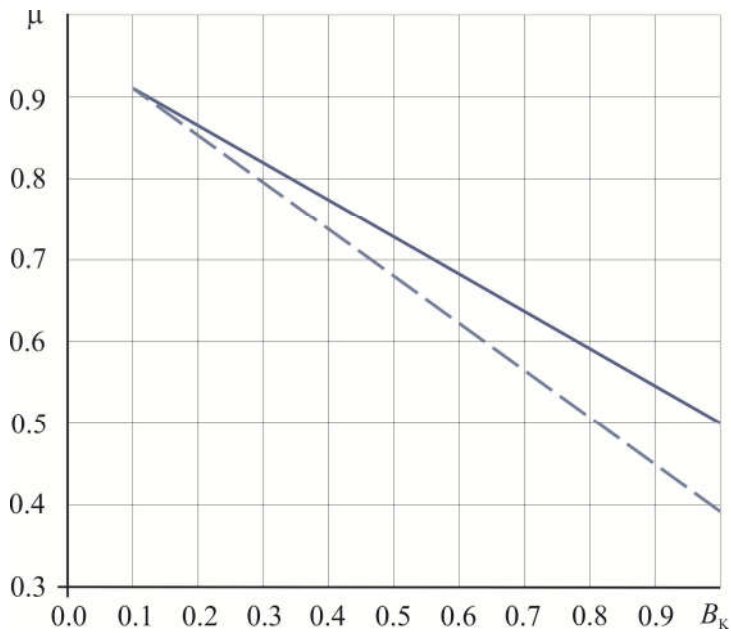


Рис. 6. Залежність теплового коефіцієнта  $\mu$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_k$  при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5,5\text{ Вт}$ : суцільна лінія – з урахуванням перегріву; пунктир – без врахування перегріву

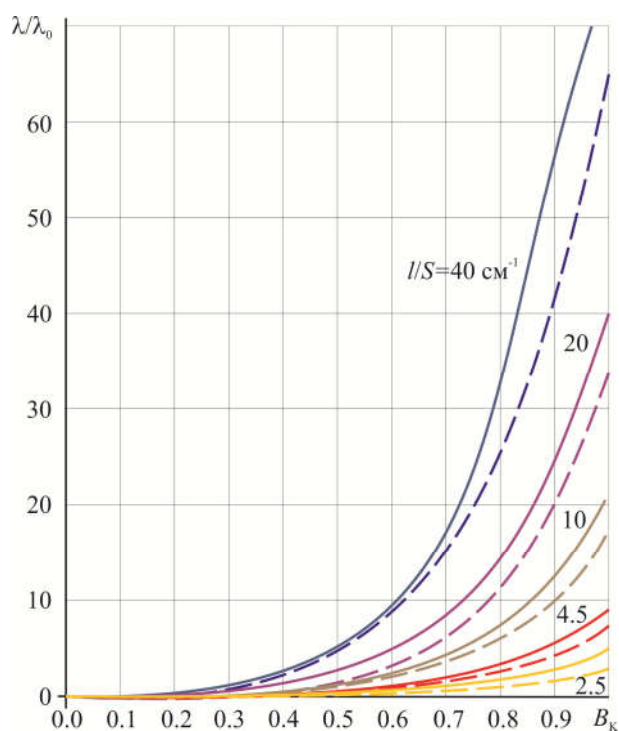


Рис 7. Залежність відносної величини інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5\text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

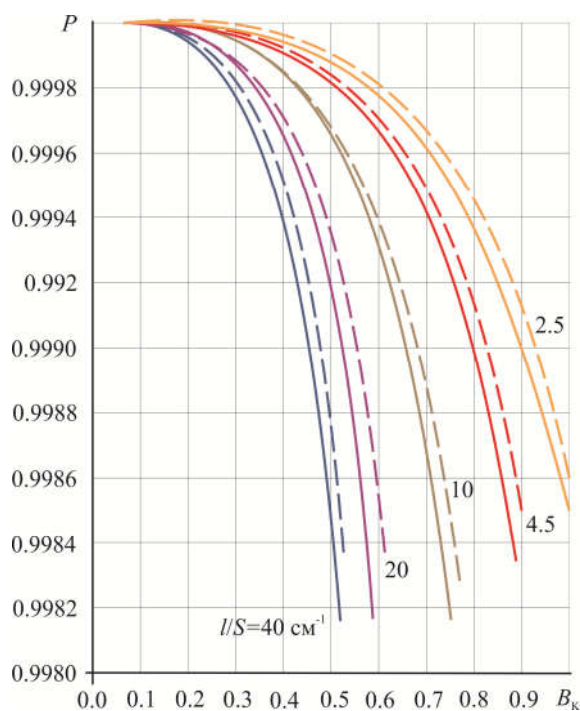


Рис 8. Залежність імовірності безвідмовної роботи  $P$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5\text{ Вт}$ ,  $t = 10^4\text{ год}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без обліку перегріву

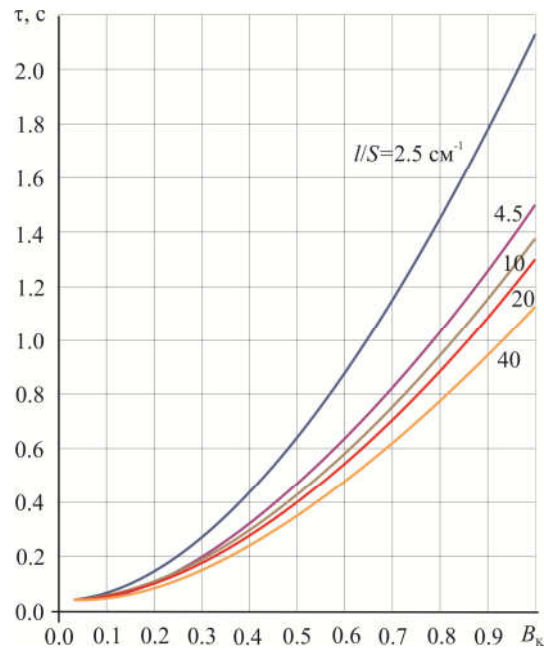


Рис. 9. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_K$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5 \text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

### Обговорення результатів аналізу моделі взаємозв'язки показників надійності, динаміки гілок термоелемента з конструктивними енергетичними параметрами

1) Визначено оптимальну величину відносного робочого струму  $B_{\text{опт}}$ , відповідну до максимуму холодопродуктивності з урахуванням перегріву.

2) З ростом середньооб'ємної температури за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5 \text{ Вт}$ :

- збільшується відносний робочий струм  $B_K$ ;
- збільшується відносний перепад температури  $\Theta$ ;
- зменшується тепловий коефіцієнт  $\mu$ ;
- збільшується споживана потужність  $W_K$ ;
- збільшується падіння напруги  $U_K$ ;
- зменшується кількість термоелементів  $n$ ;
- збільшується робочий струм  $I$ ;
- збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$ ;
- збільшується відносна величина інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$ ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$ .

3) Зі зростанням відношення  $l/S$ , яке характеризує геометрію гілок термоелементів, за заданої величини відносного робочого струму  $B_K$  та теплового навантаження  $Q_H$ :

- зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$ ;
- збільшується кількість термоелементів  $n$ ;
- збільшується відносна величина інтенсивності  $\lambda/\lambda_0$ ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$ .

4) Від геометрії гілок термоелементів ( $I/S$ ) не залежать середньооб'ємна температура  $\bar{T}$ , відносний перепад температури  $\Theta$ , тепловий коефіцієнт  $\mu$ .

## Висновки

1. Визначено взаємозв'язок середньооб'ємної температури  $\bar{T}$  гілки термоелемента й відносного робочого струму  $B_K$  для різної геометрії гілок термоелементів, який дозволяє визначати показники надійності та час виходу на стаціонарний режим.

2. Показано, що при проектуванні термоелектричних охолоджувальних пристроїв у режимі теплового насоса необхідно враховувати вплив середньооб'ємної температури на основні параметри, показники надійності й динаміку функціонування.

## Література

1. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества. *Термоэлектричество*. 2007. № 2. С.7–20.
2. Rowe D. M. Thermoelectric materials Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 2012. 544 p.
3. Jurgensmeyer A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. Colorado State University, 2011, 54 p.
4. Tsarev A.V., Chugunkov V.V. Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics, Moscow: The Board of RAS*. 2008. P.320–321.
5. Hyung –Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*. 2011. № 7. P. 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. Thermoelectric Mechanical Reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington. 2011. P. 18.
7. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxial. University of California, 2008. 54 p.
8. Ping Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2010. № 4(2–4). P.170–185.
9. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single–stage cooler. *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1/1 (85), P. 26–33.
10. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/8 (91). P. 12–24.
11. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. Одесса: Политех періодика, 2009. 120 с.
12. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. Analysis of dynamics and prediction of reliability in dicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/8 (95). P. 41–51.

Надійшла до редакції: 19.04.2018

**Зайков В.П.** канд. техн. наук.<sup>1</sup>,  
**Мещеряков В.И.** доктор техн. наук.<sup>2</sup>,  
**Журавлев Ю.И.**<sup>3</sup> канд. техн. наук.

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ШТОРМ,  
ул. Терешковой, 27, Одесса, Украина; *e-mail*: grand@i.ua;  
<sup>2</sup>Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, Одесса, Украина; *e-mail*: grand@ua.fm;  
<sup>3</sup>Национальный университет «Одесская морская академия»,  
ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина; *e-mail*: zhuravlov.y@ya.ru.

## **ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕТВИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ДИНАМИКУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

*Рассмотрено влияние среднеобъемной температуры ветви термоэлемента на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрического теплового насоса при заданной тепловой нагрузке для различной геометрии ветвей термоэлементов. Определено соотношение для оценки среднеобъемной температуры в зависимости от относительного рабочего тока и относительного рабочего тока, соответствующего максимуму холодопроизводительности. Показано, что с учетом среднеобъемной температуры уменьшается холодопроизводительность на один термоэлемент, увеличивается относительный перепад температуры, количество термоэлементов при заданной тепловой нагрузке, интенсивность отказов, увеличивается время выхода на стационарный режим работы. Библ. 12, Рис. 9, Табл. 5.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический охладитель, среднеобъемная температура, динамика функционирования термоэлемента, показатели надежности, перепад температур.

**V.P.Zaykov**<sup>1</sup>, *Candidate of Tech. science,*  
**V.I.Mescheryakov**<sup>2</sup>, *Doctor of Tech. science,*  
**Yu. I. Zhuravlov**<sup>3</sup>, *Candidate of Tech. science*

<sup>1</sup>SHTORM Research Institute, 27, Tereshkova str.,  
Odesa, Ukraine; *e-mail*: grand@i.ua;  
<sup>2</sup>Odesa State Ecological University, 15, Lvivska  
str., Ukraine; *e-mail*: grand@ua.fm;  
<sup>3</sup>National University "Odesa Maritime Academy", 8,  
Didrikhson str., Ukraine; *e-mail*: zhuravlov.y@ya.ru.

## **EFFECT OF THE VOLUMETRIC AVERAGE TEMPERATURE OF THERMOELEMENT LEG ON THE BASIC PARAMETERS, RELIABILITY INDICATORS AND DYNAMICS OF THERMOELECTRIC HEAT PUMP OPERATION**

*The effect of the volumetric average temperature of thermoelement leg on the basic parameters, reliability indicators and dynamics of thermoelectric heat pump operation at a given thermal load for different geometry of thermoelement legs is considered. The ratio has been determined to estimate the volumetric average temperature depending on the relative operating current corresponding to the maximum cooling capacity. It is shown that with regard to the volumetric average temperature, the cooling capacity per one thermoelement decreases, the relative temperature difference, the number of thermoelements at a given thermal load, the failure rate, the time to reach steady-state mode of operation increase. Bibl. 12, Fig. 9, tabl. 5.*

**Key words:** thermoelectric cooler, volumetric average temperature, dynamics of thermoelement operation, reliability indicators, temperature difference.

## References

1. Anatyshuk L.I. (2007). The current state and some perspectives of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7–20.
2. Rowe D. M. (2012). *Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*. Boca Raton: CRC Press.
3. Jurgensmeyer A. L. (2011). *High efficiency thermoelectric devices fabricated using quantum well confinement techniques*. Colorado State University.
4. Tsarev A.V., Chugunkov V.V. (2008). Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics, Moscow: The Board of RAS*.
5. Hyoung –Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letters*, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Arlington*.
7. Singh, R. (2008). *Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition via molecular beam epitaxial*. University of California.
8. Ping Yang. (2010). Approach on thermoelectricity reliability of board–level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 4(2–4), 170–185.
9. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. (2017). Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single–stage cooler. *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (85), 26–33.
10. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. (2018). Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (91), 12–24.
11. Zaikov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. (2009). *Prediction of reliability figures of thermoelectric cooling devices. Vol.1. Single-state devices*. Odessa: Politekhperiodica.
12. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. (2018). Analysis of dynamics and prediction of reliability indicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8 (95), 41–51.

Submitted 19.04.2018



Максимук М.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
e-mail: anatysh@gmail.com;

## НАТУРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕДПУСКОВОГО ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ

*Наведено результати досліджень термоелектричного передпускового джерела тепла на автомобілі в умовах понижених температур навколишнього середовища. Описано схему підключення нагрівника до системи охолодження автомобіля та розташування його функціональних компонент на транспортному засобі. Розглянуто теплові режими двигуна внутрішнього згорання та режими роботи акумуляторної батареї автомобіля, які забезпечуються передпусковим термоелектричним нагрівником. Представлено результати досліджень раціональності використання термоелектричних передпускових джерел тепла під час експлуатації транспортних засобів в кліматичних зонах з пониженими температурами повітря. Бібл. 15, рис. 12.*

**Ключові слова:** передпусковий нагрівник, термоелектричний генератор.

### Вступ

Одним із перспективних методів вирішення проблеми розрядки акумуляторів під час теплової підготовки двигунів транспортних засобів до запуску є використання термоелектричних генераторів в якості джерел електричної енергії для передпускових нагрівників [1 – 6]. Ця ідея покладена в основу досліджень, що проводились в Інституті термоелектрики, спрямованих на створення термоелектричних передпускових джерел тепла для двигунів легкового автотранспорту [7 – 11]. В результаті проведених досліджень розроблено експериментальний зразок термоелектричного передпускового нагрівника на дизельному паливі тепловою потужністю 3 кВт для попереднього розігріву двигунів внутрішнього згорання об'ємом до 4 л. Нагрівник містить термоелектричний генератор електричною потужністю 80 – 100 Вт, який працює від тепла передпускового нагрівника та забезпечує живлення його компонент. Крім того надлишок електричної енергії термогенератора може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї автомобіля, що було підтверджено експериментальними випробуваннями нагрівника в стендових умовах [12]. Однак, в ході стендових досліджень неможливо врахувати ряд ключових факторів, які неодмінно будуть мати місце при експлуатації нагрівника на транспортному засобі: вплив понижених температур на конструктивні елементи та функціональні можливості нагрівника, тепловідвід від двигуна, втрати тепла на елементах гідравлічної системи. Тому для підтвердження працездатності термоелектричного нагрівника в реальних умовах експлуатації актуальними стають натурні випробування.

Метою даної роботи є дослідження теплових та електричних характеристик термоелектричного передпускового джерела тепла на автомобілі в умовах понижених температур навколишнього середовища.

### Схема підключення та методика вимірювання

Дослідження роботи термоелектричного передпускового нагрівника проводили на автомобілі «Mercedes» об'ємом двигуна 2.8 л. Схему підключення термоелектричного передпускового нагрівника до автомобіля наведено на рис. 1.

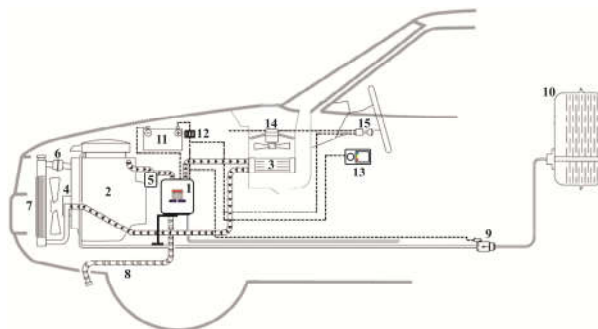


Рис.1. Схема підключення термоелектричного передпускового нагрівника до автомобіля:  
 1 – термоелектричний передпусковий нагрівник; 2 – двигун; 3 – радіатор системи опалення;  
 4 – штатний рідинний насос автомобіля; 5 – циркуляційна рідинна помпа нагрівника;  
 6 – термостат охолоджуючої рідини; 7 – радіатор; 8 – колектор вихлопних газів нагрівника;  
 9 – паливний насос нагрівника; 10 – ємність з паливом; 11 – акумуляторна батарея;  
 12 – блок запобіжників; 13 – панель керування нагрівником;  
 14 – вентилятор системи опалення; 15 – вимикач вентилятора системи опалення.

Термоелектричний нагрівник встановлювали в моторному відсіку між колісною нішею та переднім бампером за допомогою опорного кронштейна, який закріплювався до каркасу автомобіля.



Рис.2. Термоелектричний передпусковий нагрівник на автомобілі «Mercedes»:  
 1 – термоелектричний передпусковий нагрівник; 2 – двигун;  
 3 – верхня панель радіатора системи опалення; 4 – штатний рідинний насос автомобіля;  
 5 – циркуляційна рідинна помпа нагрівника;  
 6 – комутаційні шланги; 7 – акумуляторна батарея.

В гідравлічному контурі автомобіля нагрівник розташовували між двигуном та системою опалення салону таким чином, щоб рідкий теплоносій, рухаючись по малому контуру охолодження («двигун-радіатор опалення-штатний насос») з виходу нагрівника попадав на вхід в двигун (рис. 2). При цьому циркуляційний насос підключали стороною нагнітання до входу в двигун. Комутація нагрівника до гідравлічної системи здійснювалась бензомаслостійкими шлангами.



Дизельне паливо в нагрівник подавалося з окремої ємності, яку разом з паливним насосом розміщували в багажному відділенні автомобіля (рис.3а). За допомогою електро- та паливопроводів паливний насос підключався до встановленого під капотом автомобіля нагрівника (рис. 3б).

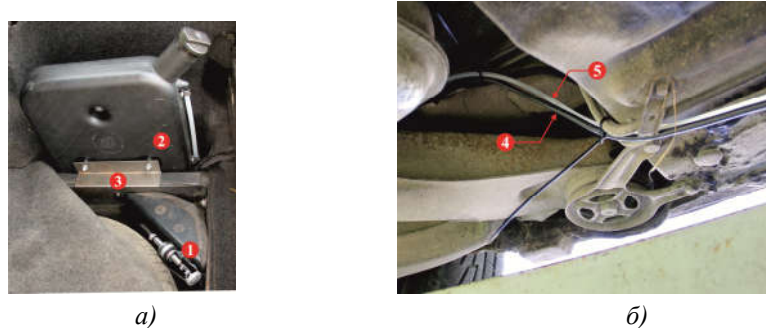


Рис. 3. Розміщення паливної ємності та паливного насосу (а), електро- та паливопроводів (б): 1 – паливний насос нагрівника; 2 – паливна ємність; 3 – кронштейн кріплення; 4 – електропровід; 5 – паливопровід.

Панель керування нагрівником розміщували в салоні автомобіля під бортовою панеллю управління (рис. 4). Панель керування підключалась до нагрівника електричним шлейфом, протягнутим від моторного відсіку, з місця, де встановлювався нагрівник, до салону, повз бічну внутрішню сторону каркасу автомобіля.

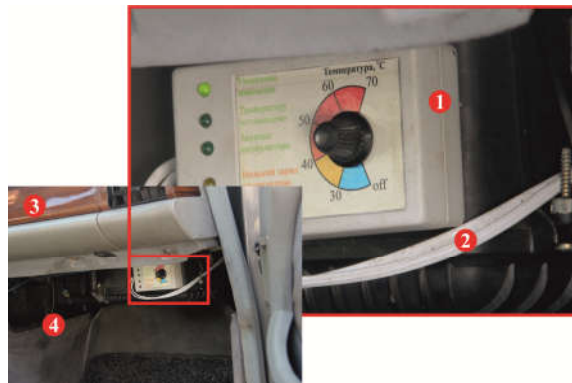


Рис. 4. Розміщення панелі керування: 1 – панель керування нагрівником; 2 – електричний шлейф-комутатор; 3 – бортова панель управління; 4 – салон автомобіля.

Термоелектричний нагрівник підключався до акумуляторної батареї автомобіля через блок запобіжників. Відпрацьовані гази нагрівника відводились за межі транспортного засобу колектором вихлопних газів.

В ході натурних досліджень вимірювались температура двигуна та напруга і струм акумуляторної батареї автомобіля. Схеми вимірювання цих величин наведено на рис. 5 – 6.

Температура двигуна вимірювалась хромель-алюмелевими термопарами (ТХА3), які закріплювались під блок головок циліндрів. Для визначення теплових втрат на елементах гідравлічної системи додатково визначалися температури теплоносія на виході з нагрівника (термопара ТХА1) і на вході в двигун автомобіля (термопара ТХА2). Вимірювання теплових характеристик проводили за температур навколишнього середовища  $T_0 = (0; -5; -10) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

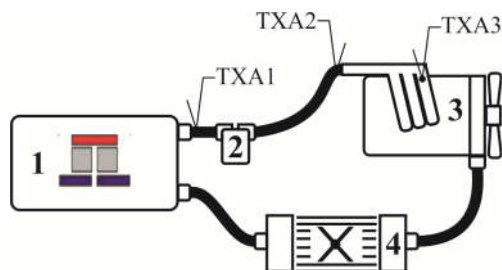


Рис. 5. Схема вимірювання теплових характеристик: 1 – термоелектричний нагрівник; 2 – циркуляційна рідинна помпа; 3 – двигун внутрішнього згорання; 4 – радіатор системи опалення.

Режими (зарядка/розрядка) акумуляторної батареї при роботі термоелектричного передпускового нагрівника оцінювали за вихідною електричною напругою акумулятора, яка знімалась безпосередньо з його клем та силою струму в колі "нагрівник-акумулятор". Момент включення режиму зарядки акумуляторної батареї фіксували за зміною напрямку струму в колі та відповідним сигналом світлодіодної індикації на панелі керування нагрівником.

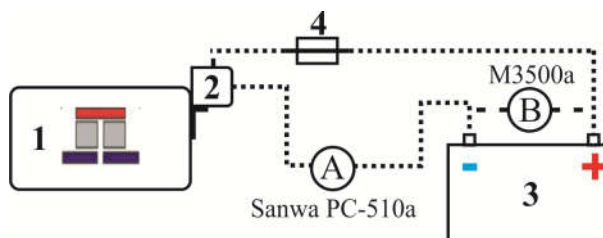


Рис. 6. Схема вимірювання електричних характеристик: 1 – термоелектричний нагрівник; 2 – електронний блок нагрівника; 3 – акумулятор; 4 – блок запобіжників.

З метою визначення економії палива, яка забезпечується передпусковим розігрівом двигуна, проводились дослідження витрати палива при прогріві транспортного засобу на холостому ході.

## Результати дослідження

На рис. 7 наведено експериментально встановлені залежності температури розігріву двигуна  $T_d$  від часу роботи термоелектричного передпускового нагрівника  $t$  при температурах навколишнього середовища  $T_0 = (-10; -5; 0) ^\circ\text{C}$ .

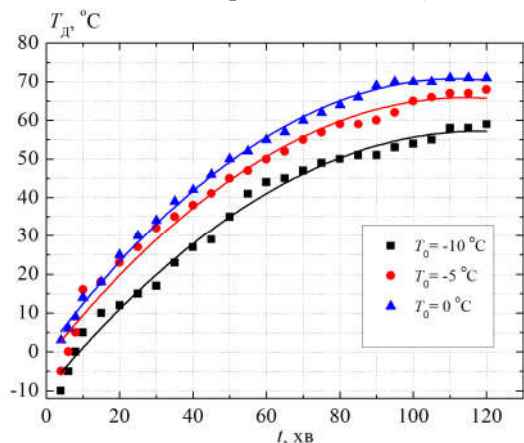


Рис. 7. Залежність температури розігріву двигуна  $T_d$  автомобіля від часу роботи  $t$  термоелектричного передпускового нагрівника при різних температурах навколишнього середовища  $T_0$ .

З наведених даних видно, що термоелектричний нагрівник забезпечує передпусковий підігрів двигуна автомобіля до оптимальної для його запуску температури  $T_d \approx 70 ^\circ\text{C}$  при температурах навколишнього

середовища  $T_0 \geq -5$  °С за 100 - 110 хвилин своєї роботи. Втрати температури на ділянці контуру "нагрівник-двигун" гідравлічної системи складають  $\sim 5$  °С (рис.8).

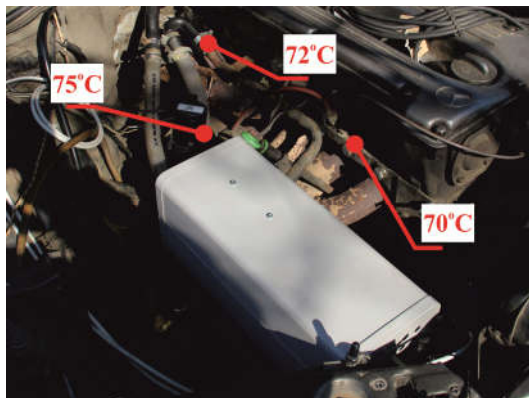


Рис. 8. Розподіл температур на ділянці контуру "нагрівник-двигун".  $T_0 = -5$  °С.

На рис. 9 наведено режими роботи акумуляторної батареї автомобіля, які забезпечуються термоелектричним нагрівником в передпусковий період.

Як видно з рис. 9 після запуску нагрівника, живлення його компонент здійснюється від акумулятора. Режим розрядки акумуляторної батареї триває до моменту, коли вихідна потужність генератора не буде рівною споживаній потужності компонент. Після цього електронний блок керування відключає живлення компонент від акумулятора – нагрівник переходить в автономний режим роботи. По мірі збільшення вихідної електричної потужності генератора електронний блок спрямовує надлишок електричної енергії на підзарядку акумулятора [13, 14].

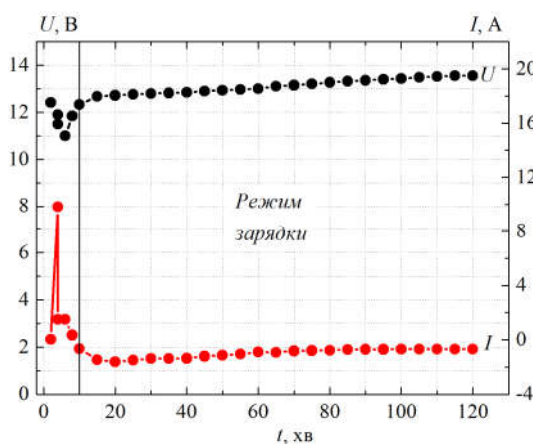


Рис. 9. Залежність напруги  $U$  на акумуляторі та струму  $I$  в колі "нагрівник акумулятор"

від часу роботи  $t$  термоелектричного передпускового нагрівника.  $T_0 = -5$  °С.

Режим зарядки акумуляторної батареї вмикається на десятій хвилині роботи нагрівника, причому вже на двадцятій хвилині струм зарядки  $I$  досягає свого максимуму  $I = \sim 2$  А. Рівень напруги на акумуляторній батареї автомобіля в момент включення зарядки складає 12 В і по мірі виходу нагрівника в стаціонарний режим роботи підвищується до 14 В. Отже, максимальна потужність, яка використовується для зарядки акумулятора в даному випадку становить 30 Вт. В подальшому рівень електричної потужності термогенератора, який споживається акумулятором знижується до 10 Вт, що зв'язано як з прогрівом охолоджуючої

рідини двигуна, так і з підвищенням рівня зарядженості самого акумулятора. Слід зауважити, що для кожного конкретного застосування, величина електричної потужності, яка використовується для підзарядки буде різною, оскільки визначатиметься індивідуальним ступенем зарядженості акумулятора (рис. 10) [15].

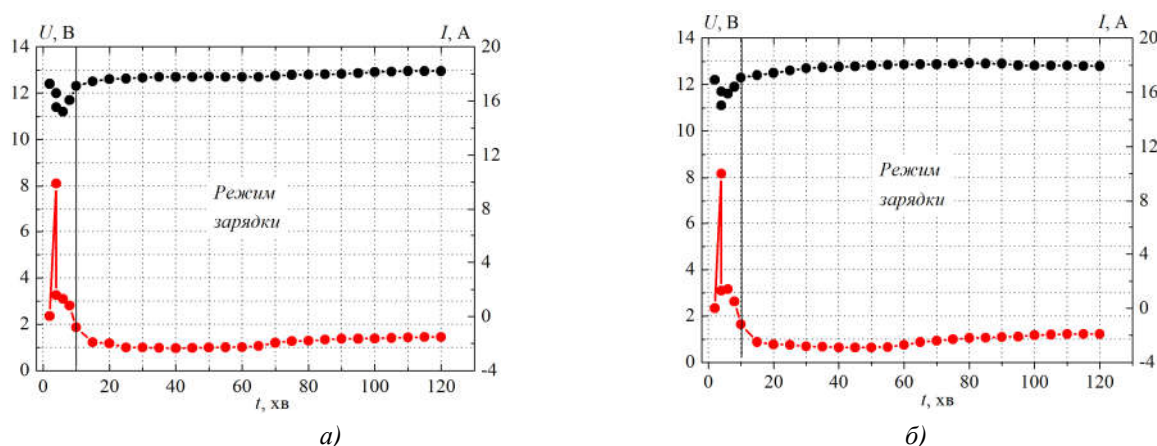


Рис. 10. Залежність напруги  $U$  на акумуляторі та струму  $I$  в колі "нагрівник акумулятор" від часу роботи  $t$  термоелектричного передпускового нагрівника. а)  $T_0 = -0\text{ }^\circ\text{C}$ ; б)  $T_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ .

В ході натурних випробувань нагрівника досліджувались теплові режими двигуна та режими роботи акумулятора при встановленні з панелі керування нижчих температур охолоджуючої рідини двигуна –  $(30 \div 60)\text{ }^\circ\text{C}$ . В таких випадках спрацьовував температурний датчик перегріву і нагрівник починав працювати в режимі підтримки заданої температури теплоносія. При цьому поведінка температурних та електричних характеристик є аналогічною до результатів стендових досліджень описаних в [12], з врахуванням різниці температур в тепловому розподілі гідравлічного контуру двигуна, яка практично не змінювалася.

Порівняльні залежності витрати палива при прогріві автомобіля на "холостому" ходу та у випадку використання термоелектричного нагрівника наведено на рис. 11 – 12.

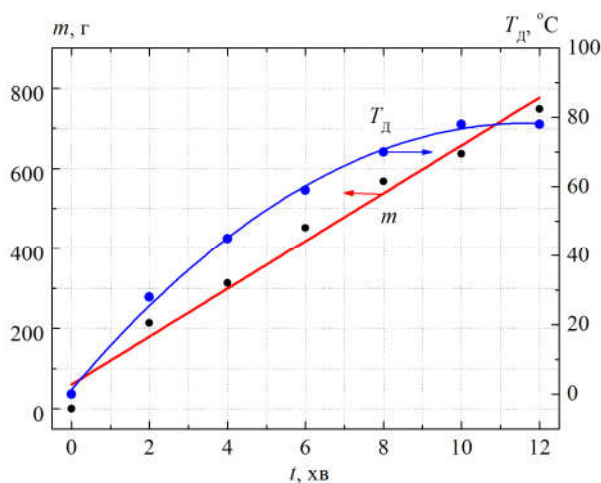


Рис. 11. Залежність кількості затраченого палива  $m$  та температури розігріву двигуна  $T_d$  від часу прогріву  $t$  автомобіля на "холостому ходу".  $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .

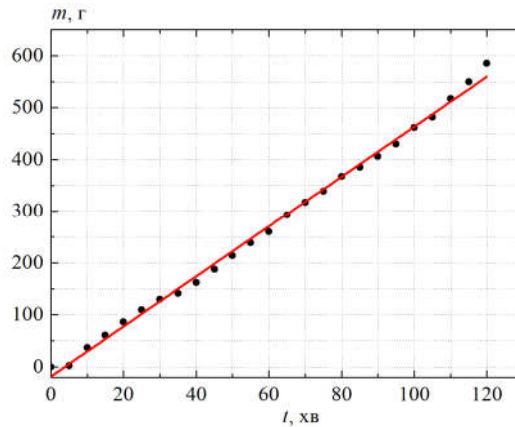


Рис. 12. Залежність кількості витраченого палива  $m$  від часу роботи  $t$  термоелектричного передпускового нагрівника.  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ .

В порівнянні з прогрівом за допомогою термоелектричного нагрівника, «холостий хід» вже на 10 хв. забезпечує оптимальну для старту автомобіля температуру на двигуні  $T_{\text{д}} = 80^\circ\text{C}$ . Проте, в цьому випадку, маса спаленого палива  $m$  складає 700 г, що майже в 2.5 рази перевищує кількість витраченого палива при передпусковому підігріві. Суттєво зменшити витрату пального на "холостих обертах" ( $m = 200$  г) дозволяє розігрів двигуна до мінімально допустимих для його запуску температур ( $T_{\text{д}} = 20^\circ\text{C}$ ). Однак і тоді переваги передпускового підігріву є очевидними, оскільки для забезпечення таких теплових режимів необхідно затратити в 3 рази менше палива ( $m = 65$  г, рис. 7, рис. 12).

Таким чином, використання нагрівника лише при одному запуску двигуна дозволяє зекономити  $(0.2 \div 0.5)$  л палива. Якщо врахувати, що за один зимовий сезон ( $\sim 100$  днів) автомобіль здійснює в середньому 4 холодних пуски в день, то економія палива для автомобіля з двигуном об'ємом 2.8 л складатиме 120 – 150 л.

## Висновки

1. Підтверджено, що використання термоелектричного генератора в конструкції передпускових нагрівників вирішує проблему розрядки акумуляторної батареї при роботі передпускового обладнання.
2. Встановлено, що використання термоелектричного нагрівника забезпечує передпусковий підігрів двигуна автомобіля до оптимальних для його запуску температур.
3. Показано, що живлення компонент нагрівника від термоелектричного генератора здійснюється на 10 хвилині з моменту його включення. По мірі збільшення вихідної електричної потужності термогенератора електронний блок спрямовує надлишок електричної енергії на підзарядку акумуляторної батареї автомобіля. При цьому величина електричної потужності, яка використовується для підзарядки буде визначатися ступенем зарядженості акумулятора.
4. Встановлено, що застосування термоелектричного передпускового джерела тепла в автомобілях з об'ємом двигуна 2.8 л забезпечує економію  $(0.2 \div 0.5)$  л палива в порівнянні з одним "холодним запуском".

Автор висловлює подяку акад. Анатичуку Л.І. за тему та ідею наукового дослідження, а також за цінні поради при написанні роботи.

## Література

1. Пат. (UA) на винахід № 102303 МПК F01N 5/00 H01L 35/00. Термоелектричне джерело живлення для автомобіля / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 25.06.2013, бюл. №12, Заявка u2011 13957 від 28.11.2011.
2. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. №15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
3. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Максимук М.В. – Опубл. 25.04.2018, бюл. №8, Заявка u2017 11819 від 04.12.2017.
4. Pat. US6527548B1. Int.Cl. F24H 1/00. Self powered electric generating space heater / Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen – Date of patent 4.03.2003, App.No 10/176,312, Filed 20.06.2002.
5. Pat. US2010/0115968A1. Int.Cl. F25B 21/02. Heating apparatus comprising a thermoelectric devise / Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter – Date of patent 13.05.2010, App.No 11/993,608, Filed 23.06.2006.
6. Пат. (RU) 2268393C1. МПК: F02N 17/04. Устройство для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания / Прилепо Ю.П. – – Опубл. 20.01.2006, бюл. №02, Заявка 2005101942/06 от 27.01.2005.
7. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Режими роботи автомобілів при понижених температурах. Необхідність використання нагрівачів та раціональність застосування термогенераторів для їх роботи // Термоелектрика. – 2014.- №3.- С. 20-31.
8. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Раціональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів // Термоелектрика. – №4.– 2015. – С.65-74.
9. Максимук М.В. Про оптимізацію термоелектричних модулів автомобільного передпускового нагрівника // Термоелектрика. – 2017. – №1. – С.57–67.
10. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором. Дизельний варіант // Термоелектрика. – 2017. – С.32-43.
11. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2017. – Вип. 54(2) – С.53-60.
12. Максимук М.В. Стендові дослідження термоелектричного передпускового джерела тепла для автомобілів // Термоелектрика. – 2018. – №1.
13. Максимук М.В., Андрусак І.С. Електронний блок керування термоелектричним передпусковим автомобільним нагрівником // Термоелектрика. – №5.– 2016– С.65-74.
14. Патент (UA) № 90764 МПК F02N 19/00 Система керування передпусковим рідинним нагрівачем для двигунів внутрішнього згорання / Михайловський В.Я., Звоздецький П.В., Максимук М.В. – Опубл. 10.06.2014, бюл. № 11, Заявка u2013 15422 від 30.12.2013.
15. Бубнов Ю.И., Орлов С.Б. Герметичные химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации. – Справочник. – Санкт-Петербург: Химиздат. – 2005.

Надійшла до редакції 03.05.2018

**Максимук Н.В.**

Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1, Черновцы,  
58029, Украина; e-mail: [anatykh@gmail.com](mailto:anatykh@gmail.com)

**НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПРЕДПУСКОВОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ**

*Приведены результаты исследований термоэлектрического предпускового источника тепла на автомобиле в условиях пониженных температур окружающей среды. Описана схема подключения нагревателя к системе охлаждения автомобиля и размещение его функциональных компонент на транспортном средстве. Рассмотрены тепловые режимы двигателя внутреннего сгорания и режимы работы аккумуляторной батареи автомобиля, которые обеспечиваются предпусковым термоэлектрическим нагревателем. Представлены результаты исследований рациональности использования термоэлектрических предпусковых источников тепла во время эксплуатации транспортных средств в климатических зонах с пониженными температурами воздуха. Библиограф. 15, рис. 12.*

**Ключевые слова:** предпусковой нагреватель, термоэлектрический генератор.

**M.V. Maksimuk**

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

**FIELD RESEARCH ON A THERMOELECTRIC  
STARTING PRE-HEATER FOR CARS**

*The results of research on a thermoelectric starting pre-heater for a car under low ambient temperatures are presented. The diagram of connecting the heater to the car cooling system and the arrangement of its functional components on a vehicle are described. The thermal modes of internal combustion engine and the operating modes of car battery which are provided by a thermoelectric starting pre-heater are considered. The results of research on the rationality of using thermoelectric starting pre-heaters during operation of vehicles in climatic zones with low air temperatures are given. Bibl. 15, Fig. 12.*

**Key words:** starting pre-heater, thermoelectric generator.

**References**

1. Patent of Ukraine № 102303 (2013). Anatykhuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Thermoelectric power supply for automobile [in Ukrainian].
2. Patent of Ukraine №72304 (2012). Anatykhuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Automobile heater with thermoelectric power supply [in Ukrainian].

3. *Patent of Ukraine №124999* (2017). Maksimuk M.V. Automobile heater with thermoelectric power supply [in Ukrainian].
4. *Patent of US6527548B1* (2003). Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen. Self powered electric generating space heater.
5. *Patent of US0115968A1* (2010). Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter. Heating apparatus comprising a thermoelectric device.
6. *Patent of Russia 2268393* (2006). Prilepo Yu.P. A device to facilitate the start of internal combustion engine [in Russian].
7. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2014). Automobile operating conditions at low temperatures. The necessity of applying heaters and the rationality of using thermal generators for their work. *J. Thermoelectricity*, 3, 20-31.
8. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of vehicles. *J. of Thermoelectricity*, 4, 65–74.
9. Maksimuk M.V. (2017). On the optimization of thermoelectric modules of automobile starting pre-heater. *J. Thermoelectricity*, 1, 57–67.
10. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting pre-heater with a thermoelectric generator. Diesel version. *J. Thermoelectricity*, 2, 32-43.
11. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting preheater with a thermoelectric generator. *Herald of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series INSTRUMENTATION*, 54(2), 53-60 [in Ukrainian].
12. Maksimuk M.V. (2018). Bench tests of a thermoelectric starting preheater for cars. *J. Thermoelectricity*, 1,
13. Maksimuk M.V., Andrusiak I.S. (2016). Electronic control unit for thermoelectric automobile starting pre-heater. *J. of Thermoelectricity*, 5, 65–74.
14. *Patent of Ukraine № 90764* (2014). Mykhailovsky V.Ya., Zvozdetsky P.V., Maksimuk M.V. System of control of starting liquid pre-heater for internal combustion engines [in Ukrainian].
15. Bubnov Yu.I., Orlov S.B. (2005). *Germetichnyie khimicheskiie istochniki toka: elementy i akkumuliatory. Oborudovaniie dlia ispytaniy i ekspluatatsii. – Spravochnik [Sealed chemical current sources: elements and batteries. Testing and operating equipment. - Handbook]*. Saint-Petersburg: Khimizdat [in Russian].

Submitted 03.05.2018





Кшавецький О.С.

Чернівецький торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету,  
Центральна площа, 7, м. Чернівці, 58002, Україна  
e-mail: kshevos@gmail.com

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТИННОГО ВИПАДКУ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ МІЖ ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ І РУХОМОЮ РЕЧОВИНОЮ, ЧАСТИНА 2

*Теоретично проаналізовані особливості використання компресійних та термоелектричних теплових насосів у частинному випадковій способу тепломасообміну між рухомою речовиною і тепловими насосами, при якому рухома речовина (або принаймні частину цієї рухомої речовини) приводять у тепловий контакт з теплопоглинаючою і тепловиділяючою теплообмінними частинами принаймні двох теплових насосів. Наведені приклади відповідних розрахунків. Описані деякі варіанти відповідних можливих технічних рішень. Бібл. 11, рис. 9, табл. 2.*

**Ключові слова:** тепловий насос, рухома речовина, тепломасообмін, ефективність, енергоефективність, компресійний тепловий насос, термоелектричний тепловий насос, термоелектричний модуль.

### Вступ

Ця робота (частина 2) є продовженням попередньої роботи [1] (частини 1). У цій частині 2 будемо використовувати скорочення та аббревіатури, які були введені в [1], у тому ж значенні, як і в [1]. В [1] були отримані математичні вирази для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну*. Ці математичні вирази мають загальний характер і в них безпосередньо не враховується специфіка тих чи інших окремих типів ТН. В той же час добре відомо, що різні типи ТН мають різні властивості.

*Метою цієї роботи* є створення теоретичних передумов для наближеної кількісної оцінки ефективності (в першу чергу – енергоефективності) *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням компресійних ТН (КТН) та термоелектричних ТН (ТТН). Для реалізації такої мети *завданням цієї роботи* є аналіз відповідних специфіки КТН та специфіки ТТН. Також *завданням цієї роботи* є аналіз особливостей застосування КТН та ТТН у *досліджуваному способі тепломасообміну* та отримання математичних виразів, які можна було б використати для оцінки ефективності *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням КТН та з використанням ТТН. Також *завданням цієї роботи* є отримати приклади відповідних оціночних розрахунків.

### КТН у досліджуваному способі тепломасообміну

Для КТН в розрахунках у початковому наближенні використовують усереднену величину опалювального коефіцієнта, яка має значення приблизно 0.5 від значення опалювального

коефіцієнта відповідного циклу Карно [2, 3]. Використаємо це тут для відповідних подальших оціночних розрахунків. Прийmemo:

$$\mu_i^{KTH} = B_i^{KTH} \mu_{K,i}, B_i^{KTH} = const = 0.5, \quad (2.1)$$

де  $\mu_i^{KTH}$  – опалювальний коефіцієнт  $i$ -го КТН;  $B_i^{KTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність опалювального коефіцієнта  $i$ -го КТН від опалювального коефіцієнта ідеального ТН, який за тих самих умов працює за циклом Карно;  $\mu_{K,i}$  – опалювальний коефіцієнт ідеального ТН, який працює за циклом Карно за тих самих умов що й  $i$ -й КТН.

Розглянемо випадок досліджуваного способу тепломасообміну, в якому: всі ТН – це КТН; РР у її вхідному потоці охолоджують всіма окремо взятими КТН згідно з рис. 2 [1] так, що всі зміни температури РР в результаті її ТК з кожною окремо взятою ТЧ КТН у вхідному потоці цієї РР однакові (допущення 9 [1]). Для цього випадку  $\Delta T_{1,i}^{PP} = \Delta T_{cool,i}^{PP}$ ,  $\Delta T_1^{PP} = \Delta T_{cool}^{PP}$ ,  $\Delta T_{2,i}^{PP} = \Delta T_{hot,i}^{PP}$ ,  $\Delta T_2^{PP} = \Delta T_{hot}^{PP}$ . Для визначення сумарного перепаду температур РР у її вихідному потоці  $\Delta T_2^{PP}$  в такому випадку можна використати вирази (43) [1] і (2.1). В табл. 2.1 наведений приклад результатів відповідних розрахунків.

Таблиця 2.1

Приклад результатів оціночних розрахунків ефективності досліджуваного способу тепломасообміну з використанням КТН для випадку охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими КТН згідно з допущенням 9 [1] (згідно з рис. 2 [1];  $T_{2,n}^{PP} = T_{1,n}^{PP}$ )

$$B_i^{KTH} = const = 0.5)$$

Загальна кількість ТТН $n$	Вхідна температура РР $T_{1,0}^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці $\Delta T_1^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вихідному потоці $\Delta T_2^{PP}$ , К	$\frac{\Delta T_1^{PP}}{\Delta T_2^{PP} - \Delta T_1^{PP}}$
1	303.15	24	29.719	4.1965
2	303.15	24	26.443	9.8241

### ТТН у досліджуваному способі тепломасообміну

ТТН можуть бути виготовлені на основі термоелектричних модулів (ТМ). Холодильний та опалювальний коефіцієнти ТТН можуть бути меншими ніж відповідно холодильний та опалювальний коефіцієнти ТМ, [4 – 6]. Для того, щоб це врахувати прийmemo, що для  $i$ -го ТТН його холодильний коефіцієнт  $\varepsilon_i^{TTH}$  та його опалювальний коефіцієнт  $\mu_i^{TTH}$  визначаються за співвідношеннями:

$$\varepsilon_i^{TTH} = C_i^{TTH} \cdot \varepsilon_i^{TM}, C_i^{TTH} \leq 1; \quad (2.2)$$

$$\mu_i^{TTH} = D_i^{TTH} \cdot \mu_i^{TM}, D_i^{TTH} \leq 1, \quad (2.3)$$

де  $C_i^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнта  $i$ -го ТТН від холодильного коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що і цей ТТН;  $D_i^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність опалювального коефіцієнта  $i$ -го ТТН від опалювального коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що і цей ТТН;  $\varepsilon_i^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ (на основі якого виготовлений  $i$ -й ТТН), який працює в тих самих умовах, що й  $i$ -й ТТН;  $\mu_i^{TM}$  – опалювальний коефіцієнт ТМ (на основі якого виготовлений  $i$ -й ТТН), який працює в тих самих умовах, що й  $i$ -й ТТН.

Для досліджуваного способу тепломасообміну може бути бажаною робота ТН при якомога більших значеннях опалювального та холодильного коефіцієнтів. Особливо це може бути актуально для ТТН. Проаналізуємо, при яких режимах роботи ТТН можуть мати порівняно високі значення опалювального та холодильного коефіцієнтів. У ТТН, який виготовлений на основі ТМ суттєву роль відіграє ТМ. У зв'язку з цим проаналізуємо, при яких режимах роботи ТМ (типові ТМ, в яких всі вітки термоелементів електрично з'єднані послідовно, а з точки зору теплових потоків – паралельно; наприклад, ТМ ТЕС1-12706) можуть мати порівняно високі значення опалювального та холодильного коефіцієнтів. Для цього використаємо загально відомі співвідношення для визначення холодильного коефіцієнта ТМ  $\varepsilon^{TM}$  та опалювального коефіцієнта ТМ  $\mu^{TM}$  [4, 7]:

$$\varepsilon^{TM} = \frac{\alpha I T_{cool}^{TM} - \frac{1}{2} I^2 r - k(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM})}{I^2 r + \alpha(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}) I}, \quad (2.4)$$

$$\mu^{TM} = \frac{\alpha I T_{hot}^{TM} + \frac{1}{2} I^2 r - k(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM})}{I^2 r + \alpha(T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}) I}, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ;  $\alpha$  – диференціальний коефіцієнт Зеєбека матеріалу;  $I$  – сила струму, який протікає через ТМ;  $r$  – загальний електричний опір ТМ;  $k$  – теплопровідність ТМ;  $T_{hot}^{TM}$  – температура тепловиділяючої ТЧ ТМ;  $T_{cool}^{TM}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТМ;  $\mu^{TM}$  – опалювальний коефіцієнт ТМ.

Позначимо:

$$T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM} = \Delta T^{TM}. \quad (2.6)$$

На основі виразів (2.4) і (2.6) отримаємо:

$$\Delta T^{TM} = \frac{\alpha I T_{cool}^{TM} - I^2 r \left( \varepsilon^{TM} + \frac{1}{2} \right)}{\varepsilon^{TM} \alpha I + k}. \quad (2.7)$$

На основі виразів (2.5) і (2.6) отримаємо:

$$\Delta T^{TM} = \frac{\alpha I T_{hot}^{TM} + I^2 r \left( \frac{1}{2} - \mu^{TM} \right)}{\mu^{TM} \alpha I + k}. \quad (2.8)$$

З використанням виразу (2.7) можна отримати графіки залежності  $\Delta T^{TM}$  від  $I$  для фіксованих значень  $\varepsilon^{TM}$ . Приклад таких графіків наведений на рис. 2.1. З наведених графіків видно, наприклад, що відповідний ТМ може мати значення холодильного коефіцієнту більші 10 ( $\varepsilon^{TM} > 10$ ) тільки при достатньо малих значеннях різниці температур  $\Delta T^{TM}$  і сили струму  $I$  (відповідні точки на площині графіків обмежені кривою для  $\varepsilon^{TM} = 10$  і знаходяться нижче цієї кривої).

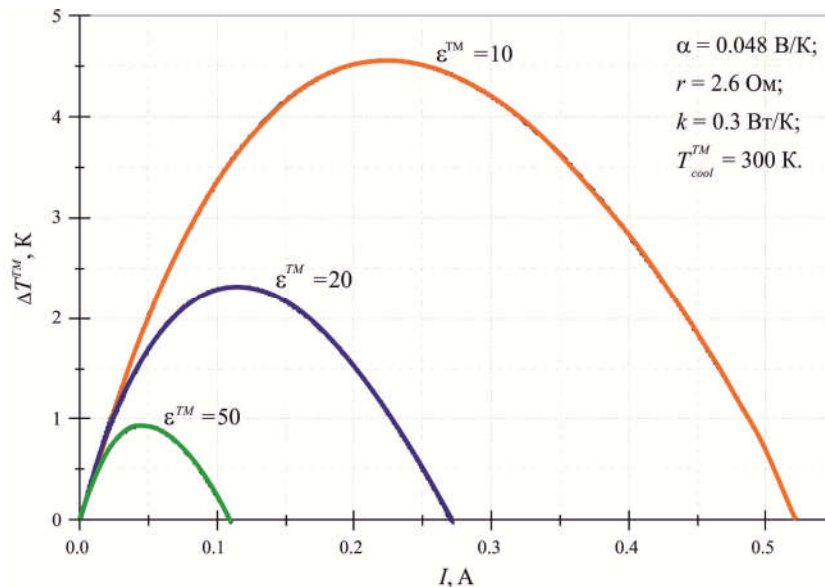


Рис. 2.1. Теоретичні залежності різниці температур  $\Delta T^{TM}$  від сили струму  $I$  при / фіксованих значеннях холодильного коефіцієнту  $\varepsilon^{TM}$  для ТМ, який працює при  $T_{cool}^{TM} = 300 \text{ K}$  і має наступні параметри:  $\alpha = 0.048 \text{ В/К}$ ;  $r = 2.6 \text{ Ом}$ ;  $k = 0.3 \text{ Вт/К}$ .

Подібні графіки можна отримати і для фіксованих значень опалювального коефіцієнту з використанням виразу (2.8).

### Випадок використання ТТН на основі ТМ в режимах максимальної енергоефективності

Допустимо, що всі ТТН, які використовуються у досліджуваному способі тепломасообміну, виготовлені на основі типових ТМ (на основі типових термоелементів). І ці ТМ працюють в режимах максимальної енергоефективності. Для оцінки ефективності досліджуваного способу тепломасообміну для такого випадку використаємо загальновідомий вираз для визначення холодильного коефіцієнту термоелемента, який працює в режимі максимальної енергоефективності [8]:

$$\varepsilon_{\max}^{TM} = \frac{\sqrt{1 + 0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} - T_{hot}^{TM} / T_{cool}^{TM}}{\sqrt{1 + 0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} + 1} \cdot \frac{T_{cool}^{TM}}{T_{hot}^{TM} - T_{cool}^{TM}}, \quad (2.9)$$

де  $\varepsilon_{\max}^{TM}$  – холодильний коефіцієнт ТМ, який працює в режимі максимальної енергоефективності;  $Z$  – термоелектрична добротність матеріалу ТМ;  $T_{hot}^{TM}$  – температура тепловиділяючої ТЧ ТМ;  $T_{cool}^{TM}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТМ.

Позначимо:

$$\frac{\sqrt{1+0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} - T_{hot}^{TM} / T_{cool}^{TM}}{\sqrt{1+0.5Z(T_{hot}^{TM} + T_{cool}^{TM})} + 1} = A_{max}^{TM}, \quad (2.10)$$

де  $A_{max}^{TM}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТМ.

Допустимо, що

$$A_{max}^{TTH} = C^{TTH} A_{max}^{TM}, \quad C^{TTH} \leq 1, \quad \text{за умови, що } T_{cool}^{TTH} = T_{cool}^{TM} \text{ і } T_{hot}^{TTH} = T_{hot}^{TM}, \quad (2.11)$$

де  $A_{max}^{TTH}$  – безрозмірний множник (який загально введений в [1]), який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТТН на основі ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТТН;  $C^{TTH}$  – безрозмірний множник, який враховує можливу відмінність холодильного коефіцієнта ТТН від холодильного коефіцієнта ТМ (на основі якого виготовлений цей ТТН), який працює за тих самих умов, що й ТТН;  $A_{max}^{TM}$  – безрозмірний множник, який враховує відмінність холодильного коефіцієнту ТМ (який працює в режимі максимальної енергоефективності і є основою ТТН) від холодильного коефіцієнту ідеального ТН, який працює за циклом Карно в тих самих умовах, що й ТМ;  $T_{cool}^{TTH}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ ТТН;  $T_{hot}^{TTH}$  – температура тепловиділяючої ТЧ ТТН.

Для фіксованого значення термоелектричної добротності  $Z$  значення  $A_{max}^{TM}$  залежить від температур  $T_{hot}^{TM}$  та  $T_{cool}^{TM}$ .

З використанням виразів (2.10) і (2.11) можна отримати графіки залежностей значень  $A_{max}^{TM}$  від температури  $T_{cool}^{TM}$  (зокрема, при фіксованому значенні  $T_{hot}^{TM}$ ) та  $A_{max}^{TTH}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  (зокрема, при фіксованому значенні  $T_{hot}^{TTH}$ ). Приклад таких графіків наведений на рис. 2.2.

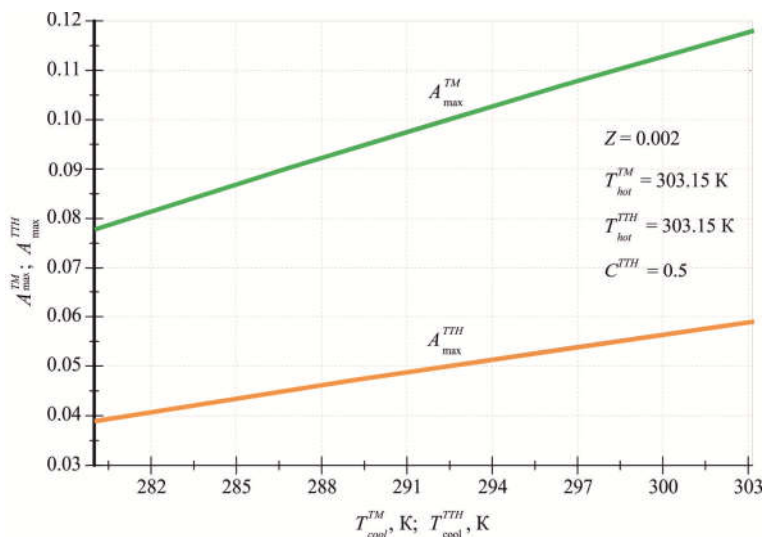


Рис. 2.2. Графіки залежностей значень  $A_{max}^{TM}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  для випадку, коли  $Z = 0.002$ ,  $T_{hot}^{TM} = 303.15$  К та  $A_{max}^{TTH}$  від температури  $T_{cool}^{TTH}$  для випадку, коли  $Z = 0.002$ ,  $T_{hot}^{TTH} = 303.15$  К і  $C^{TTH} = const = 0.5$  (графіки отримані на основі виразів (2.10) і (2.11)).

У зв'язку із наведеною тут інформацією стосовно значень  $A_{\max}^{TM}$  та  $A_{\max}^{TMM}$  на основі виразів (2), (4), (7), (8) [1], (2.2), (2.9), (2.10), (2.11) отримаємо наступне рівняння для визначення температурного режиму роботи  $i$ -го ТТН на основі ТМ, який працює в режимі максимальної енергоефективності:

$$\frac{\Delta T_{cool,i}^{PP}}{\Delta T_{hot,i}^{PP} - \Delta T_{cool,i}^{PP}} = C_i^{TTH} \frac{\sqrt{1+0.5Z_i(T_{hot,i}^{TTH} + T_{cool,i}^{TTH})} - T_{hot,i}^{TTH} / T_{cool,i}^{TTH}}{\sqrt{1+0.5Z_i(T_{hot,i}^{TTH} + T_{cool,i}^{TTH})} + 1} \frac{T_{cool,i}^{TTH}}{T_{hot,i}^{TTH} - T_{cool,i}^{TTH}}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta T_{cool,i}^{PP}$  – зміна температури РР внаслідок її ТК з теплопоглинаючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $\Delta T_{hot,i}^{PP}$  – зміна температури РР внаслідок її ТК з тепловиділяючою ТЧ  $i$ -го ТТН;  $Z_i$  – термоелектрична добротність матеріалу  $i$ -го ТМ (який є основою  $i$ -го ТТН);  $T_{hot,i}^{TTH}$  – температура тепловиділяючої ТЧ  $i$ -го ТТН;  $T_{cool,i}^{TTH}$  – температура теплопоглинаючої ТЧ  $i$ -го ТТН.

Такі рівняння можна розв'язувати числовими методами.

Розглянемо випадок *досліджуваного способу тепломасообміну*, в якому: всі ТН – це ТТН, у кожного з яких ТМ (який є основою відповідного ТТН) працює в режимі максимальної енергоефективності; РР у її вхідному потоці охолоджують всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 2 [1] та допущенням 9 [1]. В табл. 2.2 наведений приклад результатів розрахунків для оцінки ефективності цього випадку *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням розв'язування відповідних рівнянь (2.12) числовими методами.

Таблиця 2.2

*Приклад результатів оціночних розрахунків ефективності досліджуваного способу тепломасообміну з використанням ТТН для випадку охолодження РР у її вхідному потоці всіма окремо взятими ТТН згідно з рис. 2 [1] та допущенням 9 [1]*  
 $T_{2,n}^{PP} = T_{1,n}^{PP}$  (з використанням рівняння (2.12);  $C_i^{TTH} = const = 0.5$ ;  $Z_i = const = 0.002$ )

Загальна кількість ТТН $n$	Вхідна температура РР $T_{1,0}^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вхідному потоці $\Delta T_1^{PP}$ , К	Сумарний перепад температур РР у її вихідному потоці $\Delta T_2^{PP}$ , К	$\frac{\Delta T_1^{PP}}{\Delta T_2^{PP} - \Delta T_1^{PP}}$
1	303.15	2	2.2628	7.6092
2	303.15	2	2.1249	16.016
16	303.15	24	29.926	4.0502
17	303.15	24	29.502	4.3618

### Деякі можливі варіанти технічної реалізації досліджуваного способу тепломасообміну

Технічна реалізація *досліджуваного способу тепломасообміну* з використанням декількох ТТН може бути дещо ускладненою, особливо при великій кількості ТТН. Вирішення цього питання може бути пов'язане із розробкою та створенням спеціалізованих ТМ. Наприклад, такі ТМ можуть містити принаймні один термоелемент, який відокремлений (тим чи іншим способом) з точки зору можливих теплових потоків (в тепловому відношенні) від

принаймні одного іншого термоелемента цього ж ТМ. Це, відповідно до допущення 1 [1], дасть можливість термоелементам ТМ працювати у відокремлених з точки зору можливих теплових потоків теплових режимах. Відповідні ТТН на основі таких термоелементів ТМ (які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків один відносно одного) при цьому можна розглядати як окремі ТТН. ТН у досліджуваному способі тепломасообміну працюють в різних теплових умовах. У зв'язку з цим може бути доцільним, щоб відповідні спеціалізовані ТМ містили термоелементи або групи термоелементів з різними властивостями. Також може бути доцільним, щоб ТМ були виконані з можливістю окремого електричного підключення їх частин до електричних кіл (наприклад, для підключення окремих термоелементів або груп термоелементів до електричних кіл можуть використовуватися відповідні дротові виводи або клеми).

На рис. 2.3 наведена спрощена схема прикладу такого спеціалізованого ТМ, який можна розглядати як модифікований типовий ТМ (наприклад, TEC1-12706). Цей спеціалізований ТМ (рис. 2.3) містить 16 частин на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами (наприклад, керамічними) 1, які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків (в тепловому відношенні) одна відносно одної з використанням 15-ти шарів теплоізоляції 2. Частини цього спеціалізованого ТМ 1 мають різні властивості, що на рис. 2.3 умовно відображено різними відтінками сірого кольору. З точки зору електричних з'єднань цей спеціалізований модуль має 8 частин, від яких є 9 електричних дротових виводів 3 для підключення цих частин до електричних кіл. На рис. 2.3 також умовно відображені РР та її можливий напрям руху 4. Спеціалізований ТМ (рис. 2.3) відрізняється від типового ТМ, зокрема, тим, що його термоелементи поєднані в єдину конструкцію не двома теплопровідними електроізоляційними керамічними пластинами квадратної форми (як у типового ТМ), а 32-ма видовженими теплопровідними електроізоляційними пластинами (по 16 шт. з кожної сторони модуля) та шарами теплоізоляції (наприклад, на основі спіненого теплоізоляційного матеріалу). Для використання спеціалізованого ТМ (рис. 2.3) у досліджуваному способі тепломасообміну може знадобитися встановлення окремих додаткових теплообмінників (радіаторів) на цей модуль. Це показано на рис. 2.4 (на рис. 2.4 також умовно відображені РР та її можливий напрям руху). Також цей спеціалізований ТМ може використовуватися і без таких теплообмінників (наприклад, при безпосередньому тепловому контакті РР (наприклад, води) з 32-ма видовженими теплопровідними електроізоляційними пластинами).

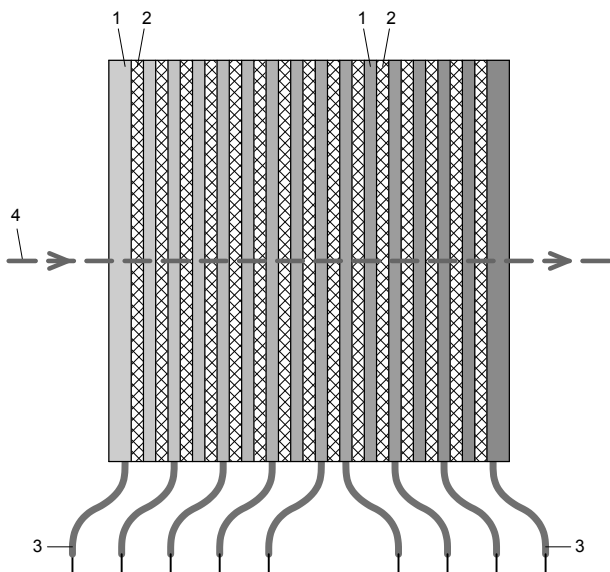


Рис. 2.3. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 16 частин з різними властивостями на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами, які відокремлені з точки зору можливих теплових потоків одна відносно одної. 1 – частини спеціалізованого ТМ на основі груп термоелементів з теплопровідними електроізоляційними видовженими пластинами; 2 – теплоізоляційні шари; 3 – електричні виводи; 4 – РР та її можливий напрям руху.

Зокрема, для зменшення термічних опорів між термоелементами ТМ і РР у досліджуваному способі тепломасообміну (а також і в деяких інших застосуваннях) можуть застосовуватися такі спеціалізовані ТМ, вітки термоелементів яких електрично з'єднані теплообмінниками (наприклад, мідними), які мають ТК з РР. Через теплообмінники може здійснюватися підключення спеціалізованого ТМ до електричного кола. При потребі теплообмінники можуть мати захист від корозії (зокрема, зумовлений контактом з РР) та/або електроізоляцію. Приклад такого можливого спеціалізованого ТМ представлений на рис. 2.5. Крім іншого цей спеціалізований ТМ має теплоізоляцію від навколишнього середовища. Зокрема, з використанням теплоізоляції у цьому спеціалізованому ТМ реалізовані два канали для руху РР.

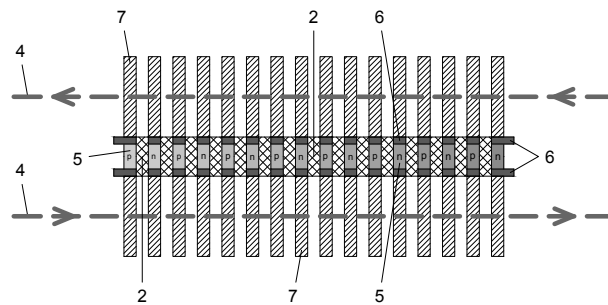


Рис. 2.4. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (представленого на рис. 2.3), з встановленими на нього 32-ма окремими теплообмінниками (радіаторами). 2 – теплоізоляційні шари; 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів; 6 – теплопровідні електроізоляційні видовжені пластини (поперечний вигляд); 7 – теплообмінники (радіатори), які встановлені на пластини 6.

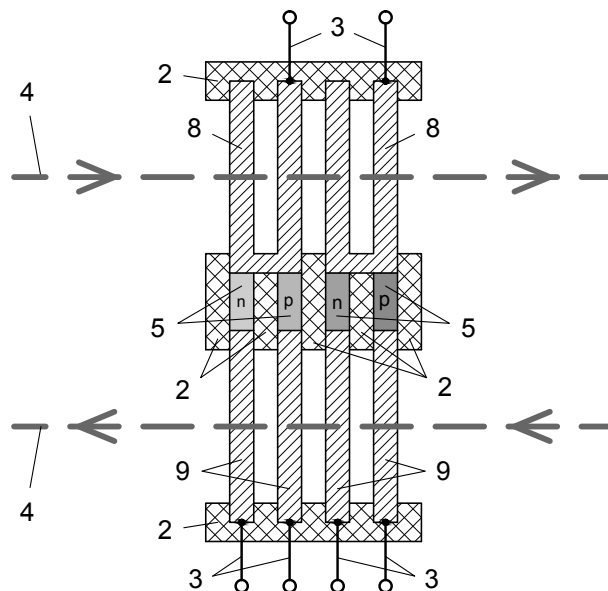


Рис. 2.5. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ з використанням теплообмінників для електричних з'єднань, теплоізоляцією від навколишнього середовища та каналами для руху РР. 2 – теплоізоляція; 3 – елементи для підключення до електричних кіл (наприклад, дротові виводи або клемми); 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів; 8 – теплообмінники (радіатори), зокрема, через які здійснюється електричне з'єднання віток термоелементів та підключення цих віток до електричних кіл; 9 – теплообмінники (радіатори), зокрема, через які здійснюється підключення віток термоелементів 5 до електричних кіл.



До деякої міри підвищити ефективність використання типових ТМ у досліджуваному способі тепломасообміну (а також і в деяких інших застосуваннях, наприклад, в таких застосуваннях, в яких термоелементи типового ТМ працюють в різних умовах) можна, у порівнянні з тим випадком, коли на кожній окремо взятій ТЧ ТМ (керамічній пластині) встановлений один теплообмінник – радіатор (як показано на рис. 2.6), якщо на хоча б одну окремо взятую ТЧ ТМ (на теплопровідну керамічну платину типового ТМ) встановити не один, а декілька окремих теплообмінників (радіаторів). Приклад цього представлений на рис. 2.7.

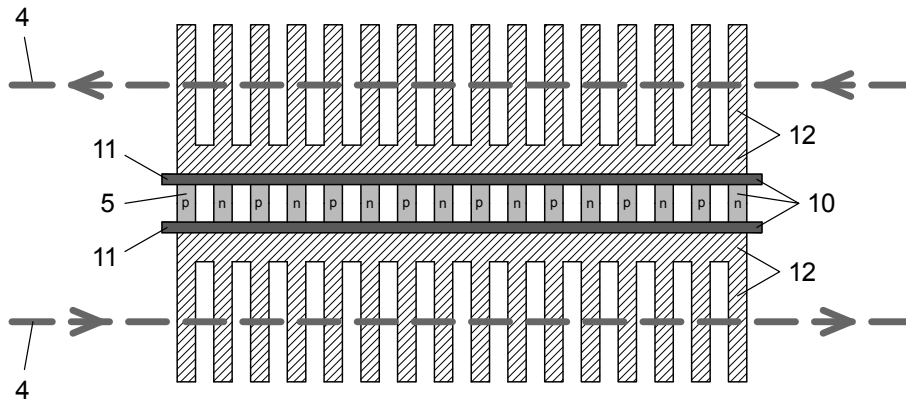


Рис. 2.6. Спрощена схема типового ТМ з встановленими на кожну з його протилежних ТЧ (теплопровідних керамічних пластин) тільки по одному теплообміннику. 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів типового ТМ; 10 – типовий ТМ; 11 – теплопровідні керамічні пластини типового ТМ; 12 – теплообмінники (радіатори), які є загальними для всіх термоелементів типового ТМ.

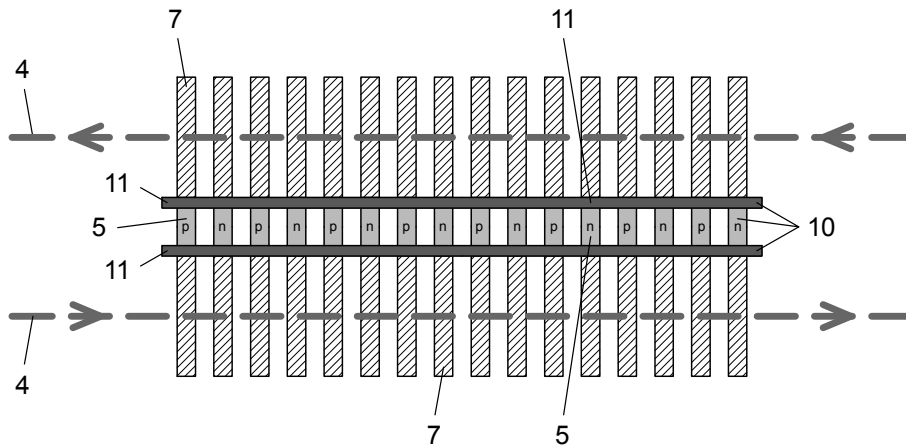


Рис. 2.7. Спрощена схема типового ТМ 10 з встановленими на нього 32-ма теплообмінниками (радіаторами) 7 (по 16 шт. з кожної сторони типового ТМ), які є до якоїсь міри окремими для відповідних 16-ти частин цього типового ТМ (ці частини деякою мірою поєднані з точки зору можливих теплових потоків 2-ма теплопровідними електроізоляційними керамічними пластинами 11). 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів.

Також у досліджуваному способі тепломасообміну можуть застосовуватися такі спеціалізовані ТМ, які також можна розглядати як модифіковані типові ТМ, термоелементи яких подібно до конструкції типових ТМ з протилежних сторін поєднані двома

теплопровідними пластинами (мають конструкцію подібну до конструкції типових ТМ), але відрізняються від типових ТМ тим, що містять частини (на основі принаймні одного термоелемента) з різними властивостями та/або виконані з можливістю окремого електричного підключення їх частин до електричних кіл. Спрощені схеми прикладів таких спеціалізованих ТМ представлені на рис. 2.8 та на рис. 2.9. На рис. 2.8 представлена спрощена схема прикладу спеціалізованого ТМ з встановленими на нього додатковими окремими теплообмінниками. У цьому прикладі термоелементи мають різні властивості, що умовно на рис. 2.8 відображено різними відтінками сірого кольору. На рис. 2.9 представлена спрощена схема прикладу спеціалізованого ТМ, який має 9 електричних дровових виводів для підключення частин цього спеціалізованого ТМ до електричних кіл.

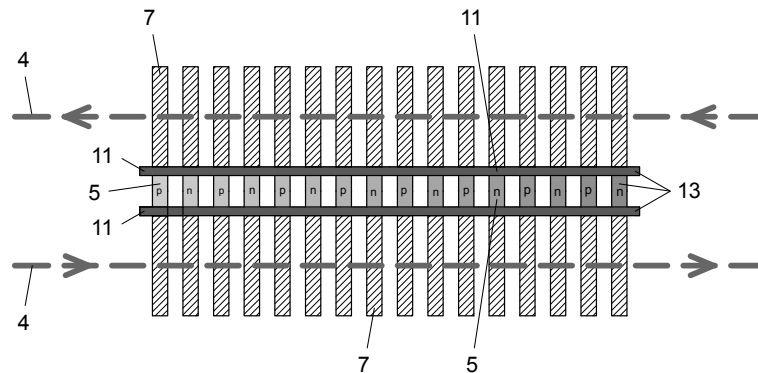


Рис. 2.8. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 16 частин на основі термоелементів, які мають різні властивості. 4 – РР та її можливий напрям руху; 5 – вітки термоелементів, які мають різні властивості; 7 – окремі теплообмінники (радіатори); 11 – теплопровідні електроізоляційні пластини; 13 – спеціалізований ТМ.

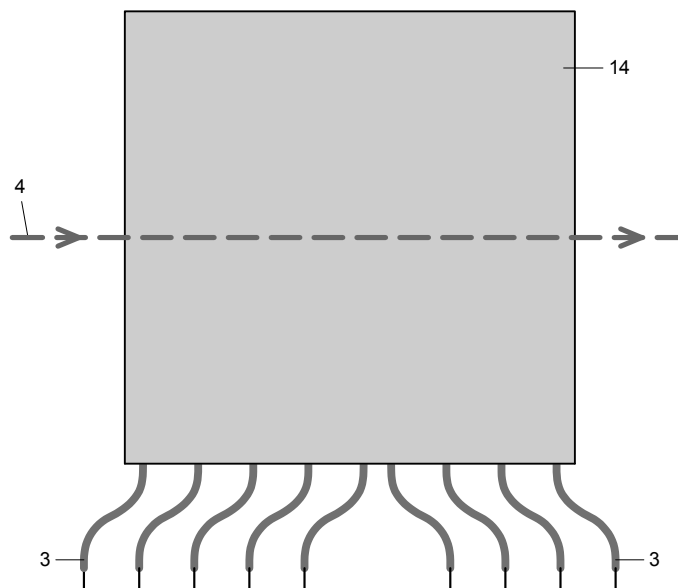


Рис. 2.9. Спрощена схема можливого спеціалізованого ТМ (модифікованого типового ТМ), який містить 9 електричних виводів. 3 – електричні виводи; 4 – РР та її можливий напрям руху; 14 – частина ТМ на основі термоелементів, які з протилежних сторін поєднані двома теплопровідними пластинами.

Можливі також інші спеціалізовані ТМ для досліджуваного способу тепломасообміну, які можуть мати ознаки описаних вище спеціалізованих ТМ у різних комбінаціях. Описані вище спеціалізовані ТМ крім використання у досліджуваному способі тепломасообміну можуть мати інші застосування (призначення). Подібні до описаних вище або принципово їм аналогічні технічні рішення можливі і при використанні інших типів ТН з модульною конструкцією.

## Висновок

Наведені в цій роботі приклади оціночних розрахунків для випадків використання КТН та ТТН у досліджуваному способі тепломасообміну підтверджують принципову можливість підвищення енергоефективності відповідних процесів завдяки збільшенню кількості застосовуваних при цьому ТН [1, 9 – 11].

Описані деякі можливі варіанти технічної реалізації досліджуваного способу тепломасообміну.

В той же час для прийняття рішень стосовно практичних застосувань досліджуваного способу тепломасообміну можуть знадобитися подальші теоретичні та/або експериментальні дослідження.

## Література

1. Кшавецький О.С. Оцінка ефективності частинного випадку процесів тепломасообміну між тепловими насосами і рухомою речовиною, частина 1. *Термоелектрика*. 2017. №6. С.41–56.
2. Bonin J. *Heat Pump Planning Handbook*. London and New York, Routledge, 2015. 326 p.
3. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння. *Промышленная теплотехника*. 2017. Том 39, №3. С.47–52.
4. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів. *Термоелектрика*. 2016. №2. С.33–42.
5. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про вплив якості теплообмінників на властивості термоелектричних теплових насосів рідина-рідина. *Термоелектрика*. 2017. №5. С.59–64.
6. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про холодильний коефіцієнт термоелектричних теплових насосів рідина-рідина з врахуванням енергії на переміщення теплоносія. *Термоелектрика*. 2017. №6. С.34–40.
7. Иоффе А.Ф. *Полупроводниковые термоэлементы*. М. – Л., Издательство АН СССР, 1960. 188 с.
8. Anatyshuk L.I. *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2005. 348 p.
9. Кшавецький О. С. Оцінка енергоефективності способу тепломасообміну між рухомою речовиною і тепловими насосами. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції “Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі” (22–23 березня 2017, м. Київ), Київ, НУХТ, 2017. С.172–174.
10. Кшавецький О. С. Про можливість підвищення енергоефективності процесів тепломасообміну, які передбачають нагрівання та охолодження рухомої речовини. *Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія): збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції (26–30 червня 2017, м. Львів), Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2017. С.96–97.*

11. Кшавецький О. С., Штангеева Н. І. *Про можливість використання декількох теплових насосів для підвищення енергоефективності деяких процесів тепломасообміну. Тези доповідей Х-ї Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (23–26 травня 2017 м. Київ, Україна), Промышленная теплотехника. 2017. Том 39, №7. С.79–80.*

Надійшла до редакції 15.05.2018

**Кшавецький О.С.** канд. физ.-мат наук, доцент

Черновицкий торгово-экономический институт  
Киевского национального торгово-экономического университета,  
Центральная площадь, 7, г. Чернівці, 58002, Украина  
*e-mail: kshevov@gmail.com*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕЖДУ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ И ПОДВИЖНЫМ ВЕЩЕСТВОМ, ЧАСТЬ 2

*Теоретически проанализированы особенности использования компрессионных и термоэлектрических тепловых насосов в частном случае способа тепломассообмена между движущимся веществом и тепловыми насосами, при котором движущееся вещество (или хотя бы часть этого движущегося вещества) приводят в тепловой контакт с теплопоглощающей и тепловыделяющей теплообменными частями по крайней мере двух тепловых насосов. Приведены примеры соответствующих расчетов. Описаны некоторые варианты возможных технических решений. Библ. 11, рис. 9, табл. 2.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, движущееся вещество, тепломассообмен, эффективность, энергоэффективность, компрессионный тепловой насос, термоэлектрический тепловой насос, термоэлектрический модуль.

**O.S. Kshevetsky** PhD in Physics and Mathematics, assistant professor

Chernivtsi Institute of Trade and Economics of Kyiv National  
University of Trade and Economics, 7, Tsentralna Square, Chernivtsi,  
58002, Ukraine, *e-mail: kshevov@gmail.com*

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF PARTIAL CASE OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES BETWEEN HEAT PUMPS AND MOVING SUBSTANCE, PART 2

*Theoretical analysis is made of the peculiarities of using compression and thermoelectric heat pumps in the partial case of heat and mass transfer between moving substance and heat pumps, whereby moving substance (or at least part of this moving substance) is brought into thermal contact with the heat absorbing and heat releasing heat-exchange parts of at least two heat*

pumps. Examples of corresponding calculations are given. Some variants of respective possible technical solutions are described. Bsbl. 11, Fig. 9, tabl. 2.

**Key words:** heat pump, moving substance, heat and mass transfer, efficiency, energy efficiency, compression heat pump, thermoelectric heat pump, thermoelectric module.

## References

1. Kshevetsky O.S. (2017). Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 1. *J. Thermoelectricity*, 6, 41–56.
2. Bonin J. (2015). *Heat Pump Planning Handbook*. London and New York: Routledge.
3. Snezhkin Yu.F., Chalaiev D.M., Dabizha N.O. (2017). Analiz energetychnykh pokaznykiv protsesu teplonasosnoho sushinnia [Analysis of energy performance of heat pump drying]. *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39, 47–52 [in Ukrainian].
4. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33–42.
5. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J. Thermoelectricity*, 5, 59–64.
6. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). On the coefficient of performance of thermoelectric liquid-liquid heat pumps with regard to energy loss for heat carrier transfer. *J. Thermoelectricity*, 6, 34–40.
7. Ioffe A.F. (1960). *Semiconductor Thermoelements*. Moscow- Leningrad: USSR Academy of Sciences.
8. Anatyshuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
9. Kshevetsky O.S. (2017). Otsinka energoefektyvnosti sposobu teplomasoobminu mizh rukhomoiu rechovynoiu i tepolvymy nasosamy [Estimation of energy efficiency of a method for heat and mass transfer between moving substance and heat pumps]. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Innovatsiini tekhnologii v hotelno-restorannomu biznesi” – Proc. of All-Ukrainian scientific and practical conference “Innovation technologies in hotel and restaurant business”* (Ukraine, Kyiv, March 22–23). Kyiv: NUFT [in Ukrainian].
10. Kshevetsky O.S. (2017). Pro mozhlyvist pidvyshchennia enerhoefektyvnosti procesiv teplomasoobminu, yaki peredbachaiiut nahrivannia ta okholodzhennia rukhomoi rechovyny [On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes which involve heating and cooling of moving substance]. *Khimichna tekhnologii ta inzheneriia: zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - Chemical Technology and Engineering: collection of abstracts of International scientific and practical conference* (Ukraine, Lviv, June 26–30, 2017). Lviv: Lvivska Politekhnika [in Ukrainian].
11. Kshevetsky O.S., Shtangeieva N.I. (2017). Pro mozhlyvist vykorystannia dekilkokh teplovykh nasosiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti deiakykh procesiv teplomasoobminu [On the possibility of using several heat pumps for increasing energy efficiency of some heat and mass transfer processes]. Tezy dopovidei X Mizhnarodnoi konferentsii “Problemy teplofizyky ta teploenerhetyky” – Abstracts of X International conference “Problems of thermophysics and heat power engineering” (Ukraine, Kyiv, May 23–26, 2017). *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 39(7), 79–80 [in Ukrainian].

Submitted 15.05.2018

УДК 536.24



Микитюк П.Д.

Микитюк П.Д. канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>  
Микитюк О.Ю. канд. фіз.-мат. наук, доцент<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,  
*e-mail: anatyuch@gmail.com;*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет імені  
Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна  
*e-mail: anatyuch@gmail.com,*

<sup>3</sup>Вищий державний навчальний заклад України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Чернівці, 58002, Україна



Микитюк О.Ю.

---

## РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В НАГРІВНИКУ ЗІ ЗМІННИМИ ПО ДОВЖИНІ ОПОРОМ У ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

---

*Досліджено розподіл температури у нагрівнику зі змінним опором по його довжині, що використовується у напівпровідниковому термоперетворювачі. Встановлено, що максимальна локалізація температури в точці контакту нагрівника зі спаєм термопари дозволяє збільшити температуру в його центрі майже в два рази в порівнянні зі звичайним варіантом нагрівника, що істотно збільшує чутливість термоперетворювача. Бібл. 2, рис. 1, табл. 1.*

**Ключові слова:** нагрівник, термоперетворювач, розподіл температури.

### Вступ

В [1] зазначено, що доцільним є розгляд можливості створення такого нагрівника для термоелектричного вимірювального термоперетворювача (ТП), який міг би забезпечити максимальну температуру в його геометричному центрі, де, зазвичай, конструктивно розташовують спаї віток термопари. Такий підхід дозволить суттєво зменшити теплові втрати в конструкції ТП, а отже – підвищити ефективність його роботи.

Метою даної роботи є оцінка граничних можливостей такого варіанту оптимізації конструкції ТП.

### Модель нагрівника зі змінним опором по його довжині

Розрахуємо значення температури в центрі нагрівника при умові, що все тепло виділяється в ньому. Розрахунок проведемо для манганінового нагрівника в скляній ізоляції з опором 16 Ом. Теплофізичні властивості скла врахуємо введенням «ефективних» значень теплопровідності та інших характеристик нагрівника.

У найпростішому варіанті втрати тепла, що виділяється в нагрівнику, відбуваються лише через теплопровідність нагрівника. Тоді справедливою є формула [2]:

$$\Delta T_{\max} = \frac{U_H^2}{8\kappa_H \rho_H}, \quad (1)$$

де  $U_H$  – електрична напруга на нагрівнику, а  $\kappa_H$ ,  $\rho_H$ , – теплопровідність і питомий опір нагрівника, відповідно.

Підставивши параметри для нагрівника, для струму  $I_H = 5$  мА, отримаємо, що максимальний перепад температури в нагрівнику  $\Delta T_{\max} = 44$  °С.

У реальних ТП істотний вплив мають і інші механізми теплових втрат. Врахування теплових втрат по теплопровідності матеріалу нагрівника і шляхом конвективного теплообміну, як показано в [1], може привести до зменшення температури в центрі нагрівника в 1.5 рази. Тому максимальна концентрація тепла в центрі нагрівника, де розміщується спай віток терморпарі, очікувано, може суттєво підвищити чутливість ТП.

Такий варіант конструкції нагрівника може бути реалізований в нагрівнику зі змінним опором по його довжині, максимум якого приходить на точку теплового контакту терморпарі і нагрівника.

Для визначення доцільності такої конструкції нагрівника розглянемо модель нагрівника, показану на рис. 1, у якій зміна опору нагрівника по його довжині досягається за рахунок зміни його поперечного перерізу.

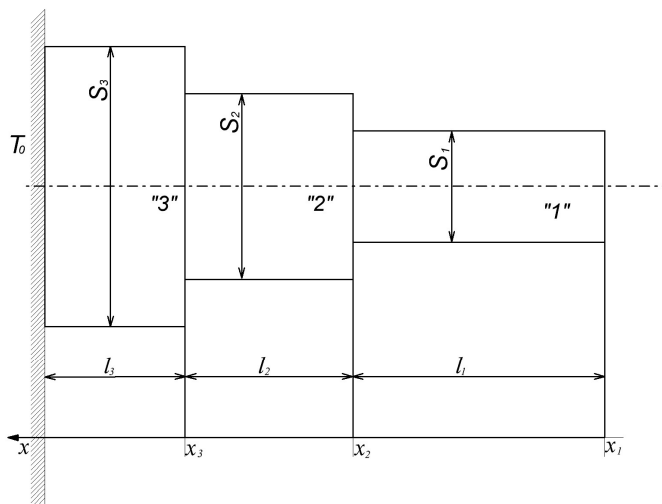


Рис. 1. Модель для розрахунку розподілу температури в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом.

### Розрахунок теплового балансу нагрівника зі змінним поперечним перерізом.

Позначимо

$$\theta_H = T(x_H) - T_0, \quad (2)$$

$$a_H = \frac{\pi d_H C_{0H}}{\chi_H S_H}, \quad (3)$$

$$b_H = \frac{\rho_H I_H^2}{\kappa_H S_H^2}, \quad (4)$$

де  $x_H$  – координата нагрівника по його довжині,

$Tx_H - T_0$  – різниця температури на нагрівнику,

$d_H$  – діаметр нагрівника,  
 $C_0$  – коефіцієнт теплообміну із зовнішнім середовищем,  
 $\rho_H$  – питомий опір нагрівника,  
 $S_H$  – площа поперечного перерізу нагрівника,  
 $I_H$  – струм, що проходить через нагрівник,  
 $\chi_H$  – теплопровідність матеріалу нагрівника.

Тоді умову теплового балансу нагрівника можна записати наступним чином:

$$d^2\theta_i/dx_i^2 - a_i\theta_i + b_i = 0, \quad (5)$$

де  $i = 1, 2, 3$ .

Перетворимо вираз (5), ввівши нову змінну  $X_i = x - x_i$  (6)

Так як

$$\frac{d}{dx} = \frac{dX_i}{dx} \cdot \frac{d}{dX_i} = \frac{d}{dX_i}, \quad (7)$$

то (5) буде мати наступний вигляд:

$$d^2\theta_i/dX_i^2 - a_i\theta_i + b_i = 0 \quad (8)$$

Розв'язок (8) проведемо для граничних умов зведених в таблицю 1

Таблиця 1

*Граничні умови для розв'язку рівняння теплового балансу нагрівника ТП*

№ п/п	$x$	$X_i$	$\theta_i$
1.	0	$X_3 = \ell_3$	$\theta_3(x=0) = 0; \theta_3(x_3 - \ell_3) = 0$
2.	$x_3$	$X_3 = 0$ $X_2 = \ell_2$	$\theta_3(x_3) = \theta_2(x_3)$ $\theta_3(x_3) = \theta_2(x_3)$ $\theta_3(X_3 = 0) = \theta_2(X_2 = \ell_2)$ $\left[ -\chi_3 S_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial X_3} \Big _{x_3=0} \cdot (+1) \right] + \left[ -\chi_2 S_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial X_2} \Big _{x_2=\ell_2} \cdot (-1) \right] = 0$
3.	$x_2$	$X_2 = 0$ $X_1 = \ell_1$	$\theta_2(x_2) = \theta_1(x_2)$ $\theta_2(X_2 = 0) = \theta_1(X_2 = \ell_1)$ $\left[ -\chi_2 S_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial X_2} \Big _{x_2=0} \cdot (+1) \right] + \left[ -\chi_1 S_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1} \Big _{x_1=\ell_1} \cdot (-1) \right] = 0$
4.	$x_1$	$X_1 = 0$	$\theta_1(x_1) = T_1 - T_0$ $\theta_1(x_1 = 0) = T_1 - T_0$ $-\chi_1 S_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial X_1} \Big _{x_1=0} = 0$

У результаті складних і громіздких перетворень, що в даній роботі не наводяться, отримаємо формулу для максимальної різниці температур у нагрівнику зі змінним поперечним перерізом:

$$T_1 - T_0 = \frac{b_1}{a_1} - \frac{\frac{b_3}{a_2} + \left( \frac{b_1}{a_1} - \frac{b_2}{a_2} \right) \left[ \text{ch}L_2 \cdot \text{ch}L_3 + K_{23} \text{sh}L_2 \cdot \text{sh}L_3 \right] + \left( \frac{b_2}{a_2} - \frac{b_3}{a_3} \right) \text{ch}L_3}{\left( \text{ch}L_1 \cdot \text{ch}L_2 + K_{12} \text{sh}L_1 \cdot \text{sh}L_2 \right) \text{ch}L_3 + \left( K_{13} \text{sh}L_1 \cdot \text{ch}L_2 + K_{23} \text{ch}L_1 \cdot \text{sh}L_2 \right) \text{sh}L_3}, \quad (9)$$



$$\text{де: } L_i = \sqrt{a_i} \ell_i, \quad (10)$$

$$K_{12} = \frac{S_1 \kappa_1 \sqrt{a_1}}{S_2 \kappa_2 \sqrt{a_2}}, \quad (11)$$

$$K_{23} = \frac{S_2 \kappa_2 \sqrt{a_2}}{S_3 \kappa_3 \sqrt{a_3}}, \quad (12)$$

$$K_{13} = K_{12} \cdot K_{23} = \frac{S_1 \kappa_1 \sqrt{a_1}}{S_3 \kappa_3 \sqrt{a_3}}, \quad (13)$$

Для перевірки теоретичних викладок у роботі досліджувався нагрівник ТП, виготовлений з двох відрізків мідного мікропроводу і центрального відрізка, виготовленого з манганінового мікропроводу, з'єднаних між собою. Довжина нагрівника не перевищувала 1.5 мм, причому довжина його центральної частини складала 250 мкм. Діаметр мікропроводу дорівнює 10 мкм. Вибір міді та манганіну був зумовлений не лише різницею в питомому шарі, але і можливістю зведення до мінімуму паразитних ефектів, що виникають у місцях контакту різнорідних матеріалів, оскільки манганін в парі з міддю має найменший коефіцієнт термоЕРС. Для зниження теплових втрат бокова поверхня термопари в термоперетворювачі була зменшена. При перерізі  $15 \times 15$  (мкм<sup>2</sup>) її довжина не перевищувала 750 мкм.

Враховавши у (9) вищезазначені числові значення параметрів та теплофізичні характеристики матеріалів для розрахунку на повітрі отримаємо, що в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом виграш по температурі в його центрі спостерігається майже в два рази, що підтверджується відповідним приростом вольт-ватної чутливості ТП зі змінним поперечним опором нагрівника при дослідженні таких ТП.

Застосування нагрівників зі змінним опором по його довжині дає хороші результати по приросту вольт-ватної чутливості, однак такі суттєві недоліки як нестабільність в часі, мала механічна міцність і необхідність захисту поверхні нагрівника від окислення дещо обмежують застосування таких нагрівників на практиці. Більш технологічним рішенням, що може різко підвищити якість ТП, може бути застосування для нагрівників мікропроводу у скляній ізоляції зі змінним перерізом його провідника. Однак це є темою окремих серйозних досліджень.

## Висновки

1. Чутливість ТП можна істотно підвищити шляхом максимальної концентрації тепла в точці контакту нагрівника і спаю термопари.
2. Застосування в конструкції ТП нагрівника зі змінним поперечним перерізом дозволяє збільшити температуру в його центрі майже в два рази.
3. Доцільним є проведення досліджень зі створення та застосування в якості нагрівника ТП мікропроводу в скляній ізоляції зі змінним поперечним перерізом.

## Література

1. Микитюк П. Д., Микитюк О. Ю. Про вплив термопари на розподіл температури в нагрівнику вимірювального термоперетворювача. «Термоелектрика» № 1, 2018 р. - с. 78-81
2. Анатичук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. - 7 68 с

Надійшла до редакції 05.04.2018

**Микитюк П.Д.** канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>  
**Микитюк О.Ю.** канд. физ.-мат. наук, доцент<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина; *e-mail: anatyach@gmail.com*;  
<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,  
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58000, Украина *e-mail: anatyach@gmail.com*;  
<sup>3</sup>Вищий державний навчальний заклад України «Буковинський  
державний медичний університет», Театральна площа, 2,  
Черновці, 58002, Україна

**P.D.Mykytiuk**<sup>1,2</sup>, *Candidate Phys.-math. Sciences*  
**O.Yu.Mykytiuk**<sup>3</sup> *Candidate Phys.-math. Sciences, docent*

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine *e-mail: anatyach@gmail.com*;  
<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine  
*e-mail: anatyach@gmail.com*  
<sup>3</sup>Higher State Educational Institution of Ukraine “Bukovinian State  
Medical University”, 2, Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

## TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A HEATER WITH A RESISTANCE VARIABLE ALONG ITS LENGTH IN A THERMOELECTRIC CONVERTER

*This paper studies temperature distribution in a heater with variable resistance along its length which is used in a semiconductor thermal converter. It is established that maximum localization of temperature at point of contact between the heater and the thermocouple junction allows increasing the temperature in its centre almost twice as compared to conventional heater variant that significantly increases the sensitivity of thermal converter. Bibl. 2, Fig. 1, table 1.*

**Key words:** heater, thermal converter, temperature distribution.

### References

1. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 78-81
2. Anatyachuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: Spravochnik* [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].

Submitted 05.04.2018



*Кокодій М.Г.*

**Кокодій М.Г.** доктор фіз.-мат. наук,  
професор<sup>1,2</sup>

**Разіньков В.В.** канд. фіз.-мат. наук<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4,  
Харків, 61022, Україна,  
e-mail: kokodiyng@gmail.com;

<sup>2</sup>Національний фармацевтичний університет,  
вул. Пушкінська, 53, 61002, Харків, Україна;

<sup>3</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,  
Чернівці, 58029, Україна, e-mail: anatyach@gmail.com



*Разіньков В.В.*

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТРИЧНИЙ ПРИЙМАЧ ОПТИЧНОГО Й ТЕРАГЕРЦЕВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Матричний приймач електромагнітного випромінювання призначений для роботи в ультрафіолетовому, видимому, інфрачервоному й терагерцовому діапазонах спектра. Розміри вхідного вікна приймача – 20×20 мм. Кількість елементів матриці – 36. Чутливість приймача – 8 В/Вт в оптичному діапазоні й 2-Бібл. 5, рис. 13, табл. 2.*

**Ключові слова:** лазер, випромінювання, приймач, термоелектричний, матриця.

### Вступ

Зараз відбувається активне освоєння середньої й далекої областей інфрачервоного діапазону (5 – 100 мкм) і пов'язаною з нею області терагерцового (субміліметрового) діапазону (100 – 1000 мкм). Інтерес до них відновився після тривалої перерви. Це пов'язано зі специфічними можливостями, які можна реалізувати в цих діапазонах спектра:

1. Створення дуже вузьких пучків випромінювання для радіозв'язку й радіолокації (із шириною діаграми спрямованості в частки мільярдів). У радіолокації це забезпечує просторову роздільну здатність до декількох сантиметрів, у радіозв'язку – можливість передачі інформації без небезпеки її витоку.
2. Набагато більша, ніж у сантиметровому й міліметровому діапазонах інформаційна ємність каналів зв'язку.
3. Використання в системах безпеки для виявлення пластикових вибухових речовин і зброї.
4. Для виявлення в космосі об'єктів з температурою в десятки кельвін, що випромінюють у терагерцовому діапазоні, наприклад, астероїдів.
5. Для діагностики високотемпературної плазми в установках керованого термоядерного синтезу.

Дуже важливою характеристикою пучків випромінювання є їхній профіль (розподіл інтенсивності в поперечному перерізі). Знаючи його, можна визначити інші параметри пучка – енергію імпульсу, потужність випромінювання, діаметр пучка, положення його енергетичного центру, фактор  $M^2$ .

Проблему вимірювання профілю пучка випромінювання повністю вирішено для видимої, близької інфрачервоної й середньої інфрачервоної областей спектра (0.4-10 мкм). У фірмах

COHERENT (США), OPHIR (США – Німеччина – Японія – Ізраїль), PRIMES і PROMETEC (Німеччина) розроблено прилади, що використовують фотоелектричні матриці, матриці на теплових приймачах (термопари, піроелектричні приймачі) і скануючі приймачі.

Фотоелектричні матриці призначені для роботи з вузькими пучками випромінювання (від 5 до 30 мм) і малими потужностями (до 1 Вт) у спектральному діапазоні від 0.2 до 1 мкм. Матриці на теплових приймачах призначені для роботи з пучками випромінювання від 20 до 100 мм при потужності випромінювання від 1 мВт до 10 кВт у спектральному діапазоні від 0.2 мкм до 10 мкм. Скануючі прилади призначені для роботи у фокальній області пучка, а також у пучках діаметром до 50 мм у спектральному діапазоні від 0.2 до 1 мкм.

Вимір характеристик випромінювання лазерів у терагерцовому діапазоні є ще не вирішеною проблемою лазерної метрології. Відомі прилади для роботи в цьому діапазоні, розроблені фірмою OPHIR – **Pyrocam III HR** і **Pyrocam IV** (рис. 1) [1]. Вартість приладів більша – близько \$30000. Характеристики приладів показано в табл. 1.



Рис. 1. Прилади Pyrocam III HR і Pyrocam IV

Таблиця 1

Характеристики приладів Pyrocam III HR і Pyrocam IV

Прилад	Pyrocam III HR	Pyrocam IV
Спектральний діапазон	13-355 нм	13-355 нм
	1.06-3500 мкм	1.06-3500 мкм
Вхідне вікно	12.8 × 12.8 мм	25.6 × 25.6 мм
Кількість елементів	160 × 160	320 × 320

В Інституті термоелектрики НАН України було розроблено матричні термоелектричні приймачі для видимого й близького інфрачервоного діапазонів спектру [2] (рис. 2).

Матриця із вхідним вікном 16 × 16 мм містить 256 елементів - напівпровідникових термопар розмірами 1 × 1 мм. Спектральний діапазон приймача – від 0.4 мкм до 10 мкм, чутливість – 100 мВ/Дж. Приймач розрахований на вимір енергії імпульсу випромінювання. Потужність безперервного випромінювання таким приймачем вимірювати важко. Причина цього наступна.



Рис. 3. Матричний приймач енергії випромінювання Інституту термоелектрики НАН України

Матриця із вхідним вікном 16 × 16 мм містить 256 елементів - напівпровідникових термопар розмірами 1 × 1 мм. Спектральний діапазон приймача – від 0.4 мкм до 10 мкм, чутливість

– 100 мВ/Дж. Приймач розрахований на вимір енергії імпульсу випромінювання. Потужність безперервного випромінювання таким приймачем вимірювати важко. Причина цього наступна.

З теорії теплових вимірювальних приладів відомо, що їхня чутливість по потужності  $S_p$  і чутливість по енергії  $S_E$  зв'язані наступним співвідношенням:

$$S_p = S_E \tau,$$

де  $\tau$  – теплова постійна часу. Час установлення показань приймача рівно  $4\tau$ . При чутливості по енергії  $S_E = 100$  мВ/Дж і тепловий постійної часу  $\tau = 0.75$  із чутливість по потужності виходить рівної  $S_p = 75$  мВ/Вт. Якщо вважати, що рівень сигналу із приймача повинен бути не менше 1 мВ, то мінімальна вимірювана потужність рівна близько 15 мВт, у той час як багато лазерні та світлодіодні джерела мають значно меншу потужність випромінювання - кілька міліватів.

### МАТРИЧНИЙ ПРИЙМАЧ ДЛЯ ВИМІРУ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Для вимірів безперервної потужності лазерного випромінювання в Інституті термоелектрики НАН України був розроблений вимірювальний перетворювач, у яком елементами матриці слугують напівпровідникові термоелектричні приймачі випромінювання із чутливістю по потужності в оптичному діапазоні близько 8 В/Вт. Загальний вид приймача показаний на рис. 4.



Рис. 3. Матричний термоелектричний приймач безперервного випромінювання

Розмір вхідного вікна приймача  $20 \times 20$  мм. Кількість елементів матриці – 36. Схема приймального елемента показана на рис. 4. Приймальний майданчик елемента (1) – пластинка з фериту  $Fe_2(V_{1-x}Ti_x)A_1$  розмірами  $3 \times 3$  мм і товщиною 0.3 мм. До тильної сторони феритової пластинки через шар теплопровідного клею (2) товщиною 15-20 мкм і шар припою ПОС-61 (3) товщиною 50 мкм приєднують «гарячі» спаї батареї напівпровідникових термопар (4) на основі  $BiTe$ , отриманих методом екструзії. Довжина термоелектричного елемента 14.2 мм, розмір торця  $p-n$  пари  $0.38 \times 0.19$  мм. «Холодні спаї» батареї через шар припою (5) і шар теплопровідного клею (6) приєднують до пластинки з кераміки (7) товщиною 0.63 мм, яка лежить на мідній основі (9). Тепловий контакт між пластинкою та основою забезпечується шаром припою (8) товщиною 50 мкм.

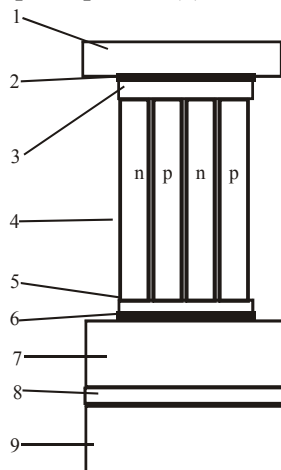


Рис. 4. Схема елемента матричного приймача

На рис. 5а показана нумерація елементів матриці (вид на матрицю спереду, по ходу променя лазера). У використуваному при проведенні експериментів аналого-цифровому перетворювачі Е14-140 є 32 канали. Тому сигнали з кутових елементів матриці не вимірялися (рис. 5б). Їхні значення визначалися за допомогою інтерполяції.

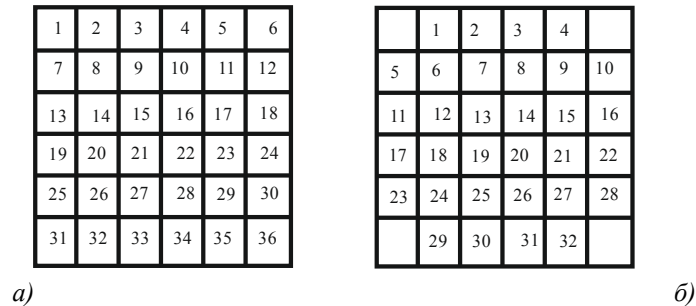


Рис. 5. Матриця приймача випромінювання  
а – елементи матриці, б – номери каналів АЦП

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЙМАЧА

### Нерівномірність чутливості термопар

На кожний з елементів матриці наводився промінь лазера діаметром близько 1 мм, і вимірявся електричний сигнал, генерований термопарами цього елемента. Потужність випромінювання лазера контролювалася. Результати вимірів показані на рис. 6. По осі абсцис відкладені номери термопар, по осі ординат – чутливість кожної з батарей термопар по потужності  $S_p$ .

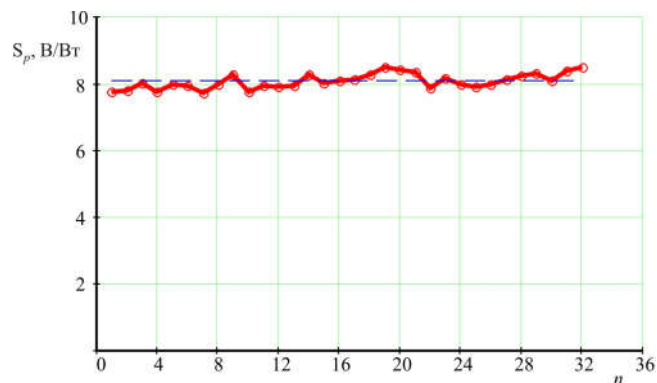


Рис. 6. Чутливості термопар приймача

Розкид величини чутливості – приблизно 5% від середнього значення:

$$S_{pcp} = 8.07 \pm 0.01 \text{ В / Вт.}$$

При обробці результатів вимірів урахувалася чутливість кожної термопари.

### Динамічний діапазон приймача

#### Нижня межа вимірювання

Нижня межа вимірювання визначається дрейфом нуля при прогріві приймача, зсувом нуля при випадкових змінах температури навколишнього середовища, наведеннями від мережі живлення й інших сторонніх джерел, внутрішніми шумами аналого-цифрового перетворювача.

Типовий вигляд сигналу із приймача випромінювання потужністю поблизу нижньої межі вимірювання показано на рис. 7. Протягом 60 с записувався «нуль» сигналу. Протягом наступних

60 с на приймач подавалося випромінювання, а потім випромінювання перекривалося, і приймач остигав.

Ширина шумової доріжки з урахуванням рідких викидів вгору й униз становить близько 2 мВ, що при чутливості приймача 8 В/Вт відповідає потужності 0.25 мВт. Для впевненого вимірювання необхідно, щоб сигнал перевищував шум, як мінімум, в 10 разів. На мал. 6 представлена приблизно така ситуація:

1. Шум:  $U_0 = -0.77 \pm 0.07$  мВ.
2. Випромінювання:  $U_1 = 9.14 \pm 0.09$  мВ.
3. Сигнал:  $U = U_1 - U_0 = 9.9 \pm 0.1$  мВ.
4. Відносна похибка вимірювання сигналу:  $\Delta Y = 1.4 \%$ .

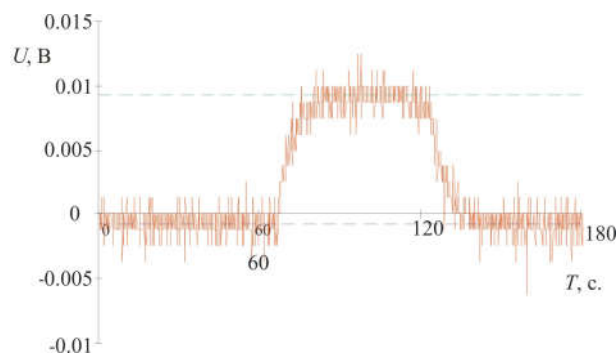


Рис. 7. Сигнал з елемента матричного приймача

Приблизно такою ж буде й відносна похибка виміру потужності випромінювання, що потрапив на даний елемент матриці, тобто:

$$P = 79 \pm 1 \text{ мВт.}$$

Невелика похибка результатів вимірювання за великого рівня шуму пояснюється усередненням по великому числу даних ( від 400 до 600) при обчисленні значень  $U_0$  та  $U_1$ .

Таким чином, нижня межа вимірювання матричним приймачем за шуму, який відповідає потужності випромінювання 0.25 мВт, дорівнює приблизно 10 мВт.

### Верхня межа вимірювання

Верхня межа вимірювання визначається порогом руйнування феритової пластинки, що служить приймальним елементом випромінювання, і температурою плавлення припою у з'єднаннях «гарячих» спаїв термопар.

Для його оцінки було вирішено теплову задачу, що описує нагрівання елемента матриці [3]. Геометрію задачі показано на рис. 4. Шари теплопровідного клею, припою й кераміки дуже тонкі. Тому їх наявність можна не враховувати, і елемент матриці вважати двошаровим, тобто таким, що складається з феритової пластинки та напівпровідникових термопар.

Випромінювання лазера інтенсивністю  $I$  падає на феритову пластинку. До неї прилягають «гарячі» спаї батареї термопар. «Холодні» спаї перебувають на керамічній пластинці й підтримуються при постійній температурі.

Рівняння теплопровідності при температурі, яка встановилася, має такий вигляд:

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} = 0, \tag{1}$$

де  $T$  – температура в точці з координатою  $x$ .

Початкова температура:

$$T_{1нач} = T_{2нач} = 0. \quad (2)$$

Тут  $T_1$  і  $T_2$  – температура фериту та термопарі відповідно.

Гранична умова на поверхні приймального елемента з координатою  $x = 0$  описує ситуацію, коли випромінювання поглинається в нескінченно тонкому поверхневому шарі. Відбувається кондуктивний відвід тепла усередину тіла (коефіцієнт теплопровідності  $k_1$ ) та конвективний відвід тепла в зовнішнє середовище (коефіцієнт теплообміну  $\alpha$ ):

$$k_1 \frac{dT_1(0)}{dx} = -I + \alpha T_1(0). \quad (3)$$

У місці з'єднання термопар з тепловідводом ( $x = L$ ) підтримується початкова температура

$$T_2(L) = 0. \quad (4)$$

У місці контакту фериту й термопарі ( $x = l$ ) гранична умова описує неперервність температури й потоку тепла:

$$T_1(l) = T_2(l), \quad (5)$$

$$k_1 \frac{dT_1(l)}{dx} = k_2 \frac{dT_2(l)}{dx}. \quad (6)$$

Тут  $T_1$  і  $k_1$  - температура у феритовій пластинці і її теплопровідність,  $T_2$  і  $k_2$  - температура в термопарі і її теплопровідність.

Розв'язок рівняння (1) з граничними умовами (3) – (6) виглядає так:

$$T(x) = \begin{cases} T_1(x) & \text{при } 0 \leq x \leq l \\ T_2(x) & \text{при } l < x \leq L \end{cases}, \quad (7)$$

де

$$T_1(x) = I \frac{k_1(L-l) + k_2(l-x)}{k_1 k_2 + \alpha [k_1(L-l) + k_2 l]}, \quad T_2(x) = I \frac{k_1(L-x)}{k_1 k_2 + \alpha [k_1(L-l) + k_2 l]}. \quad (8)$$

На рис. 8 показано графік розподілу температури уздовж вісі  $x$  за наступних значень параметрів:

$$I = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2, l = 0.3 \text{ мм}, L = 14.5 \text{ мм}, \\ k_1 = 4.2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, k_2 = 1.38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, a = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

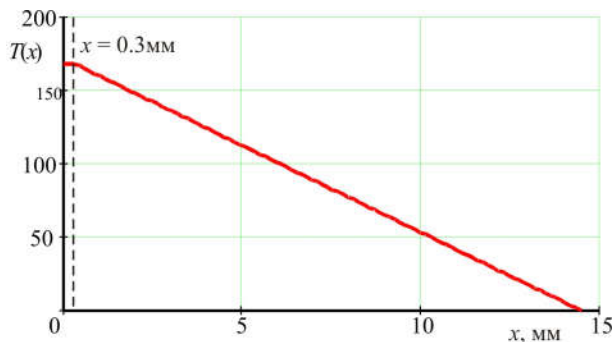


Рис. 8. Розподіл температури в елементі матриці

Значення інтенсивності випромінювання обране таким, щоб у місці контакту термопар з феритовою пластинкою температура нагрівання була рівна  $160^\circ \text{C}$ , що при за температури зовнішнього середовища  $20^\circ \text{C}$  створює в цьому місці температуру плавлення припою ПОС-61, рівну  $180^\circ \text{C}$ .



Інтенсивність випромінювання при цьому повинна бути рівною  $2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Вона отримується за потужності випромінювання, яке потрапляє на приймач, рівної 8 Вт. При цьому температура поверхні феритової пластинки – близько 200° С.

Для безпечної роботи приймача необхідно, щоб температура його поверхні не перевищувала 100° С. Це буде при потужності випромінювання близько 4 Вт.

### Амплітудна характеристика

Джерелом випромінювання слугувала проекційна лампа розжарювання з потужністю випромінювання до 5 Вт. Залежність величини сигналу із приймача від потужності випромінювання показано на рис. 9. По осі ординат відкладено суму значень сигналів із усіх елементів матриці. У цьому діапазоні потужностей амплітудна характеристика приймача лінійна.

Чутливість приймача по потужності у видимому діапазоні –  $6.2 \pm 0.5$  В/Вт.

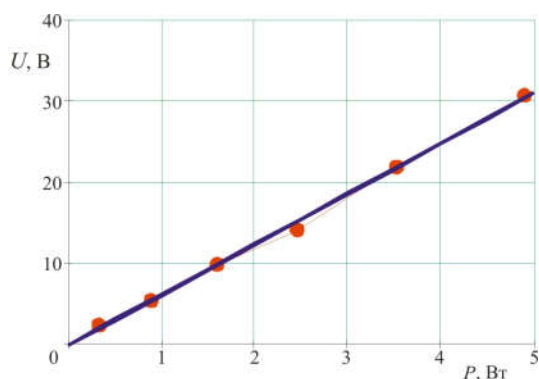


Рис. 9. Амплітудна характеристика матричного приймача

### Постійна часу

На приймач подавалося випромінювання проекційної лампи розжарювання. Потужність випромінювання – 0.75 Вт. Світлова пляма - горизонтальний еліпс із великою віссю 16 мм, малою віссю 10 мм.

Знімалася залежність сигналу з термопарі U від часу. На рис. 10 точками показано результати вимірів. Суцільна лінія – апроксимація цієї залежності функцією

$$U(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Обробка за методом найменших квадратів дає:  $\tau = 4.3$  с. Час установлення показань  $t_{уст}$  рівно  $4\tau = 17.2$  с.

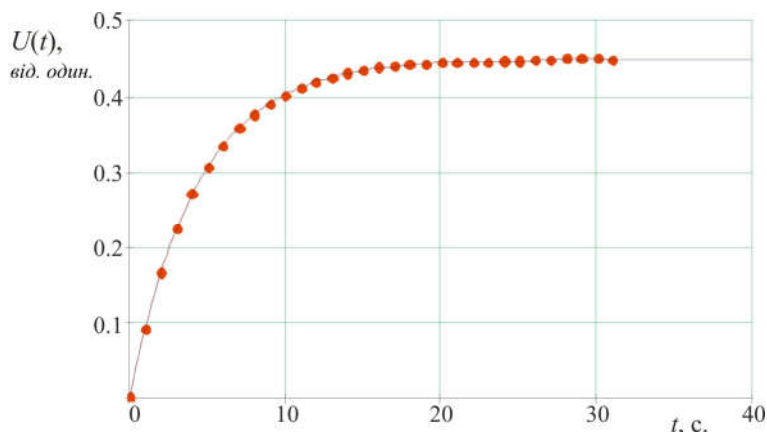
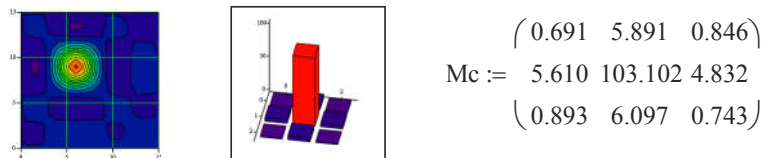


Рис. 10. Установлення в часі сигналу з термопарі

### Тепловий зв'язок між елементами матриці

При вимірюванні безперервної потужності в приймачі через час  $t_{\text{уст}}$  встановлюється стаціонарний тепловий режим. При цьому тепло від більш нагрітих елементів матриці може переходити до менш нагрітих, у результаті чого спотворюється розподіл температури по поверхні приймача, а, отже, спотворюється профіль пучка випромінювання.

Для перевірки теплового зв'язку між елементами матриці на один з них спрямовувався вузький пучок випромінювання від лазера-вказівника. На мал. 11 показано результати вимірів. Діаметр променя приблизно дорівнює розміру елемента –  $3 \times 3$  мм. На стовпчастій діаграмі видно, що сильно нагріто один елемент. Він показаний червоним кольором. Нагрівання сусідніх елементів на діаграмі майже не помітне. Матриця  $M_c$  показує розподіл температури (у відносних одиницях) на нагрітому й сусідніх з ним елементах. Видно, що температура сусідніх елементів не перевищує 6% від температури елемента, що нагрівається. Таким чином, тепловий зв'язок між елементами слабкий, і похибка, обумовлена цим чинником, невелика. Вона не більша за похибку, викликану неоднаковими термопарами.



Потужність випромінювання  $P = 9$  мВт  
 $X_c = 6.16$  мм,  $Y_c = 8.66$  мм,  $D_x = 2.19$  мм,  $D_y = 4.02$  мм, ...  $D = 2.97$  мм

Рис. 11. Тепловий зв'язок між елементами матриці

### Спектральна характеристика

Для вимірювання спектральної характеристики приймача були використано кольорові світлодіоди, що перекривають видимий діапазон спектру (синій, зелений, жовтий і червоний), білий світлодіод, червоний і зелений напівпровідникові лазери, дві лампи розжарювання, інфрачервоний лазер та два терагерцевих лазери. Результати вимірів показано в табл. 2.

Таблиця 2

Спектральна характеристика приймача

Джерело світла	Довжина хвилі, мкм	Чутливість, В/Вт
Синій світлодіод	0.460	6.8
Зелений світлодіод	0.505	7.0
Жовтий світлодіод	0.590	6.5
Червоний світлодіод	0.635	4.4
Білий світлодіод	0.4 - 0.7	7.6
Лампа 1	0.4 - 0.7	6.4
Лампа 2	0.4 - 0.7	6.2
Зелений лазер	0.532	8.0
Червоний лазер	0.650	6.4

Продовження таблиці №2

ИК лазер	10.6	7.0
ТГц лазер 1	119	4.9
ТГц лазер 2	432	2.0

Цю ж характеристику показано на рис. 11.

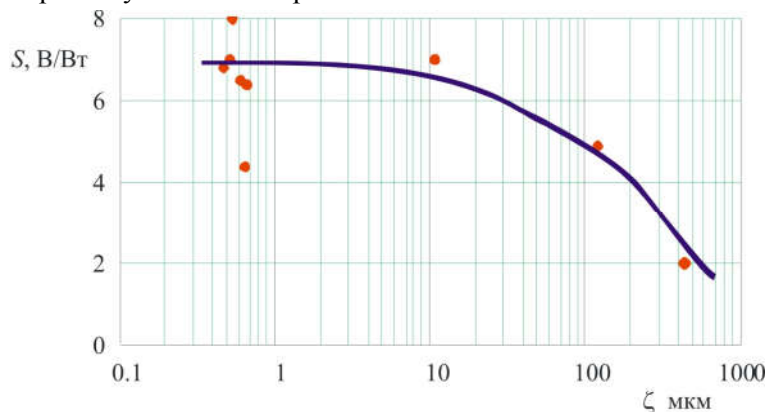


Рис. 11. Спектральна характеристика приймача

У видимому діапазоні й інфрачервоному діапазоні аж до 10 мкм чутливість майже постійна. Розкид експериментальних точок пояснюється похибками вимірів потужності випромінювання. У терагерцевому діапазоні чутливість значно нижче. Це пов'язано зі зменшенням поглинальної здатності фериту на довжинах хвиль, близьких до мікрохвильового діапазону.

### Вимірювання енергії імпульсу випромінювання

Джерелом імпульсного випромінювання служила лампа-спалах з енергією (накопиченою в конденсаторі) 30 Дж. Тривалість імпульсу – близько 1 мс. На рис. 12 показано вигляд сигналу із приймача за дії на нього імпульсу випромінювання.

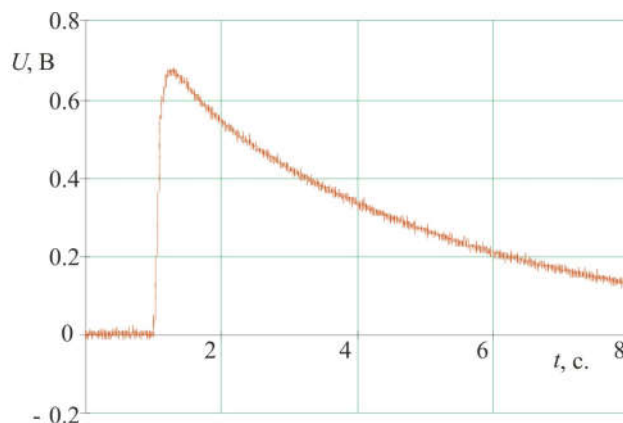


Рис. 12. Відгук приймача на оптичний імпульс

За чутливості приймача по потужності  $S_p = 8 \text{ В/Вт}$  та теплової постійної часу  $\tau = 4.3 \text{ с}$  чутливість за енергією дорівнює:

$$S_E = \frac{S_p}{\tau} = 1.86 \text{ В/Дж.}$$

Амплітуда сигналу із приймача дорівнює 0.7 В. Це відповідає енергії випромінювання близько 1.3 Дж.

Чутливість дослідженого приймача по енергії істотно більша, ніж у матричного приймача [2]. Тому він може з успіхом застосовуватися й для вимірювання енергії імпульсу випромінювання. Поступається він лише за інерційністю – стала часу рівна 4.3, а не 0.75 с, як у приймача [2].

### ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ЛАЗЕРА

На рис. 13 показано результати вимірювання профілю пучка випромінювання газового лазера, який працює на парах метанолу у терагерцевому діапазоні. Довжина хвилі випромінювання – 118.9 мкм, потужність випромінювання 10 мВт. Лазер працював у режимі генерації моди TEM<sub>00</sub>.

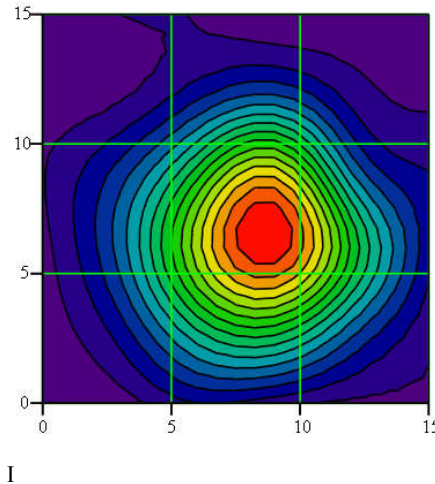


Рис. 13. Профіль пучка випромінювання терагерцевого лазера

Параметри пучка випромінювання, обчислені відповідно до методики, викладеної в стандарті ISO/DIS 11146 [5], наводяться нижче.

Координати енергетичного центру пучка визначаються співвідношеннями:

$$x_c = \frac{\int x I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}, \quad y_c = \frac{\int y I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}. \quad (9)$$

Тут  $I(x, y)$  – функція розподілу інтенсивності в поперечному перерізі пучка. Інтегрування виконується за площею його поперечного перерізу.

Обчислення по цих формулах дають:

$$x_c = -7.9 \text{ мм}, \quad y_c = 6.8 \text{ мм}.$$

Діаметри пучка уздовж осей  $O_x$  і  $O_y$  визначаються так:

$$D_x = 4 \sqrt{\frac{\int (x - x_c)^2 I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}}, \quad D_y = 4 \sqrt{\frac{\int (y - y_c)^2 I(x, y) dS}{\int_s I(x, y) dS}}. \quad (10)$$

Використовується також середнє геометричне значення діаметра:

$$D = \sqrt{D_x D_y} \quad (11)$$

Обчислення дають наступні значення цих величин:

$$D_x = 14.1 \text{ мм}, \quad D_y = 14.0 \text{ мм}, \quad D = 14.0 \text{ мм}.$$

## Висновок

Уперше в Україні розроблений матричний приймач лазерного випромінювання, що перебиває видимий, інфрачервоний та терагерцевий діапазон з наступними характеристиками:

- спектральний діапазон – 0.4...500 мкм;
- кількість приймальних елементів матриці – 36;
- розмір приймального елемента – 3 × 3 мм;
- чутливість приймача по неперервній потужності – 8.07 В/Вт;
- чутливість приймача за енергією – 1.86 В/Дж;
- час установлення показів – 17 с.

## Література

1. Pyrocam III HR, Pyrocam IV // [www.ophiropt.ru](http://www.ophiropt.ru)
2. Multielement laser radiation detector // [www.it.inst.cv.ua](http://www.it.inst.cv.ua)
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Вища школа, 1966. - 600 с.
4. Гончарський А.А., Нестеров А.В., Низьев В.Г., Новикова Л.В., Якунін В.П. Оптичні елементи лазерного резонатора для генерації променя з осесимметричної поляризацією // Оптика й спектроскопія. - 2000. - Т. 89, № 1. - С. 160-164.
5. Draft International Standard ISO/DIS 11146. Optics and optical instruments – Laser and laser-related equipment - Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor. - 1995.

Надійшла до редакції 20.04.2018

**Кокодій Н.Г.** доктор физ.-мат. наук, професор<sup>1,2</sup>,  
**Разиньков В.В.** канд. физ.-мат. наук<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, Харьков, 61022, Украина

<sup>2</sup>Национальный фармацевтический университет, ул. Пушкинская,  
53, 61002, Харьков, Украина, e-mail: kokodiyng@gmail.com;

<sup>3</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина; e-mail: anatysh@gmail.com.

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК ОПТИЧЕСКОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Матричный приемник электромагнитного излучения предназначен для работы в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и терагерцевом диапазонах спектра. Размеры входного окна приемника – 20 x 20 мм. Количество элементов матрицы – 36. Чувствительность приемника – 8 В/Вт в оптическом диапазоне и 2-4 В/Вт в терагерцевом диапазоне. Максимальная интенсивность излучения – 4 Вт. Библ. 5, рис. 13, табл. 2.

**Ключевые слова:** лазер, излучение, приемник, термоэлектрический, матрица.

**Kokodiy N.G.** *Doctor phys.-mat. sciences, professor*<sup>1,2</sup>,  
**Razinkov V.V** *Cand. phys.-mat. sciences*<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>V.N.Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>2</sup>National Pharmaceutical University, 53 Pushkinskaya str.,  
Kharkiv, 61002, Ukraine, *e-mail: kokodiyng@gmail.com*;

<sup>3</sup>Institute of Thermoelectricity, NAS of Ukraine, 1 Nauky av.,  
Chernivtsi, 58029, Ukraine, *e-mail: anatykh@gmail.com*.

## **THERMOELECTRIC MATRIX RECEIVER OF OPTICAL AND TERAHERTZ RADIATION**

*Matrix receiver of electromagnetic radiation is designed to work in the ultraviolet, visible, infrared and terahertz spectral ranges. The size of the receiver input window is 20 x 20 mm. The number of matrix elements is 36. The sensitivity of the receiver is 8 V/W in the optical range and 2-4 V/W in the terahertz range. The maximum intensity of radiation is 4 W. Bibl. 5, Fig. 13, table 2.*

**Key words:** laser, radiation, receiver, thermoelectric, matrix.

### **References**

1. Pyrocam III HR, Pyrocam IV // [www. ophiropt.ru](http://www.ophiropt.ru)
2. Multielement laser radiation detector // [www.it.inst.cv.ua](http://www.it.inst.cv.ua)
3. Lykov A.V. (1966). *Teoriia teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]*. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian].
4. Goncharkii A.A., Nesterov A.V., Niziev V.G., Novikova L.V., Yakunin V.P. (2000). Opticheskiye elementy lasernogo resonatora dlia generatsii lucha s osesimmetrichnoi poliarizatsiei [Optical elements of laser resonator for generation of a beam with axisymmetric polarization]. *Optika i spektroskopiia – Optics and Spectroscopy*, 89(1), 160-164 [in Russian].
5. *Draft International Standard ISO/DIS 11146*. Optics and optical instruments – Laser and laser-related equipment - Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor. – 1995.

Submitted 20.04.2018

Анатичук Л.І. ак. НАН України<sup>1,2</sup>, Гаврилюк М.В.<sup>1</sup>,  
Лисько В.В канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна, e-mail: anatysh@gmail.com

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИМІРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРИАЛОМ АБСОЛЮТНИМ МЕТОДОМ

*Наведено результати аналізу значень похибок відомих методів вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів. Встановлено, що ефективним методом вимірювання є абсолютний метод, який дозволяє інструментально мінімізувати більшість джерел похибок. Наведено результати досліджень похибок вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів абсолютним методом, отримані шляхом об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання. Встановлено вплив на точність вимірів радіаційного випромінювання, перенесення тепла вимірювальними електродами, спотворень електричного і теплового полів на контактах. Описано нові методи мінімізації похибок. Розглянуті також похибки, викликані відхиленнями розподілу температури в досліджуваному зразку від лінійного після досягнення стаціонарних станів. Досліджено швидкодію вимірів та розроблено методи її підвищення. Наведено опис двох модифікацій автоматизованого вимірювального устаткування, створених на основі розроблених методів, – для діапазонів температур 30 – 500 °С і 30 – 900 °С. Бібл., рис, табл...*

**Ключові слова:** абсолютний метод, вимір, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, похибки.

### Вступ

Відомо, що за останні десятиліття істотних покращень якості термоелектричних матеріалів не досягнуто [1, 2]. Кращими матеріалами, які використовуються в термоелектричних перетворювачах енергії для генераторної та охолоджувальної техніки, залишаються сполуки систем  $Bi - Te$ ,  $Pb - Te$ ,  $Ge - Si$  та, інколи, інші.

Для дослідження нових матеріалів і поліпшення відомих використовують різні методи. З цією метою змінюють хімічний склад, вводять різні домішки, використовують матеріали різної структури – неоднорідні, наноструктури, порошкові та інші. Вплив цих дій на матеріал визначається експериментально шляхом вимірювання електропровідності  $\sigma$ , термоЕРС  $\alpha$ , теплопровідності  $k$  та добротності  $Z$ .

Аналіз відомих методів і устаткування для вимірів властивостей термоелектричних матеріалів засвідчив, що похибки при визначенні термоелектричної добротності  $Z$  сягають 10-15 % [3 – 5]. Найбільші значення похибок виникають при визначенні добротності шляхом вимірів електропровідності, термоЕРС та теплопровідності на різних зразках. Так, похибки при визначенні коефіцієнта термоЕРС знаходяться на рівні 2-5 % (стаціонарний метод, рис. 1; метод

гарячого зонду, рис. 2), електропровідності – 2-3 % (двозондовий метод, рис. 3; чотирьохзондовий метод, рис. 4), теплопровідності 3-7% (відносний метод, рис. 5; метод Ангстрема, рис. 6; метод лазерного спалаху, рис. 7) [4 – 13].

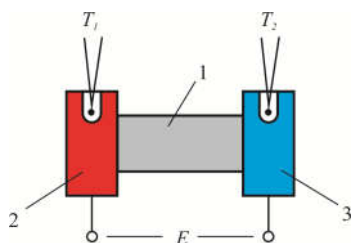


Рис. 1. Стационарний метод вимірювання коефіцієнта термоЕРС. 1 – зразок; 2, 3 – електропровідні термостати

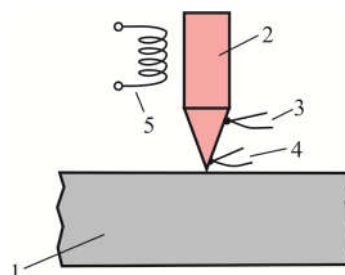


Рис. 2. Схема вимірювання коефіцієнта термоЕРС методом гарячого зонду. 1 – зразок, 2 – зонд, 3 і 4 – термопар, 5 – мініатюрна піч

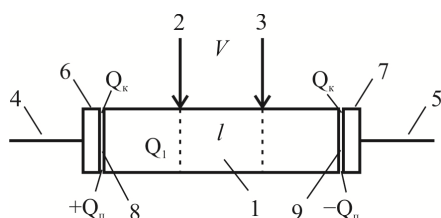


Рис. 3. Схема двозондового методу вимірювання електропровідності 1 – зразок; 2, 3 – потенціальні електроди; 4, 5 – струмові провідники; 6, 7 – струмові електроди; 8, 9 – контакти

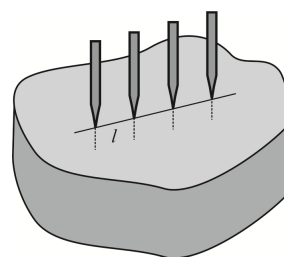


Рис. 4. Чотирьохзондовий метод визначення електропровідності

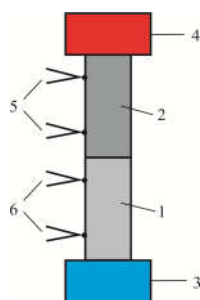


Рис. 5. Схема вимірювання теплопровідності відносним методом. 1 – вимірюваний зразок; 2 – еталонний зразок; 3 – термостат; 4 – електричний нагрівач; 5, 6 – термопар, якими визначаються перепади температур в еталонному і вимірюваному зразках.

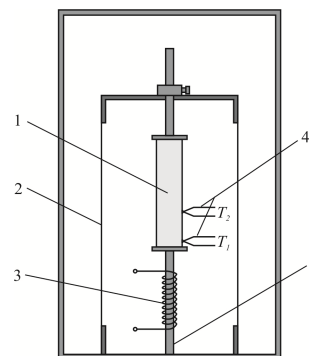


Рис. 6. Схема пристрою для визначення температуропровідності за методом Ангстрема 1 – досліджуваний зразок; 2 – слюдяний екран; 3 – нагрівач; 4 – термопар; 5 – мідний стержень.

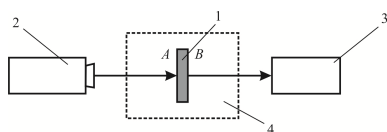


Рис. 7. Схема методу лазерного спалаху. 1 – досліджуваний зразок, 2 – лазер, 3 – інфрачервоний детектор, 4 – термостат.



Таким чином, загальна погрішність у визначенні добротності може досягати 20 %. Крім того, оскільки матеріал практично завжди декілька неоднорідний, то це наводить до додаткової погрішності, яка в середньому дорівнює 3-5 %. Загальна погрішність у визначенні  $Z$  при цьому може досягати до 23-25 %.

Такі погрішності стануть перешкодою при вирішенні завдань підвищення добротності матеріалу, оскільки точність вимірів може виявитися нижче, ніж поліпшення властивостей матеріалу при зміні чинників, що впливають на нього.

Надійніші результати можна отримати при використанні абсолютного методу і методу Хармана [2, 14]. Цикл досліджень, проведених в Інституті термоелектрики, показав, що похибки при визначенні добротності методом Хармана можуть знаходитися на рівні 5-6 % лише у ряді випадків – коли відома безліч додаткових параметрів, таких як: випромінювальні властивості зразка і термостата, теплопровідність струмопідводів та термопар та інші.

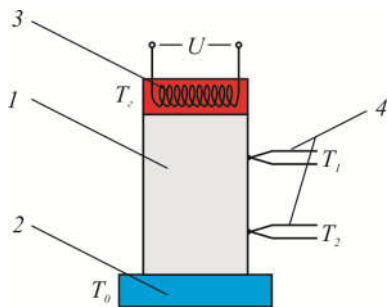


Рис. 8. Схема абсолютного методу вимірювання теплопровідності 1 – досліджуваний зразок; 2 – термостат; 3 – електричний нагрівач; 4 – термопару.

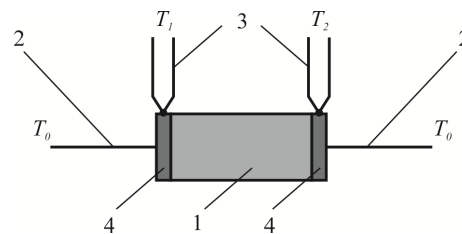


Рис. 9. Схема комплексних вимірів методом Хармана. 1 – зразок; 2 – струмові провідники; 3 – термопару; 4 – контакти.

Найбільш ефективним є абсолютний метод, що дозволяє інструментально мінімізувати більшість джерел похибок. Він широко використовується при створенні еталонів і володіє важливими перевагами: вимірювання  $\alpha$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ ,  $Z$  виконуються одночасно на одному зразку, що знижує похибки; для виміру можуть бути використані зразки невеликих розмірів; термоелектричні параметри знаходяться з класичних формул без внесення поправок.

Метою даної роботи є дослідження, спрямовані на мінімізацію похибок у процесі вимірювання абсолютним методом і створення високоточного вимірювального устаткування для комплексного визначення властивостей термоелектричного матеріалу в широкому інтервалі температур.

### Фізична, математична і комп'ютерна моделі абсолютного методу

Фізичну модель методу наведено на рис. 10. Вона містить зразок, який знаходиться в тепловому і електричному контакті з термостатованою основою, та еталонне джерело тепла на верхній грані зразка. В ідеальних умовах бічна і верхня поверхні джерела тепла адіабатично ізолювані. Спотворення при визначенні термоелектричних параметрів обумовлені двома основними причинами.

Перша є наслідком інструментальних похибок при визначенні величин поперечного перерізу зразка, відстаней між термопарами і вимірювальними зондами, величин струму і різниці потенціалів між зондами, перепаду температур, теплового потоку через зразок. При використанні сучасної вимірювальної техніки, загальний вплив цих похибок буде меншим за 0.2 %.

Другою складовою похибок є методичні похибки. Вони є наслідком відхилення від умов ідеальної фізичної моделі, а саме – умов адіабатичності і одновимірності потоків тепла і електрики через зразок, а також відхилення від точковості вимірювальних зондів і термопар. Найбільші спотворення мають місце при вимірюванні теплопровідності.

Тепло  $Q$ , яке виділяється еталонним нагрівачем, перетікає не лише через зразок, а і через електроди, приєднані до зразка. Окрім цього, має місце відведення тепла випромінюванням і конвекцією в довкілля. Кількість джерел таких теплових втрат, позначених на рис. 10, дорівнює 18. Дещо краща ситуація виникає при виконанні вимірів у вакуумі. Тоді величини спотворюючих теплових потоків деякою мірою зменшуються, а кількість джерел теплових втрат зменшується до 16. Виникають проблеми і при визначенні електропровідності. Наявність тепла Пельтьє і Джоуля створює неізотермічність зразка, що може бути джерелом грубих помилок.

Для визначення впливу цих чинників на точність вимірювання необхідно розв'язати задачу знаходження розподілів електричного потенціалу і теплових потоків, враховуючи наявність теплових втрат і дії тепла Джоуля і Пельтьє. Такі завдання важко піддаються аналітичному розв'язанню з-за складності геометрії, наявності анізотропії і неоднорідності, температурних залежностей властивостей матеріалів зразка і елементів конструкції вимірювального устаткування. Для розрахунків температурних і електричних полів, а також впливу на них різних чинників, були використані комп'ютерні методи об'єктно-орієнтованого моделювання реальних фізичних об'єктів.

Такі методи дозволяють отримати вирішення системи диференціальних рівнянь другого порядку в частинних похідних, записаних в наступному вигляді

$$\begin{cases} -\nabla \left( (\kappa_i + \alpha_i^2 \sigma_i T + \alpha_i \varphi \sigma_i) \nabla T \right) - \nabla \left( (\alpha_i \sigma_i T + \varphi \sigma_i) \nabla \varphi \right) = 0, \\ -\nabla (\sigma_i \nabla \varphi) - \nabla (\sigma_i \alpha_i \nabla T) = 0. \end{cases} \quad (i = 1..20) \quad (1)$$

і отриманих виходячи із законів збереження електричного заряду і енергії. У формулі (1):  $\alpha_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $\kappa_i$  – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і теплопровідності елементів фізичної моделі,  $T$  – температура,  $\varphi$  – електричний потенціал.

Для побудови комп'ютерної моделі було використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics [16], який дозволяє за допомогою методу скінчених елементів знайти розв'язок системи (1) з відповідними граничними умовами.

### Методи зменшення похибок

З використанням розробленої комп'ютерної моделі отримано розподіли теплових і електричних потоків в зразку та елементах конструкції вимірювальної установки і досліджені можливі похибки вимірювання. Їх можна розділити на дві основні групи. Перша обумовлена тепловим випромінюванням з поверхні зразка і еталонного нагрівача. Ці похибки, як показали

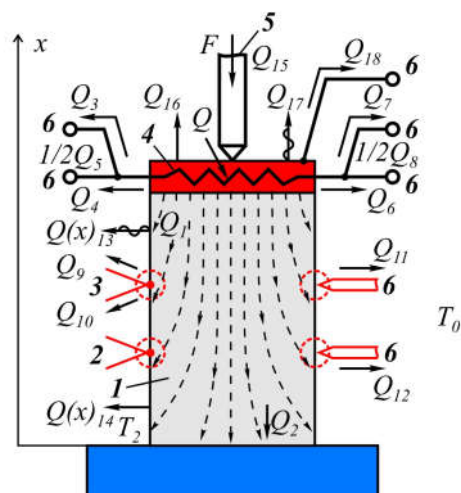


Рис. 10. Реальна фізична модель абсолютного методу. 1 – зразок, 2, 3 – термопари, 4 – еталонний нагрівач, 5 – притиск, 6 – електроди

дослідження, є найбільшими і можуть досягати 75%. Для їх зменшення було використано додаткове джерело тепла та радіаційний екран (рис. 11). На екрані створюється такий самий градієнт температури, що і на зразку. Проте, за рахунок перевипромінювання виникає складова радіації уздовж зразка.

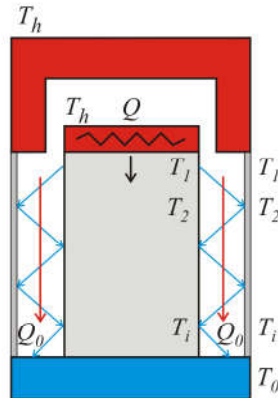


Рис. 11. Використання градієнтного радіаційного екрану

З цієї причини випромінювання з поверхні зразка залишається великим і призводить до похибки вимірювання теплопровідності, яка сягає 15-20%. Було запропоновано використовувати радіаційні кільця на екрані і блискучий відбивач на основі. При цьому, втрати тепла і, відповідно, погрішності зменшуються до 1.5%.

Друга група похибок пов'язана з втратами тепла по електродах зразка та еталонного нагрівача. Для їх мінімізації запропоновано використовувати так звані теплові ключі. Вони є вузлами, виконаними з теплопровідних ізоляторів, теплопровідність яких близька до теплопровідності міді, наприклад, окису берилію (рис. 12).

У них вмонтовано електроди, які приводяться в тепловий контакт з керамікою. Вона, у свою чергу, знаходиться в тепловому контакті з радіаційним екраном. В цьому випадку відмінність температур на електродах значна, тепловий потік через електроди мінімізується і, відповідно, мінімізуються величини похибок. Комп'ютерне моделювання показало, що сумарна похибка, викликана цими втратами, складатиме  $\sim 0.5\%$ .

Важливим чинником, який викликає похибки, є також вплив струмових і теплових контактів зразка. При використанні притискних контактів нагрівача зі зразком цей вплив має місце мінімум в трьох місцях, що може спотворювати одновимірність теплового і електричного потоків. Останнє впливатиме на розподіли температур і електричного потенціалу в зразку.

Оптимізаційні розрахунки і комп'ютерне моделювання показали, що для вирівнювання щільності електричного струму і теплового потоку необхідна металізація торців зразка. Був визначений оптимальний набір металевих покриттів (рис. 13) Товщини шарів:  $Ni$  – 10 мкм,  $Cu$  – 100 мкм,  $Ni$  – 10 мкм,  $W$  – до 200 мкм.

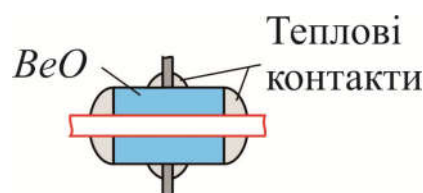


Рис. 12. Тепловий ключ

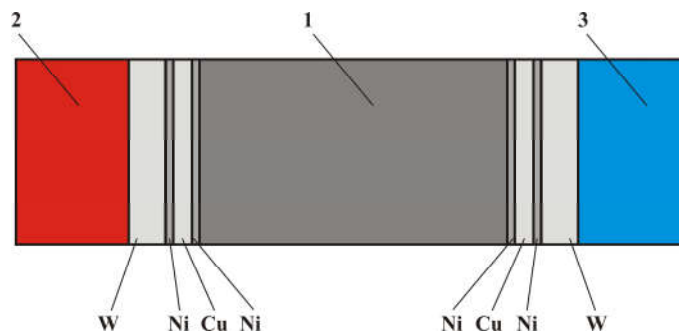


Рис. 13. Контактні структури для підвищення якості теплових і електричних контактів образці з теплообмінниками 1 – зразок; 2 – еталонний нагрівач; 3- термостама.

Проведено комп'ютерні моделювання спотворень електричних і теплових полів в місцях контакту зразка з вимірювальними зондами. Встановлено, що навіть при діаметрах контакту 0.1-0.5 мм зонди усереднюють температуру, даючи досить точне значення температури, як в точковому контакті. Похибка при цьому не перевищує 0.05 %.

Таким чином, сумарна похибка при визначенні добротності  $Z$  складає 4.7%, що в 3-5 разів краще, ніж в інших аналогів.

Досліджено питання підвищення швидкодії устаткування. Оскільки для проведення експерименту необхідне досягнення стаціонарних умов, час виміру температурних залежностей властивостей одного зразка досягає 15 годин, при вимірі 12 температурних точок.

Підвищення швидкості вимірювання може бути досягнуте при пропусканні через зразок змінного струму (рис. 14).

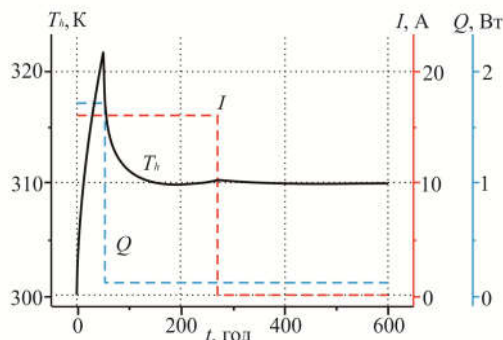


Рис. 14. Методи підвищення швидкості досягнення стаціонарних умов.

Це дозволяє прискорити нагрів центральної частини зразка за рахунок виділення тепла Джоуля. Такий спосіб дозволяє досягти стаціонарного температурного режиму в зразку в 3 раз швидше. Додаткове підвищення швидкості вимірювання може бути досягнуте при розігріванні гарячої сторони зразка еталонним нагрівачем. Комбінування цих двох методів дозволяє підвищити швидкодню обладнання у 8-10 разів.

## Опис вимірювального устаткування

Конструкцію вимірювального блоку установки наведено на рис. 15. У ній використано всі перераховані вище методи мінімізації похибок.

Для зручності і мінімізації впливу суб'єктивних помилок установку максимально автоматизовано. Її блок-схему приведено на рис. 16. Вона містить силовий блок і блок управління вимірюваннями на основі високоточного багатоканального мікроконтролерного АЦП. Після

введення даних про температури вимірювання всі процеси вимірювання проводяться без участі оператора. На комп'ютер виводяться оброблені результати вимірювання у вигляді графіків або таблиць.

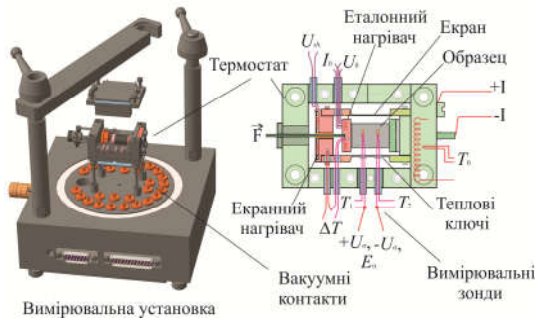


Рис. 15. Конструкція вимірювального блоку установки

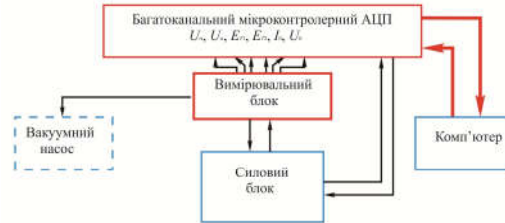


Рис. 16. Блок-схема установки

Для дослідження високотемпературних матеріалів було створено модифікацію вимірювального блоку, яка дозволяє проводити вимірювання в інтервалі температур від 30 до 900<sup>0</sup> С. Ключовими в ній стали використання теплоізолюючих засипок для усунення втрат через випромінювання, які зростають за таких температур та описані вище контактні структури з шарами нікелю, міді та вольфраму.

Зовнішній вигляд автоматизованої установки для визначення властивостей термоелектричного матеріалу в інтервалі температур 30-900<sup>0</sup> С наведено на мал. 17.

Таку апаратуру було використано для визначення температурних залежностей термоелектричних властивостей різних матеріалів. Її точність дозволила, зокрема, реалізувати оптимальні значення параметрів функціонально-градієнтних матеріалів для генераторних модулів з Ві – Те, на яких досягнуто значень ККД близько 8%.



Рис. 17. Зовнішній вигляд автоматизованої установки для визначення властивостей термоелектричного матеріалу в інтервалі температур 30-900<sup>0</sup> С.

## Висновки

1. Вивчено вплив різних чинників на точність вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів абсолютним методом. Розроблені нові засоби мінімізації похибок – градієнтні радіаційні екрани з кільцевими насічками, відбивач на термостаті, теплові ключі, металеві контактні структури для надійного з'єднання торцевих поверхонь зразка із струмовими і тепловими контактами. Досягнуті значення відносних похибок вимірювання термоелектричних характеристик у відсотках такі: теплопровідності – 2.4, електропровідності – 0.7, термоЕРС – 0.8, добротності – 4.7.
2. З використанням методів зниження похибок виготовлено автоматизовану вимірювальну установку для визначення параметрів термоелектричних матеріалів в інтервалі температур 30 –

- 500° С. Сукупність приведених заходів дозволяє понизити погрішності при визначенні добротності в 3-5 разів.
3. Для дослідження високотемпературних матеріалів була створена модифікація вимірювального блоку, що дозволяє проводити вимірювання в інтервалі температур від 30 до 900° С.
  4. Розроблено методи істотного, до 10 разів, підвищення швидкості досягнення стаціонарних умов у вимірюваних зразках.

Надійшла до редакції 15.05.2018

**Анатичук Л.І. ак. НАН України<sup>1,2</sup>, Гаврилюк М.В.<sup>1</sup>,  
Лисько В.В канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>.**

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна, e-mail: anatyuch@gmail.com

### **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИМІРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛОВАБСОЛЮТНИМ МЕТОДОМ**

*Наведено результати аналізу значень похибок відомих методів вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів. Встановлено, що ефективним методом вимірювання є абсолютний метод, який дозволяє інструментально мінімізувати більшість джерел похибок. Наведено результати досліджень похибок вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів абсолютним методом, отримані шляхом об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання. Встановлено вплив на точність вимірів радіаційного випромінювання, перенесення тепла вимірювальними електродами, спотворень електричного і теплового полів на контактах. Описано нові методи мінімізації похибок. Розглянуті також похибки, викликані відхиленнями розподілу температури в досліджуваному зразку від лінійного після досягнення стаціонарних станів. Досліджено швидкодію вимірів та розроблено методи її підвищення. Наведено опис двох модифікацій автоматизованого вимірювального устаткування, створених на основі розроблених методів, – для діапазонів температур 30 – 500 °С і 30 – 900 °С. Бібл.14, рис.17..*

**Ключові слова:** абсолютний метод, вимір, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, похибки.

**L.I. Anatyshuk** acad. National Academy of Sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>  
**M.V. Havryliuk<sup>1</sup>, V.V.Lysko** Candidate Phys.-math. Sciences<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1, Nauky str,  
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2</sup>Yu. Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi str.,  
Chernivtsi, 58000, Ukraine, e-mail: anatysh@gmail.com

## WAYS FOR QUALITY IMPROVEMENT IN THE MEASUREMENT OF THERMOELECTRIC MATERIAL PROPERTIES BY THE ABSOLUTE METHOD

*The paper is concerned with the results of research on the errors in the measurement of thermoelectric material properties by the existing methods. It is established that the efficient measurement method is the absolute method which allows instrumental minimization of the majority of error sources. The results of research on the errors in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method obtained by object-oriented computer simulation are given.*

*The effect of radiation, heat transfer by measuring electrodes, electrical and thermal field distortions on the contacts on the measurement accuracy is established. New methods for minimization of errors are described. The errors caused by deviations from the linear temperature distribution in the sample under study on the attainment of a steady-state are considered as well. Measurement rapidity is studied, and methods for its increase are developed.*

*A description of two modifications of automated measurement equipment based on the elaborated methods – for temperature ranges from 30 to 500 °C and 30 to 900 °C is given. Bibl. 14, Fig. 17.*

**Key words:** absolute method, measurement, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, errors.

### References

1. Yepremyan A.O., Arutiunyan V.M., Vaganyan A.I. (2005). Figure of merit of novel thermoelectric materials. *Alternative Energetics and Ecology*, 5, 7-18.
2. Anatyshuk L.I. (1978). Thermoelements and thermoelectric devices. *Kyiv: Naukova dumka [in Russian]*.
3. www.qdusa.com.
4. www.ipm.fraunhofer.de.
5. www.ulvac.com.
6. Anatyshuk L.I., Pervozvansky S.V., Razinkov V.V. (1993). Precise measurement of cooling thermoelectric material parameters: methods, arrangements and procedures. *Proc. of the 12<sup>th</sup> Intern. Conf. Thermoelectrics (Japan, 1993)* (pp. 553-564).
7. Czichos H., Saito T., Smith L. (2011). *Springer Handbook of Metrology and Testing*. Springer.
8. Tritt T. (2006). Electrical and thermal transport measurement techniques for evaluation of the figure-of-merit of bulk thermoelectric materials. In: *Thermoelectric handbook: macro to nano*. D.M. Rowe (Ed.). Boca-Raton: CRC Press.
9. Okhotin A.S., Pushkarsky A.S., Borovikova R.P., Simonov V.A. (1974). *Metod izmereniia kharakteristik termoelektricheskikh materailov i preobrazovalekei [Method of measuring characteristics of thermoelectric materials and converters]*

- thermoelectric materials and converters characteristics*]. Moscow: Nauka [in Russian].
10. [www.linseis.com](http://www.linseis.com).
  11. [www.dlr.de](http://www.dlr.de).
  12. [www.netzsch-thermal-analysis.com](http://www.netzsch-thermal-analysis.com).
  13. Freik D.M., Haluschak M.O., Ralchenko V.G., Tkachuk A.I. (2013). Methods of measuring thermal conductivity in massive solids and thin films (review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 14(2), 17-344.
  14. Lysko V.V. (2011). Modified Harman's method. *J. Thermoelectricity*, 84-92.

Submitted 15.05.2018



## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

До опублікування у фаховому журналі приймаються наукові праці, які ніколи не друкувалися раніше. Стаття має бути написана на актуальну тему, містити результати глибокого наукового дослідження, новизну та обґрунтування наукових висновків відповідно до мети статті (поставленого завдання).

Матеріали, що публікуються в журналу, підлягають внутрішньому та зовнішньому рецензуванню, яке здійснюють члени редакційної колегії та міжнародної редакційної ради журналу або фахівці відповідної галузі. Рецензування проводиться конфіденційно, У разі негативної рецензії чи наявності суттєвих зауважень стаття може бути відхилена або повернута авторові (авторам) на доопрацювання. У випадку, коли автор (автори) не погоджується(ються) з думкою рецензента, за рішення редакційної колегії може бути проведене додаткове незалежне рецензування. Після внесення автором змін відповідно до зауважень рецензента статті підписується до друку.

Редакційна колегія має право на відмову у публікації рукописів, що містять опубліковані раніше дані, а також матеріалів, які не відповідають профілю журналу або матеріалів досліджень, що були проведені з порушенням етичних норм (наприклад, конфлікти між авторами чи між авторами і організацією, плагіат і т. ін.). Редакційна колегія журналу залишає за собою право редагувати та скорочувати рукописи без порушення авторського змісту. Відхилені рукописи авторам не повертаються.

### Подання рукопису до журналу

Рукопис статті подається до редакції журналу в паперовому варіанті у двох примірниках та в електронному вигляді на електронному носії (диск, флешка). Електронний варіант статті повинен повністю відповідати паперовому варіанту. Рукопис має бути підписаний всіма співавторами або відповідальним представником.

В окремих випадках допускається замість електронного носія (диск, флешка) направляти статтю електронною поштою.

Рукописи подаються англійською мовою для англомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів - англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 15 (разом з літературою та розширеними анотаціями). За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

До рукопису додається:

1. Офіційний лист-направлення, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.
2. Ліцензійний договір про передачу авторського права (форму договору можна отримати в редакції журналу або завантажити з сайту журналу – [Договір.pdf](#)). Ліцензійний договір набуває чинності після прийняття статті до друку. Підписання ліцензійного договору автором(ами) означає, що вони ознайомлені і згодні з умовами договору.
3. Відомості про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, вчене звання, вчена ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID (за наявності). Відомості про авторів подаються:  
авторами з України трьома мовами – українською, російською та англійською;  
авторами з країн СНД двома мовами – російською та англійською;  
авторами з далекого зарубіжжя – англійською мовою.
4. Носій інформації з текстом статті, рисунками, таблицями, відомостями про авторів в електронному вигляді.
5. Кольорова фотографія автора(ів). Чорно-білі фотографії редакція журналу не приймає. При

числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться.

### **Вимоги до оформлення статті**

Стаття має бути структурована за такими розділами:

- *Вступ*. Містить постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета і завдання.

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

- *Висновки*, де підведені підсумки роботи і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

1. у верхньому лівому куті – індекс УДК (для авторів з України та країн СНД);
2. прізвище(а) та ініціали, вчена ступінь та вчене звання автора(ів);
3. назва установи, де працює автор(и); поштова адреса, номер телефону, адреса електронної пошти автора(ів);
4. назва статті;
5. анотація до статті – не більше 1 800 знаків. Анотація повинна відображати послідовну логіку опису результатів та описувати основні цілі дослідження, підсумовувати найбільш значимі результати;
6. ключові слова – не більше 8-ми слів.

*Текст* статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 на папері формату А4, вирівнювання по ширині. У статті не повинно бути переносів слів.

**Параметри сторінок:** «дзеркальні поля» верхнє поле – 2.5 см, нижнє поле – 2.0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього та нижнього – 1.27 см.

**Графічні матеріали**, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .orj чи .cdr, допускається у форматах .jpg чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

*Рисунки* друкуються на окремих сторінках. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пт. На графіках одиниці виміру вказуються через кому. Рисунки нумеруються в порядку їх розташування в тексті, частини рисунків нумеруються літерами – а, б, .. На звороті рисунка олівцем пишеться назва статті, автор(автори), номер рисунка. Скановані рисунки і графіки вставляти не допускається.

*Таблиці* подаються на окремих сторінках та повинні бути виконані з використанням табличного редактора MSWord. Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць недопустиме.

*Формули* необхідно набирати у редакторах формул Equation або MatType. Статті з формулами, вписаними від руки, до друку не приймаються. Необхідно давати визначення (дефініцію) величин, які вперше вживаються у тексті, а далі користуватись відповідним терміном.

*Підписи до рисунків і таблиць* друкуються в рукописі після списку літератури.

*Список використаних літературних джерел* наводиться у кінці статті. Посилання на літературні джерела нумеруються послідовно в порядку їх цитування у тексті статті. Посилання на неопубліковані та незавершені роботи недопустимі.

**Увага!** У зв'язку із включенням журналу до міжнародних бібліографічно-реферативних баз даних, список літератури має складатися з двох блоків: ЛІТЕРАТУРА і REFERENCES (ця вимога діє і для англomовних статей):

**ЛІТЕРАТУРА** – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

**REFERENCES** – той же список літератури, транслітерований в романському алфавіті (рекомендації за міжнародним бібліографічним стандартом APA-2010, правила до оформлення транслітерованого списку літератури References на сайті <http://www.dse.org.ua>, розділ для авторів).

**Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:**

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
- ініціали та прізвище авторів;
- науковий ступінь, учене звання;

з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

- назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна), електронна адреса авторів;

з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

○ назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заголовними буквами напівжирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретною і по можливості короткою;

- анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині українською чи російською (для україномовних та російськомовних авторів відповідно) та англійською мовами;

- ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;

- основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;

формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;

- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, використовувані символи повинні бути пояснені;

• рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і контрастними; осі графіків - паралельними до країв листка, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні; рисунки у журнал подаються кольоровими, чорно-білі - редакція журналу не приймає;

• таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць

по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

- список літератури наводять у кінці статті. Посилання на літературу вказують за текстом в квадратних дужках. Послідовність джерел у списку літератури має відповідати порядку їх згадування в тексті. Нижче наведені приклади різних типів посилань на літературу.

### **Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ**

#### Статті в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. №4. С.84–94.

#### Книги

Анатичук Л.И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1979. 768 с.

#### Патенти

Патент України № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоелемент

#### Матеріали конференцій

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Материали XVII Международного форума по термоэлектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновцы, 2017. 64 с.

#### Автореферати дисертацій

Кобилянський Р.Р. *Термоелектричні прилади для лікування захворювань шкіри.*: автореф. дис. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2011. 20 с.

### **Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES**

#### Статті в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

#### Книги

Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

#### Патенти

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.Ya., Nitzovych O.V. Thermoelemens [In Ukrainian].

#### Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

#### Автореферати дисертацій

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].