

# ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

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

---

№ 1

2022

---

## Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

Л.М. Вихор

Б.І. Стадник

В.В. Лисько

О.Я. Лусте

С.В. Мельничук

О.І. Рогачова

А.О. Снарський

## Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

Ю. Грін, *Німеччина*

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*

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

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

---

Підписано до друку: 27.09.2021 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, 2022

## ЗМІСТ

### **Матеріалознавство**

- Снарський А., Федотов В.* Термоелектричні композити з різними порогами протікання 5
- Горський П.В., Кузь Р.В.* Аналітичний розрахунок впливу металевого покриття термоелектричних гілок на ККД генераторного термоелемента 17
- Ромака В.А., Стадник Ю.В., Ромака Л.П., Плевачук Ю.О., Ромака В.В., Горинь А.М., Пашкевич В.З., Зелінський А.В.* Дослідження термоелектричного матеріалу  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ : моделювання властивостей 27

### **Конструювання**

- Анатичук Л.І., Черкез Р.Г., Порубаний О.М., Жукова О.С.* Вплив товщини вітки та швидкості теплоносія на ефективність проникного генераторного термоелемента 44
- Дмитриченко М.Ф., Гутаревич Ю.Ф., Трифонов Д.М., Сирота О.В., Шуба Е.В., Кухтик Н.О.* Використання термоелектричного пристрою для підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна з іскровим запалюванням за роботи на спиртовмісному бензині 55

### **Метрологія і стандартизація**

- Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Тимчик Г.С., Колобродов М.С.* Підвищення чутливості комп'ютерно-інтегрованих тепловізорів у дослідженнях термоелектричних явищ та дистанційних спостереженнях 65

### **Термоелектричні вироби**

- Філін С.О., Вишинівський Віктор* Термоелектричний холодильник для купе спальних вагонів 86
- Правила оформлення статті 97





Снарський А.О.

Снарський А.О. *док. фіз.- мат. наук,*  
*професор*  
Федотов В.В.

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського", проспект Перемоги, 37,  
Київ, 03056, Україна, e-mail : asnarskii @ gmail . com



Федотов В.В.

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ КОМПОЗИТИ З РІЗНИМИ ПОРОГАМИ ПРОТІКАННЯ

*Розглядається модифікація наближення середнього поля для опису поведінки ефективних кінетичних коефіцієнтів, у тому числі для термоелектричних композитів. Запропонована модифікація дозволяє описувати випадково-неоднорідні середовища з різними порогоми протікання при довільних значеннях локальних кінетичних коефіцієнтів. Бібл. 6, рис. 6.*

**Ключові слова:** термоелектричні композити, кінетичні коефіцієнти.

### Вступ

Широко застосовуване наближення середнього поля (наближення Бруггемана-Ландауера, самоузгоджене наближення) [1 – 6] має недолік. Воно не дозволяє описувати середовища з різними порогоми. У роботі [7] у наближення Бруггемана-Ландауера було введено терм (терм Саричева-Виноградова, SV - term, SVt), що дозволяє отримати концентраційні залежності ефективних гальваноманітних коефіцієнтів для середовищ з наперед заданим порогом протікання. У [8-10] такий підхід був використаний для опису магнітоеластомерів і було введено поняття рухомого порогу протікання. У [11] SVt був використаний для опису термоелектричних явищ у випадково-неоднорідних середовищах, проте випадок "нормальних" та "аномальних" локальних кінетичних коефіцієнтів [12] доводилося розглядати окремо.

У роботі пропонується узагальнення SVt терму для опису кінетичних явищ у випадково-неоднорідних середовищах з будь-яким порогом протікання та за будь-яких («нормальних» і «аномальних») значень локальних кінетичних коефіцієнтів.

### ПРОБЛЕМА ПОРОГУ ПРОТІКАННЯ В НАБЛИЖЕННІ СЕРЕДЬОГО ПОЛЯ В ОДНОПОТІКОВОМУ ВИПАДКУ (НА ПРИКЛАДІ ЕФЕКТИВНОЇ ПРОВІДНОСТІ)

Для однопотокового випадку, наприклад випадку провідності, коли є один термодинамічний потік – щільність електричного струму  $\mathbf{j}$  одна термодинамічна сила – напруже-

ність електричного поля  $\mathbf{E}$ , які пов'язані між собою законом Ома

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (1)$$

Ефективна провідність  $\sigma_e$  визначається як

$$\langle \mathbf{j} \rangle = \sigma_e \langle \mathbf{E} \rangle, \quad (2)$$

де  $\langle \dots \rangle = 1/V \int \dots dV$  – середнє за обсягом та у разі двофазного середовища

$$\sigma(\mathbf{r}) = \begin{cases} \sigma_1, \mathbf{r} \in O_1 \\ \sigma_2, \mathbf{r} \in O_2 \end{cases}, \quad (3)$$

Наближення Бруггемана-Ландауера має вигляд

$$\frac{\sigma_e - \sigma_1}{2\sigma_e + \sigma_1} p + \frac{\sigma_e - \sigma_2}{2\sigma_e + \sigma_2} (1 - p) = 0, \quad (4)$$

Концентраційна залежність згідно з (4) наведена на рис. 1

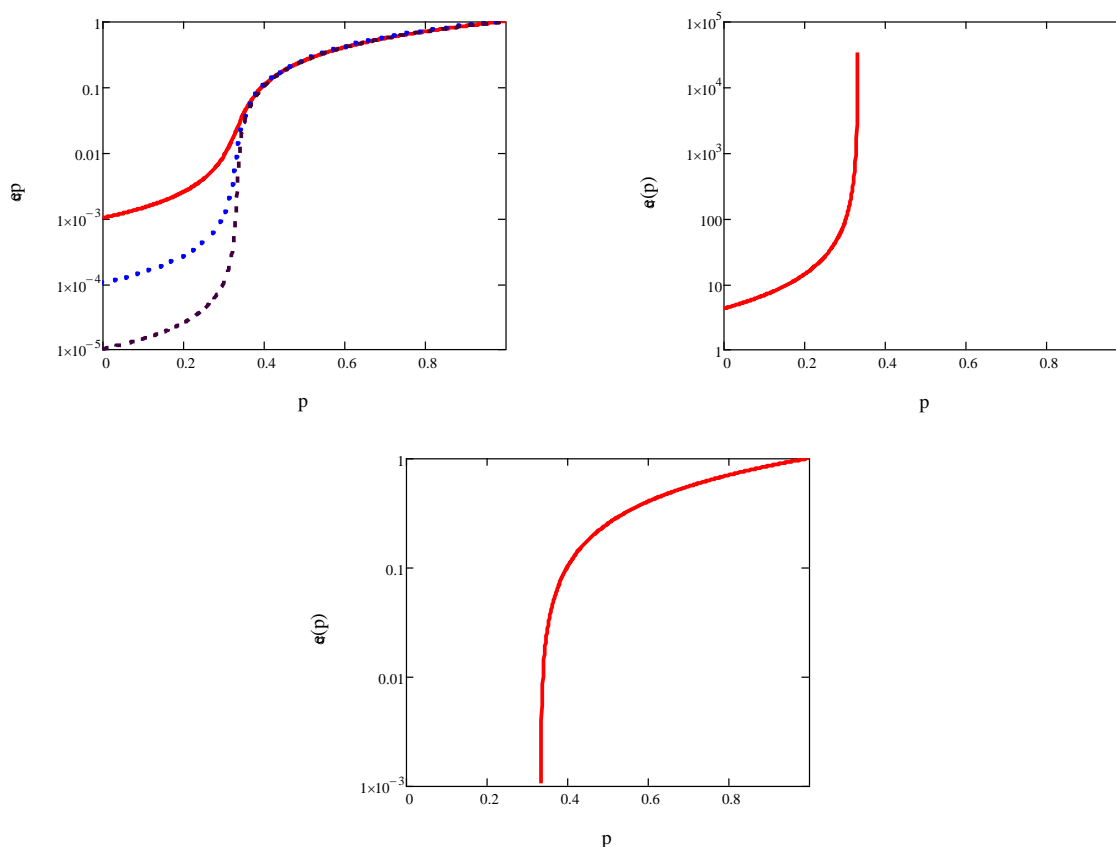


Рис. 1. Концентраційна поведінка ефективної провідності:  
а - кінцеве відношення провідностей, б, с – перколяція

За великої неоднорідності  $\sigma_1 / \sigma_2 \rightarrow \infty$  виділяється т.зв. перколяційний концентраційний

діапазон  $|p - p_c| \ll 1$ , для якого справедливі перколяційні залежності [1, 2, 4], див. рис. 1

$$\sigma_e = \begin{cases} \sigma_1 (p_c - p)^{-t}, & p < p_c \\ (\sigma_1^q \sigma_2^t)^{1/t+q}, & |p - p_c| \ll \Delta, \\ \sigma_2 (p - p_c)^q, & p > p_c \end{cases} \quad (5)$$

де  $\Delta = (\sigma_2 / \sigma_1)^{1/t+q}$ .

Слід зазначити, що перколяційні закономірності справедливі лише за дуже великий неоднорідності й у дуже вузькому концентраційному ( $|p - p_c| \ll 1$ ) діапазоні. Проте чисельне значення порогу протікання є характеристикою всього концентраційного діапазону і тим самим характеристика поведінки ефективних кінетичних коефіцієнтів у всьому концентраційному діапазоні та будь-якій неоднорідності.

Наближення Бруггемана-Ландауера засноване на обчисленні полів у відокремленому включенні, дивно, що це наближення досить добре описує граничну поведінку ефективних кінетичних коефіцієнтів. Зокрема, при  $p = p_c$  концентраційна залежність ефективної провідності  $\sigma_e(p)$  має перегин. Тим паче різкий, що більше неоднорідність. Таким чином, наближення Бруггемана-Ландауера добре описує концентраційну поведінку  $\sigma_e(p)$  і може застосовуватися для опису експериментальних даних.

Існує недолік цього наближення, різкий перехід ефективної провідності  $\sigma_e(p)$  (при  $\sigma_1 / \sigma_2 \rightarrow \infty$  цьому – поріг протікання) завжди дорівнює  $p_c = 1/3$ . Однак у реальних середовищах [7] поріг перебігу залежно від способу створення композиту може набувати різних значень. Незважаючи на логічність виведення та простоту отриманого виразу, наближення Бруггемана-Ландауера потребує модифікації.

У роботі [7] була розглянута модифікація, що дозволяє задати для випадку  $\sigma_1 > \sigma_2$  величину порога протікання. Така модифікація була використана в моделі магнітоеластичних композитів, при введенні методу рухомого порогу протікання [8 – 10]

$$\frac{\frac{\sigma_e - \sigma_1}{2\sigma_e + \sigma_1}}{1 + c(p, \tilde{p}_c) \frac{\sigma_e - \sigma_1}{2\sigma_e + \sigma_1}} p + \frac{\frac{\sigma_e - \sigma_2}{2\sigma_e + \sigma_2}}{1 + c(p, \tilde{p}_c) \frac{\sigma_e - \sigma_2}{2\sigma_e + \sigma_2}} (1 - p) = 0, \quad (6)$$

де  $c(p, \tilde{p}_c)$  – терм Саричева-Виноградова

$$c(p, \tilde{p}_c) = (1 - 3\tilde{p}_c) \left( \frac{p}{\tilde{p}_c} \right)^{\tilde{p}_c} \left( \frac{1 - p}{1 - \tilde{p}_c} \right)^{1 - \tilde{p}_c}. \quad (7)$$

Більш складна ситуація спостерігається у наближенні середнього поля в описах ефективних

пружних властивостей композитів [10]. Наближення середнього поля для пружності – наближення Будянського [13, 14], за великої неоднорідності пружних властивостей для тривимірного випадку дає поріг протікання  $\frac{1}{2}$ , а двомірного –  $\frac{2}{3}$  (Що суперечить геометричним міркуванням перколяційної структури).

На рис. 2 показано концентраційну залежність ефективної провідності з урахуванням терму Саричева-Виногорова (6,7). Як видно з рис. 3 при великій неоднорідності ( $\sigma_1/\sigma_2$ ) поріг протікання збігається, як і має бути із заданим у термі  $\tilde{p}_c$ .

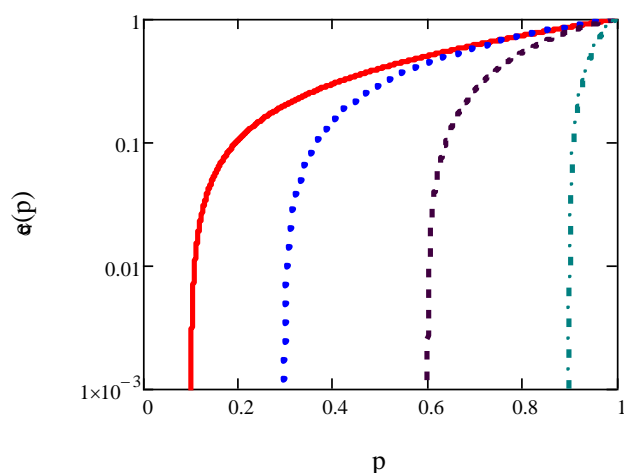


Рис.2 Концентраційна поведінка ефективної провідності згідно (6, 7)

Більш складна ситуація при заданому значенні відношенні  $\sigma_1/\sigma_2$ . Отримуваний поріг відхиляється від заданого в Svt  $\tilde{p}_c$ . Для визначення виду та величини відхилення  $p_c$  від  $\tilde{p}_c$  запишемо у явному вигляді рішення рівняння (6)

$$\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, p, \tilde{p}_c) = \frac{1}{4} \left[ 2 \frac{3p-1+c}{2+c} \sigma_1 + 2 \frac{2-3p}{2+c} \sigma_2 + \sqrt{4 \left( \frac{3p-1+c}{2+c} \sigma_1 + \frac{2-3p}{2+c} \sigma_2 \right)^2 + 16 \frac{1-c}{2+c} \sigma_1 \sigma_2} \right] \quad (8)$$

(для простоти запису  $c(p, \tilde{p}_c)$  записана як  $c$ ) і з рівняння, що визначає точку перегину,

$$\frac{d^3}{dp^3} \sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, p, \tilde{p}_c) = 0 \quad (9)$$

знайдемо поріг «протікання» (значення  $p$  у якому виконується (9)) при заданому відношенні  $\sigma_1/\sigma_2$  – рис. 3. Як, видно, значення відхилення не дуже великі.



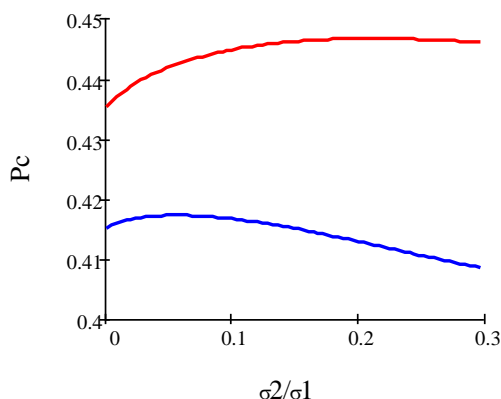


Рис. 3. Порог протікання при заданому значенні відношення провідності фаз.

### МОДИФІКАЦІЯ ТЕРМА

Як, очевидно, з безпосереднього рішення рівняння самоузгодження (наближення Бруггемана-Ландауера) терм працює лише за  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Так, наприклад, див. рис. 4 при заданні  $\tilde{p}_c = 0.2$  при  $\sigma_1 > \sigma_2$  отримуваний поріг протікання дійсно дорівнює 0.2, але при  $\sigma_1 < \sigma_2$  (і той і інший випадок - випадок сильно неоднорідного композиту) поріг на 0.2, а 0.737.

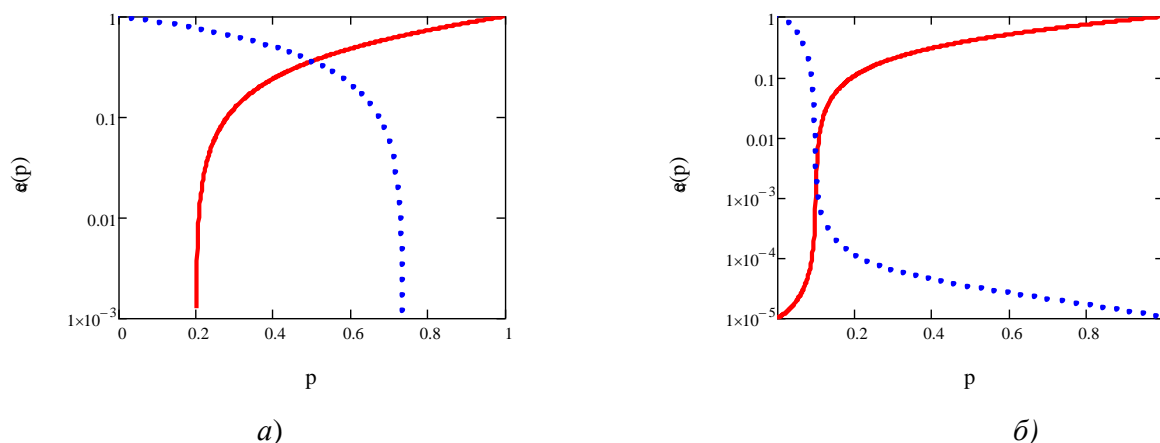


Рис. 4. Пороги протікання  
4а – невірний випадок, 4б – вірний

Необхідно модифікувати терм так, щоб він давав правильні значення порога протікання як при  $\sigma_1 > \sigma_2$ , так і при  $\sigma_1 < \sigma_2$ .

Виходячи з симетрії поведінки  $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, p)$  від концентрації та значення провідності фаз

$$\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, p) = \sigma_e(\sigma_2, \sigma_1, 1 - p), \quad (10)$$

і терма (7), можна визначити вид терму для випадку  $\sigma_1 < \sigma_2$

$$c(p, \tilde{p}_c) = (3p - 2) \left( \frac{p}{\tilde{p}_c} \right)^{\tilde{p}_c} \left( \frac{1-p}{1-\tilde{p}_c} \right)^{1-\tilde{p}_c}. \quad (11)$$

Об'єднання цих термів в один, так що б  $\sigma_1 > \sigma_2$  мав місце терм (7), а при  $\sigma_1 < \sigma_2$  терм (11) має вигляд

$$c(p, \tilde{p}_c) = -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}(1 - 2\tilde{p}_c)U(\sigma_1, \sigma_2), \quad (12)$$

де  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  функція пов'язана з функцією знак  $\text{sgn}(x)$  і має вигляд

$$U(\sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} 1, \sigma_1 > \sigma_2 \\ 0, \sigma_1 = \sigma_2 \\ -1, \sigma_1 < \sigma_2 \end{cases}. \quad (13)$$

Функцію  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  можна вибрати в такий спосіб

$$U(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{|\sigma_1 - \sigma_2|}. \quad (14)$$

Якщо є необхідність диференціювати вираз з  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  її можна наблизити гладкою функцією  $\bar{U}(\sigma_1, \sigma_2)$ , що має похідні в будь-якій точці

$$\bar{U}(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{e^{-\beta\left(\frac{\sigma_2-1}{\sigma_1}\right)} - 1}{e^{-\beta\left(\frac{\sigma_2-1}{\sigma_1}\right)} + 1}, \quad (15)$$

де чим більше параметр  $\beta$ , тим ближче функція  $\bar{U}(\sigma_1, \sigma_2)$  до ступінчастої.

На Рис.4б показана залежність ефективної провідності від концентрації при заданому порозі перебігу  $\tilde{p}_c = 0.1$  при  $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 10^{-5}$  (умовні одиниці) і зворотний випадок, коли  $\sigma_1 = 10^{-5}, \sigma_2 = 1$ .

Тепер маючи терм у вигляді (12,13) або (12,15) можна єдиним чином знайти різні залежності ефективних коефіцієнтів за будь-якої нерівності  $\sigma_1, \sigma_2$ .

## ЕФЕКТИВНІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИПАДКОВО НЕОДНОРОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

У [11] було розглянуто термоелектричні властивості композитів з різними порогамі протікання. Було використано наближення середнього поля із термом, аналогічним Svt [7]. Тут ми використовуємо модифікований терм (12 – 15), що дозволяє єдиним чином розглядати будь-які випадки нерівностей локальних кінетичних коефіцієнтів фаз.

Виберемо такі значення кінетичних коефіцієнтів першої та другої фази [15], при температурі  $T = 300\text{K}$ ,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}, \quad \kappa_1 = 36.1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad \alpha_1 = 0 \text{ В}/\text{К}, \\ \sigma_2 &= 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}, \quad \kappa_2 = 0.963 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad \alpha_2 = 173 \cdot 10^{-6} \text{ В}/\text{К},\end{aligned}\quad (16)$$

де  $\kappa$  – питома теплопровідність,  $\alpha$  – термоЕРС. Таким чином, у вибраному варіанті  $\sigma_1 > \sigma_2$  і  $\kappa_1 > \kappa_2$  термоелектрична добротність фаз дорівнює

$$Z_1 T = 0, \quad Z_2 T = \frac{\sigma_2 \alpha_2^2}{\kappa_2} T = 1.2 \quad (17)$$

Введемо параметр  $\lambda$ , що дозволяє розглянути набір значень  $\sigma_2$  і  $\alpha_2$ , таких добротність  $Z_2 T$  залишається незмінною, але нерівність  $\sigma_1 > \sigma_2$  змінюється на зворотне

$$\sigma_2(\lambda) = \sigma_2(1 + \lambda), \quad \alpha_2(\lambda) = \alpha_2(1 + \lambda)^{-1/2}, \quad \lambda \in [0, 9] \quad (18)$$

При  $\lambda = 0$  має місце початковий набір значень локальних кінетичних коефіцієнтів, а при  $\lambda = 9$  такій  $\sigma_2 = 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  і  $\alpha_2 = 63 \cdot 10^{-6} \text{ В}/\text{К}$ . Тепер для провідності має місце зворотна нерівність  $\sigma_2 > \sigma_1$ .

Запишемо вираження щільностей струму та потоку тепла у вигляді

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{j} \rangle &= \sigma_e \langle \mathbf{E} \rangle + \sigma_e \alpha_e \langle -\nabla T \rangle, \\ \frac{\langle \mathbf{q} \rangle}{T} &= \sigma_e \alpha_e \langle \mathbf{E} \rangle + \kappa_e \frac{1 + Z_e T}{T} \langle -\nabla T \rangle,\end{aligned}\quad (19)$$

де  $\nabla T$  – градієнт температури.

Введемо матрицю локальних та ефективних кінетичних коефіцієнтів  $\hat{\Omega}$

$$\hat{\Omega}_i = \begin{pmatrix} \sigma_i & \sigma_i \alpha_i \\ \sigma_i \alpha_i & \kappa_i \frac{1 + Z_i T}{T} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

де  $i$  – номер фази.

У таких позначеннях наближення середнього поля для термоелектричних явищ можна записати у вигляді (подробіці викладені у [11])

$$\Lambda_1 p + \Lambda_2 (1 - p) = 0, \quad (21)$$

де

$$\Lambda_1 = \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1}, \quad \Lambda_2 = \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2}, \quad (22)$$

де вирази типу  $\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1 / 2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1$  розуміються як  $(\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1)(2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1)^{-1}$ .

Рівняння самоузгодження з модифікованим термом має вигляд

$$\frac{\Lambda_1}{1 + C\Lambda_1} p + \frac{\Lambda_2}{1 + C\Lambda_2} (1 - p) = 0, \quad (23)$$

де тепер терм записується у вигляді матриці

$$C(p, \tilde{p}_c) = \begin{pmatrix} c_\sigma(p, \tilde{p}_c) & 0 \\ 0 & c_\kappa(p, \tilde{p}_c) \end{pmatrix}$$

Тут  $c_\sigma(p, \tilde{p}_c)$  взято з (12-15), а  $c_\kappa(p, \tilde{p}_c)$  знаходиться з нього з відповідною заміною  $\sigma_1$  на  $\kappa_1$  і  $\sigma_2$  на  $\kappa_2$ .

Проаналізуємо отримане рішення (23) добротності. На рис. 5 наведено залежність  $Z_e T$  від параметра  $\lambda$ . За зміни параметра  $\lambda$  добротності фаз залишаються незмінними. Досить несподіваним є те, що ефективна добротність при цьому залежить від параметра  $\lambda$ . Відзначимо також нелінійну залежність ефективної добротності від параметра  $\lambda$ .

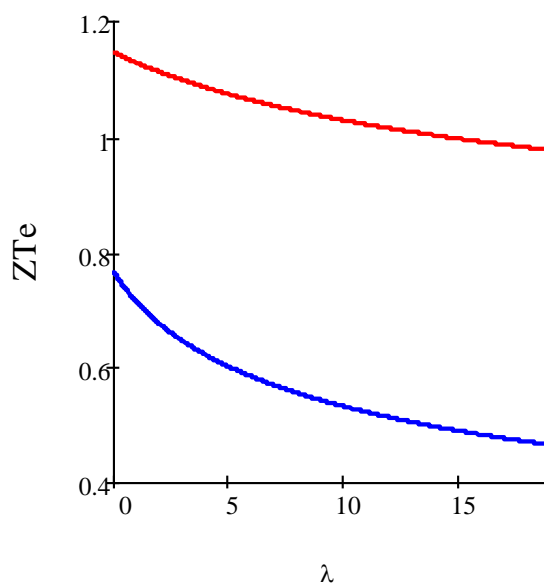


Рис. 5. Залежність  $Z_e T$  від параметра  $\lambda$ .  
Верхня крива при концентрації 0.1 друга при 0.3

На рис.6 наведено залежність ефективної добротності  $Z_e T$  від концентрації першої фази  $p$  для різних значень параметра  $\lambda$ . Зазначимо, що ці залежності змінюють ранжування за значеннями параметра  $\lambda$  (чим більше параметр, тим більше максимум) при переході через поріг протікання.

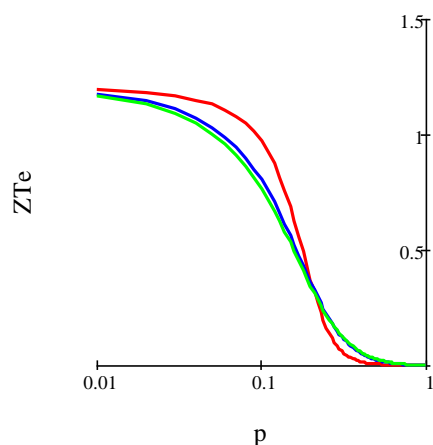


Рис. 6. Залежність ефективного добротності  $Z_e T$  від концентрації першої фази для різних значень параметра  $\lambda$  (зверху вниз в лівій частині) параметр дорівнює 0, 9, 15.

## Висновки

Використовуючи модифікацію терму, запропонованого в [11], розглянуто поведінку ефективного добротності  $Z_e T$  при різному наборі локальних кінетичних коефіцієнтів. Як виявилось, при постійних значеннях локальних добротностей  $Z_1 T = \text{const}$ ,  $Z_2 T = \text{const}$  величина  $Z_e T$  змінюється за зміни набору кінетичних коефіцієнтів. Цікавим є розглянути аналогічну модифікацію терму для завдання визначення ефективних пружних модулів.

Цей підхід дозволяє в рамках теорії середнього поля описати композити з різними порогоми протікання. Зауважимо, що значення ефективних коефіцієнтів, навіть далеко від порогу протікання залежать від значення порогу протікання. У композитах з наночастинками спостерігаються [16] незвичайні з погляду стандартної теорії середнього поля та теорії перколяції значення порогів протікання (спостерігається, у тому числі, відмінність між експериментально отриманими значеннями порогів перколяції для, наприклад, електропровідності та пружності). Запропонований у роботі підхід дозволяє (формально, без з'ясування фізичної причини такого явища) описати ефективні властивості таких композитів.

## Література

1. Torquato S., *Random Heterogeneous Materials. Microstructure and Macroscopic Properties*, Springer Verlag: New York, USA, 2002. doi: 10.1115/1.1483342
2. Балагуров Би. Я., *Електрофізичні властивості композитів*, М., Ленанд, 2015, 752с.
3. Choy TC, *Effective medium theory: principles and applications*, Oxford University Press: Oxford, UK, 2016. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198705093.001.0001
4. Snarskii A., Bezsudnov IV, Sevryukov VA, Morozovskiy A., Malinsky J., *Transport Processes in*

- Macroscopically Disordered Media. From Mean Field Theory to Percolation*, Springer Verlag: New York, USA, 2016. doi: 10.1007/978-1-4419-8291-9.
5. Bruggeman VD, Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys. (Leipzig)*, 1935, 416, 664. doi: 10.1002/andp.19354160705
  6. Landauer R., The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.* 1952, 23 , 784. doi:10.1063/1.1702301.
  7. Sarychev AK, Vinogradov AP, Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *phys. stat. sol. (b)* 1983, 117 , K113-K118. doi: 10.1002/pssb.2221170252
  8. Snarskii A., Zorinets D., Shamonin M., Kalita V., Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: electric and magnetic phenomena. *Phys. A: Stat. Mech. Appl.* 2019, 535 , 122467. doi: 10.1016/j.physa.2019.122467
  9. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P., Colossal Magnetoelastic Effects в Magnetoactive Elastomers. arxiv: 2002.11762, 2020.
  10. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P., Effective Medium Theory для Elastic Properties of Composite Materials with Various Percolation Thresholds. *Materials* 2020, 13, 1243.
  11. Snarskii A., Yuskevich P., Effective medium theory for the thermoelectric properties of composite materials with various percolation thresholds, *Journal of Thermoelectricity* 2019, 3, 40.
  12. Lee S., Hippalgaonkar K., Yang F., Hong J., Ko C., Suh J., Liu K., Wang K., Urban JJ, Zhang X., Dames C., Hartnoll SA, Delaire O., Wu J., 2017 *Science*, 355, 371.
  13. Budiansky, B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 1965, 13, 223-227. doi: 10.1016/0022-5096(65)90011-6
  14. Шермергор Т.Д. Теорія пружності мікронеоднорідних середовищ, Наука, М., 1977, 400 стор.
  15. Rowe DM, *Thermoelectrics Handbook (macro to nano)*, Taylor Francis, 2006, 1000.
  16. M.-L. Huang, Y.-D. Shi, M. Wang, A comparative study on nanoparticle network-dependent electrical conductivity, electromagnetic wave shielding effectiveness and rheological properties in multiwall carbon nanotubes filled polymer nanocomposites, *Polym. Compos.* 2022, 1. <https://doi.org/10.1002/pc.2716>

Надійшли до редакції: 16.03.2022

**A. Snarskii**, *doc. phys.– mat. sciences*,  
*professor*, **V. Fedotov**  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremohy Prosp.,  
Kyiv, 03056, Ukraine, e - mail : *asnarskii @ gmail. Com*

## THERMOELECTRIC COMPOSITES WITH DIFFERENT PERCOLATION THRESHOLDS

*A modification of the mean-field approximation is considered for describing the behaviour of effective kinetic coefficients, including for thermoelectric composites. The proposed modification makes it possible to describe randomly heterogeneous media with different percolation thresholds at arbitrary values of local kinetic coefficients.*

**Key words:** thermoelectric composites, kinetic coefficients.

### References

1. Torquato S. (2002). *Random heterogeneous materials. Microstructure and macroscopic properties*. Springer Verlag: New York, USA, doi: 10.1115/1.1483342
2. Balagurov B.Ya. (2015). *Electrophysical properties of composites*. Moscow: Lenand.
3. Choy T.C. (2016). *Effective medium theory: principles and applications*, Oxford University Press: Oxford, UK, doi: 10.1093/acprof:oso/9780198705093.001.0001
4. Snarskii A., Bezsudnov IV, Sevryukov VA, Morozovskiy A., Malinsky J. (2016). *Transport processes in macroscopically disordered media. From mean field theory to percolation*. Springer Verlag: New York, USA, doi: 10.1007/978-1-4419-8291-9.
5. Bruggeman V.D. (1935). Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys. (Leipzig)*, 16, 664. doi: 10.1002/andp.19354160705
6. Landauer R. (1952). The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.* 23, 784. doi:10.1063/1.1702301.
7. Sarychev A.K., Vinogradov A.P. (1863). Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *phys. stat. sol. (b)*, 117, K113-K118. doi: 10.1002/pssb.2221170252
8. Snarskii A., Zorinets D., Shamonin M., Kalita V. (2019). Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: electric and magnetic phenomena. *Phys. A: Stat. Mech. Appl.* 535, 122467. doi: 10.1016/j.physa.2019.122467
9. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P. (2020). Colossal magnetoelastic effects in magnetoactive elastomers. arxiv: 2002.11762, 2020.
10. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P. (2020). Effective medium theory for elastic properties of composite materials with various percolation thresholds. *Materials*, 13, 1243.
11. Snarskii A., Yuskevich P. (2019). Effective medium theory for the thermoelectric properties of composite materials with various percolation thresholds. *J. Thermoelectricity*, 3, 40.
12. Lee S., Hippalgaonkar K., Yang F., Hong J., Ko C., Suh J., Liu K., Wang K., Urban JJ, Zhang X., Dames C., Hartnoll SA, Delaire O., Wu J. (2017). *Science*, 355, 371.
13. Budiansky, B. (1965). On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 13, 223-227. doi: 10.1016/0022-5096(65)90011-6

14. Shermegor T.D. (1977). *Theory of elasticity of microinhomogeneous media*. Moscow: Nauka.
15. Rowe D.M (2006). *Thermoelectrics Handbook (macro to nano)*, Taylor Francis, 1000.
16. M.-L. Huang, Y.-D. Shi, M. Wang. (2022). A comparative study on nanoparticle network-dependent electrical conductivity, electromagnetic wave shielding effectiveness and rheological properties in multiwall carbon nanotubes filled polymer nanocomposites, *Polym. Compos.* 1. <https://doi.org/10.1002/pc.2716>

Submitted: 16.03.2022





Горський П.В.

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

Кузь Р.В., канд. фіз.-мат наук<sup>1,2</sup>

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

email: gena.grim@gmail.com,

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет

імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна



Кузь Р.В.

## АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ МЕТАЛЕВОГО ПОКРИТТЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГІЛОК НА ККД ГЕНЕРАТОРНОГО ТЕРМОЕЛЕМЕНТА

Визначено вплив захисного металевого покриття бічної поверхні термоелектричних гілок на ККД генераторного термоелемента. При цьому враховано, що металеве покриття шунтує термоелектричну гілку як за електричним струмом, так і за тепловим потоком. Теоретичні розрахунки зроблено без врахування вихрових термоелектричних струмів у системі «термоелектричний матеріал – захисне покриття» і температурних залежностей характеристик металу і термоелектричного матеріалу для пари «телурид вісмуту – нікель». Враховано вплив металевого покриття на ефективну термоЕРС гілки. Показано, що при врахуванні впливу металевого покриття на термоЕРС гілки ККД є різко монотонно спадною функцією товщини металевого покриття, так що для досягнення ККД термоелемента на рівні близько 5% товщина покриття повинна складати не більше 0.5 мкм за висоти гілки 1 мм, близько 0.9 мкм за висоти гілки 2 мм і близько 1 мкм за висоти гілки 3 мм. При цьому вважається, що електричний контактний опір складає близько  $10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловий контактний опір відсутній. Однак за наявності теплового контактного опору на рівні 0.8 К·см<sup>2</sup>/Вт ККД термоелемента зберігається на рівні близько 5.3% навіть за товщини покриття 5 мкм. Бібл., рис., табл..

**Ключові слова:** надійність термоелемента, термоелектрична гілка, металеве покриття, шунт, термоелектрична добротність, ефективна термоЕРС, товщина покриття, максимальний ККД термоелемента.

### Вступ

Надійність, зокрема ресурсна стійкість термоелектричних генераторних модулів є навіть більш важливою їх характеристикою, ніж споживчі характеристики. Це зумовлено тим, що вони застосовуються, зокрема, у таких системах, де їх заміна в разі відмови неможлива або вельми утруднена, наприклад у космічній сфері та медицині. А ресурс істотно визначається стійкістю

термоелементів, з яких складаються ці модулі, і, отже, стійкістю термоелектричних матеріалів, з яких виготовлено їх термоелектричні гілки. Серед характерних механізмів відмов термоелементів та термоелектричних генераторних модулів виділяють, зокрема, сублимацію летких компонентів та легуючих домішок з термоелектричних матеріалів та механічне руйнування термоелектричних гілок як у процесі виготовлення термоелектричних генераторних модулів так і у процесі їх експлуатації. Для попередження або нівелювання негативного впливу цих факторів на споживчі характеристики термоелектричних генераторних модулів бічну поверхню термоелектричних гілок частково або повністю вкривають різними покриттями, причому повністю – як правило полімерними [1], склоемалевими [2] або керамічними [3], а частково – металевими [4]. Для підвищення механічної стійкості термоелектричних генераторних модулів при їх проектуванні спеціально узгоджують між собою механічну міцність, коефіцієнт лінійного термічного розширення, модуль Юнга, коефіцієнт Пуасона та теплопровідність термоелектричного матеріалу [5 – 7], а також застосовують спеціальні каркаси між термоелектричними гілками для обмеження їх переміщень і деформацій у ході експлуатації генераторних модулів [8]. В усіх цих випадках домагаються зниження шунтування термоелектричних гілок за тепловим потоком [9]. Однак для одночасного розв'язання перелічених проблем уявляється перспективним суцільне покриття бічної поверхні термоелектричних гілок металом. Оскільки таке покриття істотно шунтує термоелектричну гілку за електричним струмом і тепловим потоком, то метою даної статті є орієнтовна оцінка впливу геометричних характеристик такого покриття на ККД термопарного термоелемента у режимі генерування електричної енергії.

### Фізична модель термоелемента з повністю захищеними гілками

Схематичне зображення фізичної моделі термопарного термоелемента з повністю захищеними гілками наведено на рис. 1.

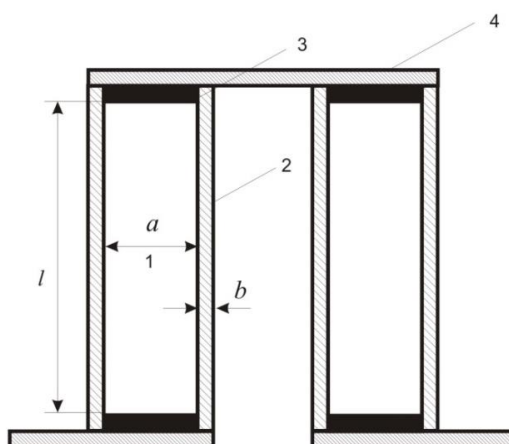


Рис. 1. Фізична модель термоелемента з захищеними гілками: 1 – термоелектричний матеріал; 2 – захисне покриття; 3 – антидифузійний шар; 4 – припаяна мідна комутація

В моделі вважається що гілка має форму прямокутного паралелепіпеда з квадратним поперечним перерізом. Металеве покриття є суцільним. Окрім того в моделі на початковому етапі дослідження робляться наступні припущення: 1) нехтується температурними залежностями термоелектричних параметрів напівпровідника і металу, тобто вони вважаються приблизно сталими в інтервалі температур, в якому працює термоелемент; 2) вихрові струми на межі термоелектричного матеріалу з металом відсутні; 3) торцеві грані покривного шару контактують з металевими комутаційними електродами. В такому разі термоелектрична гілка еквівалентна двом паралельно з'єднаним електричним та тепловим опорам, якщо захисне покриття вкриває її бічну поверхню повністю. У термопарному термоелементі такі гілки слід вважати послідовно з'єднаними електрично і паралельно з'єднаними по теплу. Враховуємо також електричний та тепловий контактні опори, які вважаємо незалежними від температури. Власним опором металеві комутації, припою та антидифузійного покриття нехтуємо.

### Розрахунок ККД термоелемента і обговорення його результатів

Для розрахунку ККД такого термоелемента спочатку визначимо електричний та тепловий опір кожної гілки. Вони дорівнюють відповідно:

$$R_E = \frac{\rho_s \rho_m l + 2\rho_{ce} \left[ 4\rho_s (\delta + \delta^2) + \rho_m \right]}{a^2 \left[ 4\rho_s (\delta + \delta^2) + \rho_m \right]}, \quad (1)$$

$$R_T = \frac{\kappa_s^{-1} \kappa_m^{-1} l + 2\rho_{ct} \left[ 4\kappa_s^{-1} (\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right]}{a^2 \left[ 4\kappa_s^{-1} (\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right]}. \quad (2)$$

В цих формулах  $a$  – сторона поперечного перерізу гілки,  $l$  – її довжина,  $\delta = b/a$  – відносна товщина покриття, тобто відношення товщини покриття до сторони квадратного перерізу гілки,  $\rho_s$ ,  $\rho_m$  – відповідно питомі електричні опори,  $\kappa_s$ ,  $\kappa_m$  – відповідно теплопровідності напівпровідника і металу,  $\rho_{ce}$ ,  $\rho_{ct}$  – електричний та тепловий питомі контактні опори відповідно.

Перейдемо до визначення ККД термоелемента з частково або повністю захищеними гілками. Нехай матеріали гілок мають однакові питомі електричні опори та теплопровідності та однакові за величиною але протилежні за знаком коефіцієнти термоЕРС  $\alpha_s$ . Тоді добротність термоелектричної гілки дорівнюватиме:

$$Z = \frac{\alpha_s^2 R_T}{R_E}. \quad (3)$$

Враховуючи співвідношення (1) і (2), ми знайдемо для неї наступний вираз:

$$Z = \alpha_s^2 \frac{\left\{ \kappa_s^{-1} \kappa_m^{-1} l + 2\rho_{ct} \left[ 4\kappa_s^{-1} (\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right] \right\} \left[ 4\rho_s (\delta + \delta^2) + \rho_m \right]}{\left[ 4\kappa_s^{-1} (\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right] \left\{ \rho_s \rho_m l + 2\rho_{ce} \left[ 4\rho_s (\delta + \delta^2) + \rho_m \right] \right\}}. \quad (4)$$

Покладаючи в цій формулі  $\delta = 0$ ,  $\rho_{ct} = 0$ ,  $\rho_{ce} = 0$  прийдемо до відомого виразу для добротності термоелектричного матеріалу:

$$Z_{ТЕМ} = \alpha_s^2 / \rho_s \kappa_s. \quad (5)$$

Зауважимо, що формула (4) справедлива і для гілки з круговим поперечним перерізом, якщо під  $\delta$  розуміти відношення товщини покриття до діаметру кругового перерізу гілки.

Але, строго кажучи, слід додатково врахувати вплив покриття і на термоЕРС гілки, враховуючи, що гілку з металевим покриттям, строго говорячи, слід розглядати не як одне з паралельно під'єднаним опором, а як два паралельно з'єднаних джерела електричної енергії. Еквівалентну електричну схему гілки з покриттям зображено на рис. 2.

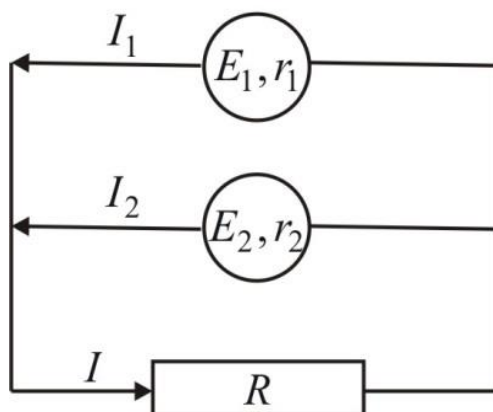


Рис.2. Еквівалентна електрична схема термоелектричної гілки з покриттям.

За правилами Кірхгофа складемо рівняння для струмів:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 - I &= 0 \\ I_1 r_1 + IR &= E_1 \\ I_2 r_2 + IR &= E_2 \end{aligned} \quad (6)$$

З цієї системи знайдемо струм  $I$ :

$$I = \frac{E_1/r_1 + E_2/r_2}{(1/r_1 + 1/r_2) \left( R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)}. \quad (7)$$

З виразу (10) випливає, що два паралельно з'єднаних джерела електричної енергії еквівалентні одному джерелу з еквівалентною ЕРС, яка дорівнює:

$$E = \frac{E_1/r_1 + E_2/r_2}{1/r_1 + 1/r_2}, \quad (8)$$

та еквівалентним внутрішнім опором, який дорівнює:

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (9)$$

З формули (11) випливає, що для гілки  $p$ - типу у неї слід підставити:

$$E_1 = \alpha_s \Delta T, \quad (10)$$

$$E_2 = \alpha_m \Delta T, \quad (11)$$

а для гілки  $n$ - типу слід підставити:

$$E_1 = \alpha_s \Delta T, \quad (12)$$

$$E_2 = -\alpha_m \Delta T, \quad (13)$$

де  $\alpha_m$  – термоЕРС металу.

і, окрім того, для гілок обох типів слід підставити:

$$r_1 = \rho_s \frac{l}{a^2}, \quad (14)$$

$$r_2 = \frac{\rho_m l}{4a^2(\delta + \delta^2)}. \quad (15)$$

Тому вираз для ефективної добротності термоелектричної гілки набуде такого остаточного вигляду:

$$Z_e = \left[ \frac{\alpha_s \rho_s^{-1}}{\rho_s^{-1} + \rho_m^{-1}(\delta + \delta^2)} \right]^2 \times \frac{\left\{ \kappa_s^{-1} \kappa_m^{-1} l + 2\rho_{ct} \left[ 4\kappa_s^{-1}(\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right] \right\} \left[ 4\rho_s(\delta + \delta^2) + \rho_m \right]}{\left[ 4\kappa_s^{-1}(\delta + \delta^2) + \kappa_m^{-1} \right] \left\{ \rho_s \rho_m l + 2\rho_{ce} \left[ 4\rho_s(\delta + \delta^2) + \rho_m \right] \right\}}. \quad (16)$$

Перейдемо тепер до розрахунку максимального ККД термоелемента в режимі генерування

електричної енергії. Геометричні розміри гілки без покриття будемо вважати рівними  $a = 1.4$  мм,  $l = 1, 2$  або  $3$  мм, товщину покриття  $b$ , і, отже, параметр  $\delta = b/a$  вважатимемо змінним, а параметри матеріалів вважатимемо незалежними від температури і рівними наступним значенням:  $\alpha_s = 160$  мкВ/К,  $\rho_s = 7.143 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\rho_m = 7.5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $\kappa_s = 1.7$  Вт/(м·К),  $\kappa_m = 90$  Вт/(м·К), питомий електричний контактний опір  $\rho_{ce} = 10^{-9}$  Ом·м<sup>2</sup>, а тепловим контактним опором знехтуємо. Для обчислення максимального ККД  $\eta_{\max}$  скористаємося наступною формулою [10]:

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.5Z_e(T_h + T_c)} - 1}{\sqrt{1 + 0.5Z_e(T_h + T_c)} + T_c/T_h}, \quad (17)$$

де  $T_h$  та  $T_c$  – відповідно температури гарячої та холодної сторін термоелемента,  $Z_e$  – ефективна термоелектрична добротність гілки з покриттям. Результати обчислення ККД між крайніми температурами 300 та 500 К наведено на рис. 3, 4.

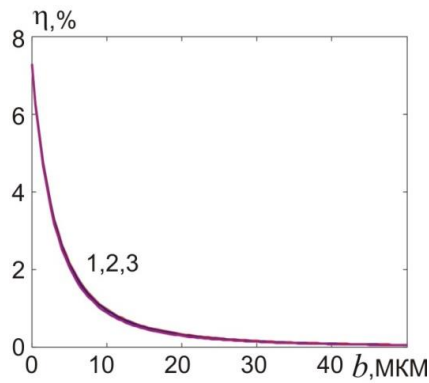


Рис. 3. Залежність ККД від товщини нікелевого покриття гілки на основі Ві-Те у широкому діапазоні товщин з урахуванням впливу покриття на термоЕРС гілки 1 – за висоти гілки 3 мм; 2 – за висоти гілки 2 мм; 3 – за висоти гілки 1 мм

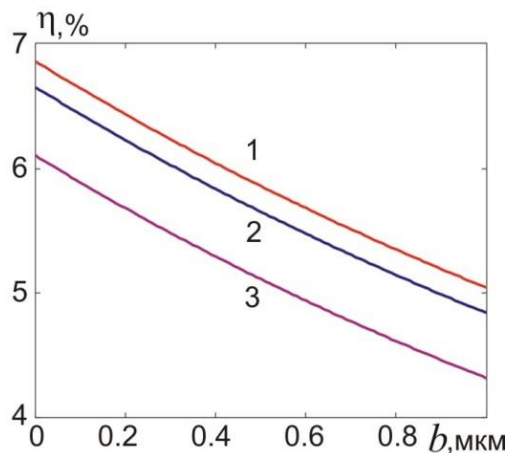


Рис. 4. Залежність ККД від товщини нікелевого покриття гілки на основі Ві-Те у діапазоні товщин, за яких можливе збереження ККД термоелемента на рівні не меншому за 4% : 1 – за висоти гілки 3 мм; 2 – за висоти гілки 2 мм; 3 – за висоти гілки 1 мм

З рисунків видно, що при урахуванні впливу металевого покриття на термоЕРС гілки ККД термоелемента є різко монотонно спадною функцією товщини покриття. Якщо не враховувати вплив теплового контактного опору, то виходить, що для збереження ККД термоелемента на рівні принаймні 5 % слід робити покриття товщиною не більше 0.9 мкм за висоти гілки 2 – 3 мм.

Однак наявність теплового контактного опору до певної міри нівелює негативний вплив шунтування гілок за тепловим потоком. Це ілюструється рис. 3. При цьому ми, ґрунтуючись на результатах виконаних нами розрахунків теплових контактних опорів, вважаємо, що максимальне значення контактного опору може складати близько  $\rho_{ct}=0.8 \text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$ .

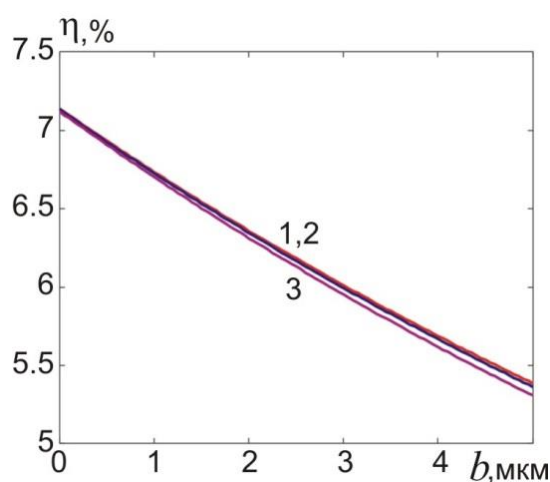


Рис. 5. Залежність ККД від товщини нікелевого покриття гілки в разі врахування теплових контактних опорів у широкому інтервалі товщин.

Нумерація кривих та ж, що на рис. 4.

Ми бачимо, що вплив теплових контактних опорів сповільнює падіння ККД термоелемента зі зростанням товщини нікелевого покриття гілок. Таким чином, якщо оцінку теплових контактних опорів зроблено коректно, то можна вважати, що ККД термоелемента в разі покриття бічної поверхні гілки на основі *Bi-Te* нікелевим антисублімаційним шаром товщиною 5 мкм збережеться на рівні 5.3-5.4 %.

Порівняємо ці результати з результатами праці [11] у якій досліджувався у тому числі вплив наявності електропровідних шарів з нікелю на ізотермічних гранях зонально-неоднорідного термоелемента на основі *Bi-Te* на його ККД. Показано, що ККД такого термоелемента є монотонно зростаючою функцією товщини покриття, яка досить швидко виходить на насичення за відношення товщини покриття до лінійного розміру витка термоелемента рівного близько 0.06. Значення ККД при цьому досягає близько 5.1 %, що, як випливає з рис. 3, є близьким до наших результатів за товщини нікелевого антисублімаційного шару, рівної близько 5 мкм. Однак строге порівняння цих результатів не є коректним, тому що

еквівалентні електричні схеми термопарного термоелемента з захисним електропровідним шаром на кожній гілці і зонально- неоднорідного термоелемента, в якому електропровідний шар електрично з'єднує *n*- та *p*- області принципово відмінні між собою.

## Висновки

1. Без врахування вихрових струмів у системі «термоелектрична гілка – антисублімаційне захисне металеве покриття» та температурних залежностей термоелектричних параметрів термоелектричного матеріалу і металу розраховано термоелектричну добротність гілки з повністю захищеною бічною поверхнею.
2. Показано, що за відсутності теплових контактних опорів максимальний ККД термоелемента з повністю захищеними гілками збережеться на рівні близько 5 %, якщо за висоти гілки 2 – 3 мм товщина покриття не перевищуватиме 0.9 – 1 мкм.
3. За наявності теплових контактних опорів величиною близько 0.8 К·см<sup>2</sup>/Вт максимальний ККД термоелемента з повністю захищеними гілками збережеться на рівні близько 5.3 %, якщо за висоти гілки 1 – 3 мм товщина покриття не перевищуватиме 5 мкм.

## Література

1. Гришин В.И. Способ изготовления полупроводниковых ветвей для термоэлектрического модуля и термоэлектрический модуль / В.И. Гришин, Д.В. Котлов. // Номер публикации WO/2015/126272. Дата публикации 27.08.2015. № международной заявки PCT/RU2014/000116. Дата международной заявки 24.02.2014. МПК H01L35/32 2006.1, H01L35/34 2006.1, CPC H01L35/10, H01L35/32, H01L35/34. Заявитель: общество с ограниченной ответственностью «Рустек».
2. Сабо Є.П. Механізми, що визначають ресурсні можливості термоелектричних перетворювачів. / Є.П. Сабо. Механізми, що визначають ресурсні можливості термоелектричних перетворювачів. // Термоелектрика. – 2006. – №2. – С. 59-70.
3. Salvo M. Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics / M.Salvo, F. Smeacetto, F. D'Isanto et al. // Journal of European Ceramic Society. – 2018. – <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. US patent No US 7480984 B1 (2009). J.S. Sakamoto, T. Caillat, J.-P. Fleurial, G.J. Snyder. Method of suppressing sublimation in advanced thermoelectric devices.
5. Wereszczak A.A. Thermoelectric mechanical reliability. / A.A. Wereszczak, R. McCarty, A. Thompson, J. Sharp. – 2012 Vehicle technologies annual merit review and peer evaluation meeting. Arlington VA. 15 May 2012.
6. Liu W. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: from materials to devices. / W. Liu, Q. Jie, H.S. Kim and Z. Ren. – Preprint of department of physics and Texas center for superconductivity (TcSUH) – University of Houston, Texas 77204, USA. – 60 p.
7. Karri N.K. Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and



- thermoelectric considerations / N.K. Karri, C. Mo // Journal of electronic materials. – November 2017. – P.1-10. – <https://doi:10.1007/s11664-017-5934-6> .
8. Yi Yan. Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators ( $\mu$ -TEG)/ Yi Yan // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering) in the University of Michigan – 2019.
9. Song Lv. Study of thermal insulation material influence on the performance of thermoelectric generators by creating a significant effective temperature difference. /Lv Song, M. Liu, W. Xe et al. // Energy Conversion and Management – 2020. –Vol.207. – P.112516-1 – 112516-9.
- 10.Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – Киев: Наукова думка. 1979. – 768 с.
- 11.Анатичук Л.И. Оптимізація зонально-неоднорідного термоелемента з електропровідними шарами на ізотермічних гранях./ Л.И. Анатичук, Р.В. Кузь, О.Я. Лусте. // Термоелектрика. – 2005. – №3. – С. 68-73.

Надійшли до редакції: 13.03.2022

**Gorskyi P.V.**, D.Sc (Phys &Math)<sup>1,2</sup>,

**Kuz R.V.**, Cand. Sc (Phys &Math)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,

*email: gena.grim@gmail.com,*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## **ANALYTICAL CALCULATION OF THE EFFECT OF METAL COATING OF THERMOELECTRIC LEGS ON THE EFFICIENCY OF GENERATOR THERMOELEMENT**

*The effect of the protective metal coating of the lateral surface of thermoelectric legs on the efficiency of a generator thermoelement has been determined. At the same time, it is taken into account that the metal coating shunts the thermoelectric leg both in terms of electric current and heat flux. Theoretical calculations were made without taking into account eddy thermoelectric currents in the "thermoelectric material - protective coating" system and the temperature dependences of the characteristics of the metal and thermoelectric material for the "bismuth telluride - nickel" couple. The effects of the metal coating on the effective thermoEMF of the leg are taken into account. It is shown that when the influence of the metal coating on the thermoEMF of the leg is taken into account, the efficiency is a sharply monotonically decreasing function of the thickness of the metal coating, so that in order to achieve the efficiency of a thermoelement at a level of about 5%, the coating thickness should be no more than 0.5  $\mu\text{m}$  at a leg height of 1 mm, about 0.9*

$\mu\text{m}$  for the leg height of 2 mm and about 1  $\mu\text{m}$  with a leg height of 3 mm. In so doing, it is assumed that the electrical contact resistance is about  $10^{-5} \text{ Ohm}\cdot\text{cm}^2$ , and the thermal contact resistance is absent. However, in the presence of thermal contact resistance at a level of  $0.8 \text{ K}\cdot\text{cm}^2 / \text{W}$ , the efficiency of the thermoelement remains at a level of about 5.3% even with a coating thickness of 5  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** thermoelement reliability, thermoelectric leg, metal coating, shunt, thermoelectric figure of merit, effective thermoEMF, coating thickness, maximum thermoelement efficiency.

## References

1. WO/2015/126272. V.I.Grishin, D.V.Kotlov. Method of manufacturing semiconductor legs for thermoelectric module and thermoelectric module.
2. Sabo E.P. (2006). Mechanisms that determine the resource possibilities of thermoelectric converters. *J.Thermoelectricity*, 2, 59-70.
3. Salvo M., Smeacetto F., D'Isanto F. et al. (2018) Glass-ceramic oxidation protection of higher manganese silicide thermoelectrics *Journal of European Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.01.007>
4. *US patent No US 7480984 B1* (2009). J.S. Sakamoto, T. Caillat, J.-P. Fleurial, G.J. Snyder. Method of suppressing sublimation in advanced thermoelectric devices.
5. Wereszczak A.A., McCarty R., Thompson, Sharp J. (2012). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle technologies annual merit review and peer evaluation meeting*. Arlington VA. 15 May 2012.
6. Liu W., Jie Q., Kim H.S., Ren Z. *Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: from materials to devices*. – Preprint of department of physics and Texas center for superconductivity (TcSUH) – University of Houston, Texas 77204, USA. – 60 p.
7. Karri N.K., Mo C. (2017). Reliable thermoelectric module design under opposing requirements from structural and thermoelectric considerations. *Journal of Electronic Materials*. November, 2017, 1-10. – <https://doi:10.1007/s11664-017-5934-6>.
8. Yi Yan. (2019). Vertical self-defined thermoelectric legs for use in thin-film micro thermo electric generators ( $\mu$ -TEG)/ Yi Yan . *A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering) in the University of Michigan*.
9. Song Lv., Liu M., Xe W. et al. (2020). Study of thermal insulation material influence on the performance of thermoelectric generators by creating a significant effective temperature difference. *Energy Conversion and Management*, Vol.207, 112516-1 – 112516-9.
10. Anatychuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelectricheskiie ustroistva. Spravochnik. [Thermoelements and thermoelectric devices. Guidebook]*. Kyiv: Naukova Dumka.
11. Anatychuk L.I., Kuz R.V., Luste O.J. (2005). Optimization of zone-inhomogeneous thermoelement with electrically conductive layers on isothermal faces. *J.Thermoelectricity*, 3, 68-73.

Submitted: 13.03.2022

УДК 537.32; 538.93

**Ромака В.А.**, док. тех. наук,  
канд. фіз.-мат. наук, професор<sup>1</sup>  
**Стадник Ю.В.**, канд. хім. наук<sup>2</sup>  
**Ромака Л.П.**, канд. хім. наук<sup>2</sup>  
**Плевачук Ю.О.**, док. фіз.-мат. наук,  
професор<sup>2</sup>  
**Ромака В.В.**, докт. техн. наук,  
канд. хім. наук, професор<sup>3</sup>  
**Горинь А.М.**, канд. хім. наук<sup>2</sup>  
**Пашкевич В.З.**, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>  
**Зелінський А.В.**, канд. хім. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”,  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна;  
*e-mail: vromaka@polynet.lviv.ua;*

<sup>2</sup>Львівський національний університет ім. І. Франка,  
вул. Кирила і Мефодія, 6, Львів, 79005, Україна;  
*e-mail: lyubov.romaka@lnu.edu.ua*

<sup>3</sup>Інститут дослідження твердого тіла ім. Лейбніца,  
Гельмгольц штрассе, 20, 01069 Дрезден, Німеччина;  
*e-mail: vromakal@gmail.com*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МАТЕРІАЛУ $Lu_{1-x}V_xNiSb$ : МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

---

Результатом моделювання кристалічної та електронної структур, термодинамічних та кінетичних властивостей  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  є встановлення природи генерованих енергетичних станів. Показано, що напівпровідниковий твердий розчин  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  є перспективним термоелектричним матеріалом, а за температури  $T \approx 620$  K та концентрації  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  значення добротності досягають максимальних значень  $ZT = 0.62$ . Встановлено, що домішкові атоми V ( $3d34s2$ ), уведений до структури сполуки  $LuNiSb$ , одночасно у різних співвідношеннях займають кристалографічні позиції 4a атомів Lu ( $5d16s2$ ) та 4c атомів Ni ( $3d84s2$ ), генеруючи в забороненій зоні  $eg$  домішкові донорні  $\epsilon_D^V$  та акцепторні  $\epsilon_A^{Ni}$  енергетичні стани. Співвідношення концентрацій донорів та акцепторів визначає розташування рівня Фермі  $\epsilon_F$  та механізми електропровідності.

**Ключові слова:** електронна структура, термоелектрична добротність, електроопір, коефіцієнт термоЕРС.

## Вступ

Одними з найбільш досліджених термоелектричних матеріалів, які мають високу ефективність перетворення теплової енергії в електричну, є напівпровідникові тверді розчини заміщення на основі напівгейслерових фаз, зокрема,  $MNiSn$  ( $M - Ti, Zr, Hf$ ) та  $RNiSb$  ( $R - Y, Gd-Lu$ ) [1, 2], які кристалізуються в структурному типі  $MgAgAs$  (просторова група  $Fm\bar{4}3m$ ) [3]. Моделювання динаміки кристалічної та електронної структур, термодинамічних і кінетичних властивостей напівпровідника  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  дозволить зрозуміти механізм генерації в забороненій зоні  $\epsilon_g$  енергетичних станів, що визначають його властивості. На практиці це реалізується шляхом вибору умов легування: виду і концентрації домішки, способу введення, і режимів гомогенізаційного відпалу. В цьому полягає суть оптимізації значень питомої електропровідності  $\sigma(T)$ , коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$  і теплопровідності  $\kappa(T)$  до значень, які будуть відповідати умовам отримання максимальних значень термоелектричної добротності  $Z$  ( $Z = \alpha^2 \cdot \sigma / \kappa$ ) [2, 4].

Напівпровідникові матеріали, на відміну від металів або металевих сплавів, зручні для оптимізації їх характеристик і отримання максимальних значень термоелектричної добротності. Справа в тому, що в металах і металевих сплавах значення коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$  малі, а зміна значень коефіцієнта теплопровідності  $\kappa(T)$  і питомої електропровідності  $\sigma(T)$  за рахунок сталості числа Лоренца не може суттєво змінити значення термоелектричної добротності  $Z$ . Ось чому оптимізація характеристик відповідним легуванням напівпровідників дозволяє досягти умов, за яких значення термоелектричної добротності  $Z$  будуть максимальними [4].

У зв'язку з цим, надзвичайно важливим є розуміння структурних особливостей базового напівпровідника  $p-LuNiSb$ . Оскільки оптимізація характеристик здійснюється легуванням  $p-LuNiSb$ , то для досягнення максимальної ефективності перетворення теплової енергії в електричну необхідний вибір типу та концентрації домішки при наближенні рівня Фермі  $\epsilon_F$  до зони безперервних енергій [2, 4]. А це неможливо без всебічного знання кристалічної та електронної структур напівпровідника та їх перетворення при легуванні.

Дослідженням структурних, кінетичних і магнітних властивостей сполук напівгейслерових фаз  $RNiSb$  ( $R - Y, Gd-Lu$ ) [5, 6] встановлено, що їх кристалічна структура є неупорядкованою. Крім того, було показано, що сполуки  $RNiSb$  є напівпровідниками, а дірки є основними носіями струму при всіх досліджених температурах. Детальний аналіз кристалічної та електронної структур напівгейслерових фаз  $RNiSb$  дозволив авторам [7] встановити природу неупорядкованості в їх структурі. Показано наявність вакансій ( $V_{ac}$ ) у кристалографічних позиціях  $4a$  атомів рідкоземельних металів і  $4c$  атомів  $Ni$  (рис. 1). У свою чергу, вакансії кристалічної структури  $RNiSb$  є точковими дефектами акцепторної природи, які породжують відповідні акцепторні стани  $\epsilon_A^{Vac}$  у забороненій зоні  $\epsilon_g$  [7]. Тому природа діркової провідності напівгейслерових фаз  $RNiSb$  є зрозумілою, про що свідчать результати кінетичних і гальваномагнітних досліджень [5 – 7].

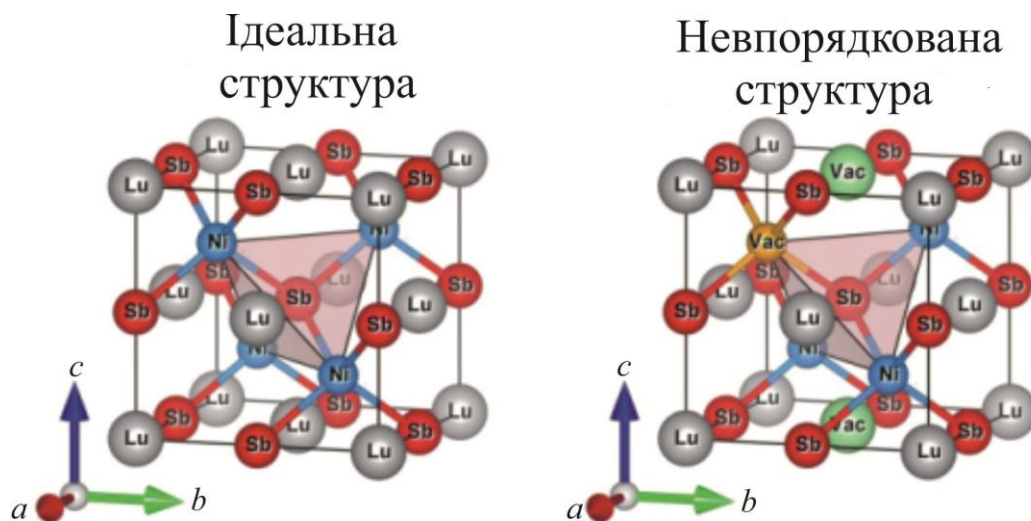


Рис. 1. Моделі кристалічної структури напівгетслерової фази  $LuNiSb$

Попередні дослідження напівпровідникових термоелектричних матеріалів, отриманих легуванням  $p-RNiSb$  ( $R - Er, Tm, Lu$ ) атомами  $Zr$  або  $Sc$  шляхом заміщення атомів рідкоземельних металів у кристалографічній позиції  $4a$  [8 – 14] дозволили зрозуміти механізми генерації енергетичного стану. Так, заміщення атомів  $Er$  ( $5d^06s^2$ ) чи  $Lu$  на атоми  $Zr$  ( $4d^25s^2$ ) або зайняття останніх вакансій у позиції  $4a$  породжує структурні дефекти донорної природи ( $Zr$  має більше  $d$ -електронів, ніж  $Er$  чи  $Lu$ ) [8 – 10]. Одночасно виникають відповідні донорні стани в забороненій зоні  $\varepsilon_g$  напівпровідників  $Er_{1-x}Zr_xNiSb$  або  $Lu_{1-x}Zr_xNiSb$ . У разі заміщення атомів  $R$  на атоми  $Sc$  в позиції  $4a$  в напівпровідниках  $Er_{1-x}Sc_xNiSb$ ,  $Tm_{1-x}Sc_xNiSb$  і  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ , утворюються дефекти нейтральної природи (атоми  $Er, Tm, Lu$  и  $Sc$  знаходяться в одній групі Періодичної системи хімічних елементів) [11–14]. Однак, коли атоми  $Sc$  займають вакансії в позиції  $4a$  [7], зникають дефекти акцепторної природи і відповідні акцепторні стани  $\varepsilon_A^{Vac}$ , і утворюються дефекти донорної природи і донорні стани. У той же час при всіх концентраціях  $Er_{1-x}Sc_xNiSb$ ,  $Tm_{1-x}Sc_xNiSb$  і  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ , носіями струму залишаються дірки, а рівень Фермі  $\varepsilon_F$  лежить поблизу валентної зони  $\varepsilon_V$ .

Першим кроком у дослідженні нрвого напівпровідникового термоелектричного матеріалу  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  є моделювання його властивостей, що є предметом даної роботи. Складність такого моделювання полягає в непередбачуваності поведінки атомів  $V$ . По-перше, атоми  $V$  можуть перебувати в різних валентних станах (від +1 до +5). По-друге, коли атоми  $V$  вводяться в структуру сполуки  $LuNiSb$  шляхом заміщення атомів  $Lu$  в позиції  $4a$ , вони можуть займати інші кристалографічні позиції.

Зрештою, атомний радіус  $V$  ( $r_V = 0.134$  нм) набагато менший, ніж радіус  $Lu$  ( $r_{Lu} = 0.173$  нм) і  $Sb$  ( $r_{Sb} = 0.159$  нм) і близький до атомного радіуса  $Ni$  ( $r_{Ni} = 0.125$  нм). Таким чином, можливі зміни в структурі напівпровідника  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ , пов'язані з зайняттям різних положень атомами  $V$ .

Зокрема, атоми  $V$  здатні займати позицію  $4c$ , займаючи вакансії та/або заміщаючи атоми  $Ni$ . Останнє приведе до генерації структурних дефектів акцепторної природи. Наступні результати моделювання властивостей напівпровідникового твердого розчину  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  вкажуть на перспективність його використання як ефективного термоелектричного матеріалу.

## Методики досліджень

Проведено моделювання термодинамічних, структурних, енергетичних та кінетичних властивостей нового напівпровідникового твердого розчину  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ , отриманого легуванням напівпровідника  $p$ - $LuNiSb$  заміною атомів  $Lu$  на атоми  $V$  у кристалографічній позиції  $4a$ . Розрахунки DFT проводили з використанням Vienna Ab initio Simulation Package VASP v.5.4.4 [15] з потенціалами типу PAW [16]. Використовувався обмінно-кореляційний функціонал Perdew-Burke-Ernzerhof в узагальненому градієнтному наближенні (GGA) Monkhorst-Pack [17] для  $k$ -сітки  $11 \times 11 \times 11$  [18]. У всіх розрахунках обрізка плоскої хвилі була встановлена на рівні 400 eV. Для кристалічних структур змішаного розташування використовувався підхід суперкомірки. У цьому випадку симетрія решітки була зменшена і всі унікальні розподіли атомів були згенеровані за допомогою комбінаторного підходу [19]. Параметри ґратки для таких структур оптимізувалися змінним об'ємом ґратки, який потім вибирався за допомогою універсального рівняння стану [20]. Електронні кінетичні коефіцієнти розраховували за допомогою коду Exciting [21] (FLAPW – повнопотенціального методу лінеаризованих плоских хвиль) шляхом розв'язання лінеаризованого рівняння Больцмана в наближенні постійного часу релаксації [22 – 25]. Моделювання розподілу густини електронних станів (DOS) проводилось за допомогою метода Корінґи-Кона-Ростокера (KKR) (пакет програм AkaiKKR [26]) у наближенні когерентного потенціалу (CPA) та наближенні локальної густини (LDA) для потенціалу кореляції обміну з параметризацією Moruzzi-Janak-Williams (MJW) [27]. Точність розрахунків положення рівня Фермі  $\epsilon_F \pm 6$  meV.

## Моделювання структурних і термодинамічних властивостей $Lu_{1-x}V_xNiSb$

Виходячи з припущення про існування суцільного твердого розчину заміщення  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x = 0-1.0$ , розраховано зміну значень періоду елементарної комірки  $a(x)$  для впорядкованого варіанту кристалічної структури (рис. 2, крива1). При цьому, всі кристалографічні позиції зайняті атомами, що відповідають структурному типу  $MgAgAs$  [1], а атоми  $V$  замінюють атоми  $Lu$  в позиції  $4a$ . Моделювання зміни періоду  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x = 0 - 1.0$  показує монотонне зменшення значень  $a(x)$  (рис. 2, крива 1). Отриманий результат є логічним, оскільки заміщення великих атомів  $Lu$  ( $r_{Lu} = 0.173$  нм) на значно менші атоми  $V$  ( $r_V = 0.134$  нм) у позиції  $4a$  має призвести до зменшення періоду елементарної комірки  $a(x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$ . Такі структурні зміни призведуть до утворення дефектів донорної природи в кристалічній структурі напівпровідника, а в забороненій зоні  $\epsilon_g$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$  генеруватимуться домішкові донорні стани  $\epsilon_D^V$  [28] ( $V$  має більше  $d$ -електронів, ніж  $Lu$ ).

Моделювання термодинамічних характеристик у наближенні гармонійних коливань атомів для гіпотетичного твердого розчину of  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x = 0 - 1.0$ , дозволяє встановити енергетичну можливість існування такого твердого розчину заміщення. Для цього було проведено моделювання зміни значень ентальпії змішування  $\Delta H_{mix}(x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x = 0 - 1.0$  (рис.2, крива 2). Розрахунок показує енергетичну доцільність існування твердого розчину заміщення  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  лише при концентраціях  $x = 0 - 0.10$ . Про це свідчать низькі значення ентальпії змішування  $\Delta H_{mix}(x)$ . При вищих концентраціях  $V$ ,  $x > 0.10$ , відбувається розшарування (розпад спиноїдної фази).

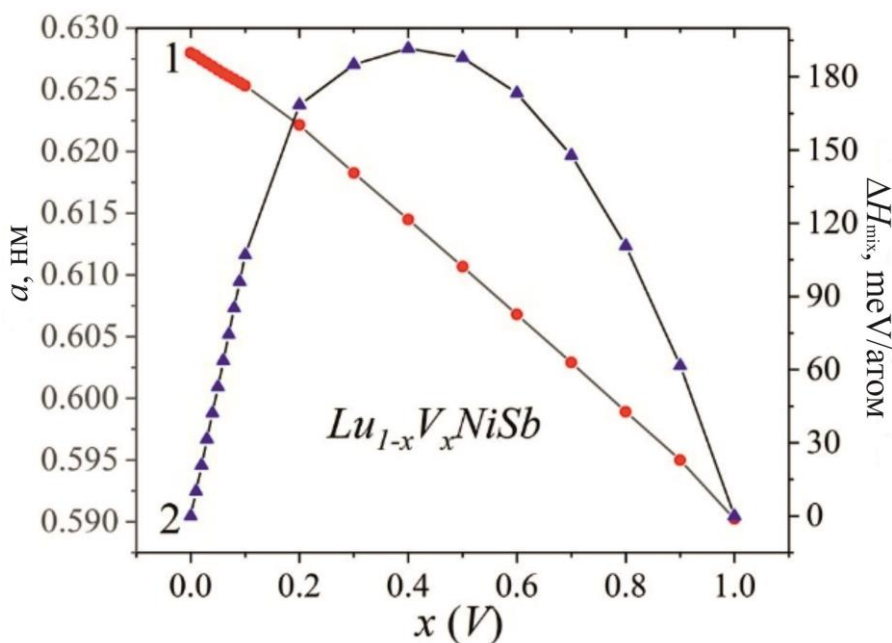
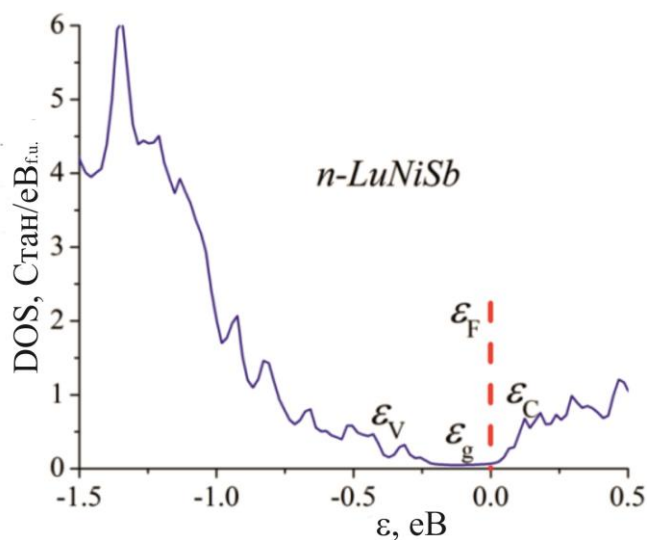


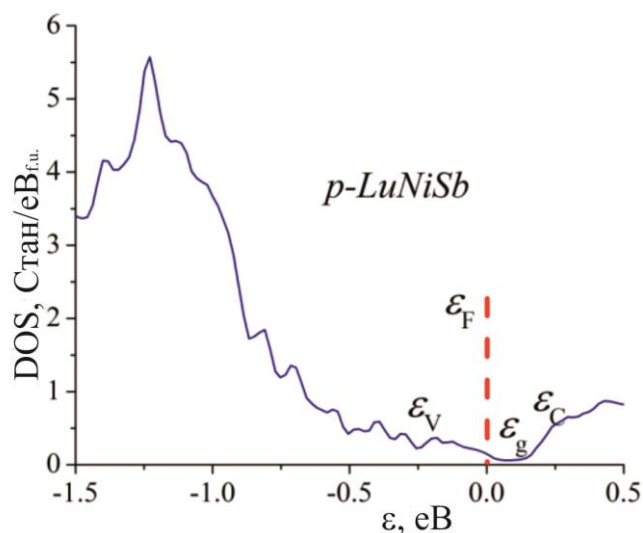
Рис. 2. Моделювання змін в значеннях періоду елементарної комірки  $a(x)$  (1) та ентальпії перемішування  $\Delta H_{mix}(x)$  (2)  $Lu_{1-x}V_xNiSb$

### Моделювання електронної структури $Lu_{1-x}V_xNiSb$

Для прогнозування поведінки рівня Фермі  $\epsilon_F$ , ширини забороненої зони  $\epsilon_g$ , і кінетичних характеристик  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ , спочатку було розраховано розподіл густини електронних станів (DOS) для двох варіантів структури сполуки  $LuNiSb$  (рис. 3). Як видно з рис. 3, результати моделювання діаметрально протилежні. Таким чином, для першого, впорядкованого варіанту структури, коли атоми  $V$  заміщають атоми  $Lu$  в позиції  $4a$  (рис. 3а), моделювання DOS розміщує рівень Фермі  $\epsilon_F$  поблизу зони провідності  $\epsilon_c$ . Це характерно для напівпровідників типу електронної провідності [28]. У випадку невпорядкованої версії структури  $LuNiSb$  (рис. 3б), коли є вакансії (Vac) в позиціях  $4a$  атомів  $Lu$  та  $4c$  атомів  $Ni$  (рис. 1), рівень Фермі  $\epsilon_F$  лежить поблизу валентної зони  $\epsilon_v$ . У цьому випадку моделювання DOS відповідає дірковим напівпровідникам [28].



а)



б)

Рис. 3. Розрахунок розподілу густини DOS електронних станів для впорядкованого (а) та невпорядкованого (б) варіантів структури сполуки  $LuNiSb$

Оскільки заміщення атомів  $Lu$  на атоми  $V$  породжує структурні дефекти донорної природи, а в забороненій зоні  $\epsilon_g$  напівпровідника  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  поблизу зони провідності  $\epsilon_C$ , виникають донорні стани  $\epsilon_D^V$ , які утворюють донорну зону, то вже при  $Lu_{0.99}V_{0.01}iSb$ , рівень Фермі  $\epsilon_F$  наблизиться до краю зони провідності  $\epsilon_C$  (рис. 4). При вищих концентраціях атомів  $V$ , концентрація донорних станів  $\epsilon_D^V$  і потужність донорної зони зростуть, і рівень Фермі  $\epsilon_F$  наблизиться, а згодом і перетне зону провідності  $\epsilon_C$ : відбудеться перехід провідності діелектрик-метал, який є переходом Андерсона [28]. Наближення рівня Фермі  $\epsilon_F$  до зони провідності  $\epsilon_C$



також призведе до зміни знака коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$  з позитивного (для  $p$ - $LuNiSb$ ) на негативний, а основними носіями струму  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  стануть електрони. Крім того, перетин рівня Фермі  $\epsilon_F$  і краю зони провідності  $\epsilon_C$  призведе до зміни типу провідності напівпровідника з активаційної (для  $p$ - $LuNiSb$ ) на металеву [28]: в експерименті на температурних залежностях питомого опору  $\ln(\rho(1/T))$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$  зникнуть зони активації, а значення опору  $\rho$  збільшаться з температурою.

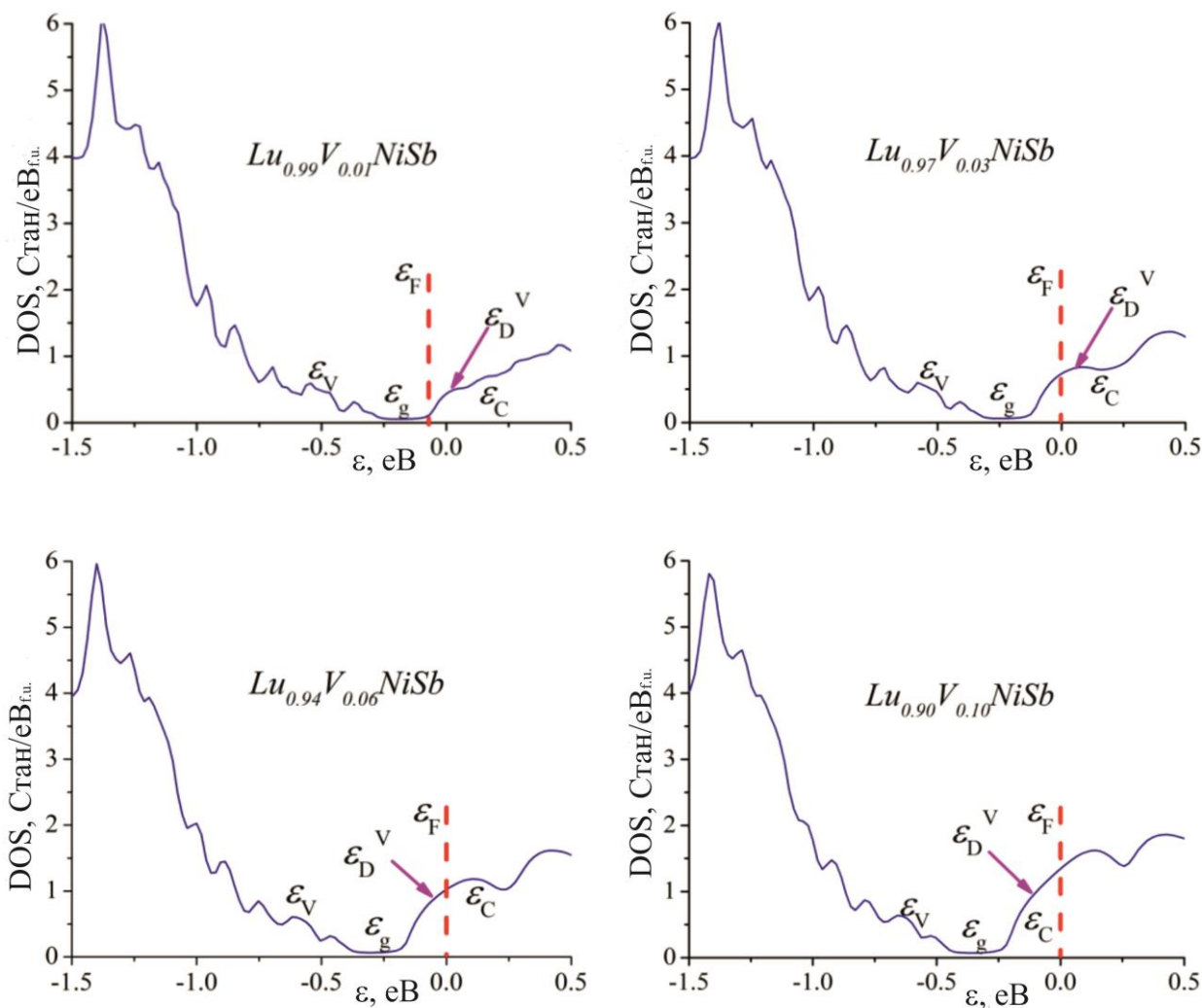


Рис. 4. Розрахунок розподілу густини електронних станів DOS  $Lu_{1-x}V_xNiSb$

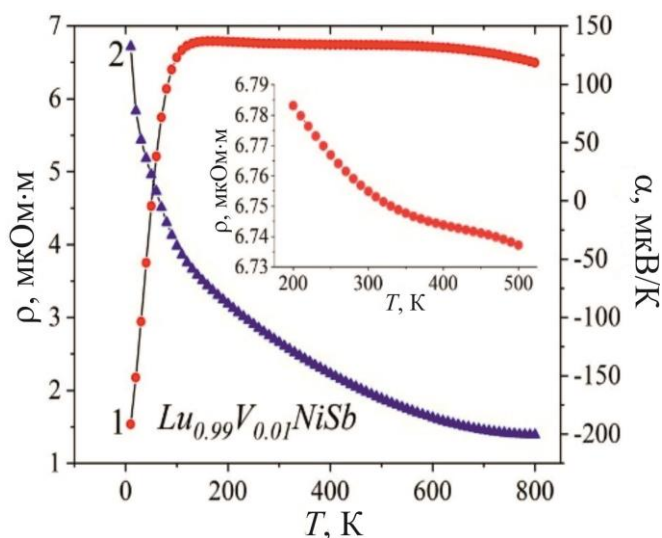
### Моделювання електрокінетичних властивостей $Lu_{1-x}V_xNiSb$

На Рис.5 наведено результати моделювання температурних залежностей питомого опору  $\rho(T, x)$  і коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x \leq 0.10$ . Результат розрахунку температурних залежностей  $\rho(T)$  і  $\alpha(T)$  для  $p$ - $LuNiSb$  збігається з отриманим раніше [2, 8, 9] і демонструє зменшення значень опору при активації дірок із акцепторних станів  $\epsilon_A^{vac}$  у валентну зону  $\epsilon_V$ .

Водночас дірки є основними носіями струму, про що свідчать додатні значення коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$ . Така поведінка електричного опору  $\rho(T)$  характерна для напівпровідників, коли кількість вільних носіїв струму збільшується за рахунок їх термічної активації від рівня Фермі  $\varepsilon_F$  до зони безперервної енергії [28].

Легування  $p$ - $LuNiSb$  атомами  $V$  шляхом заміщення атомів  $Lu$  в позиції  $4a$  генерує структурні дефекти донорної природи в напівпровіднику  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ , і відповідні донорні стани  $\varepsilon_D^V$  виникають у забороненій зоні  $\varepsilon_g$ . Як видно з рис. 5, при найменшій концентрації домішки ( $x = 0.01$ ) в інтервалі температур  $T = 10 - 170$  К, значення питомого електричного опору  $\rho(T)$  у напівпровіднику  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  зростають. При цьому, основними носіями струму, як і у випадку  $p$ - $LuNiSb$ , є дірки, про що свідчать додатні значення коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$ .

Таке збільшення значень електричного опору  $\rho(T)$  не є проявом металевої провідності, коли збільшення опору пов'язане з дією механізмів розсіювання носіїв струму. У випадку напівпровідника  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$ , збільшення значень питомого електричного опору  $\rho(T)$  за температур  $T = 10 - 170$  К має концентраційний характер. Адже базовий напівпровідник  $p$ - $LuNiSb$  містить акцепторні стани  $\varepsilon_A^{vac}$ , які в  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  з підвищенням температури захоплюють електрони з генерованих лонорних станів  $\varepsilon_D^V$ , що зменшує концентрацію вільних дірок і підвищує ступінь компенсації та значення електричного опору  $\rho(T)$ . У той же час рівень Фермі  $\varepsilon_F$  дрейфує від краю валентної зони  $\varepsilon_V$  до середини забороненої зони  $\varepsilon_g$ , яку він перетне при температурі  $T \approx 65$  К. При більш високих температурах  $T > 65$  К, знак коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$   $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  стає негативним, рівень Фермі  $\varepsilon_F$  тепер дрейфує в зону провідності  $\varepsilon_C$ . Екстремум на залежності питомого опору  $\rho(T)$   $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  за температури  $T \approx 170$  К і подальше зменшення електроопору (рис. 5, вставка) також має концентраційний характер. Усі акцепторні стани скомпенсовані, але рівень Фермі  $\varepsilon_F$  лежить у забороненій зоні  $\varepsilon_g$  біля краю зони провідності  $\varepsilon_C$ , а концентрація вільних електронів зростає під час іонізації донорних станів  $\varepsilon_D^V$ .



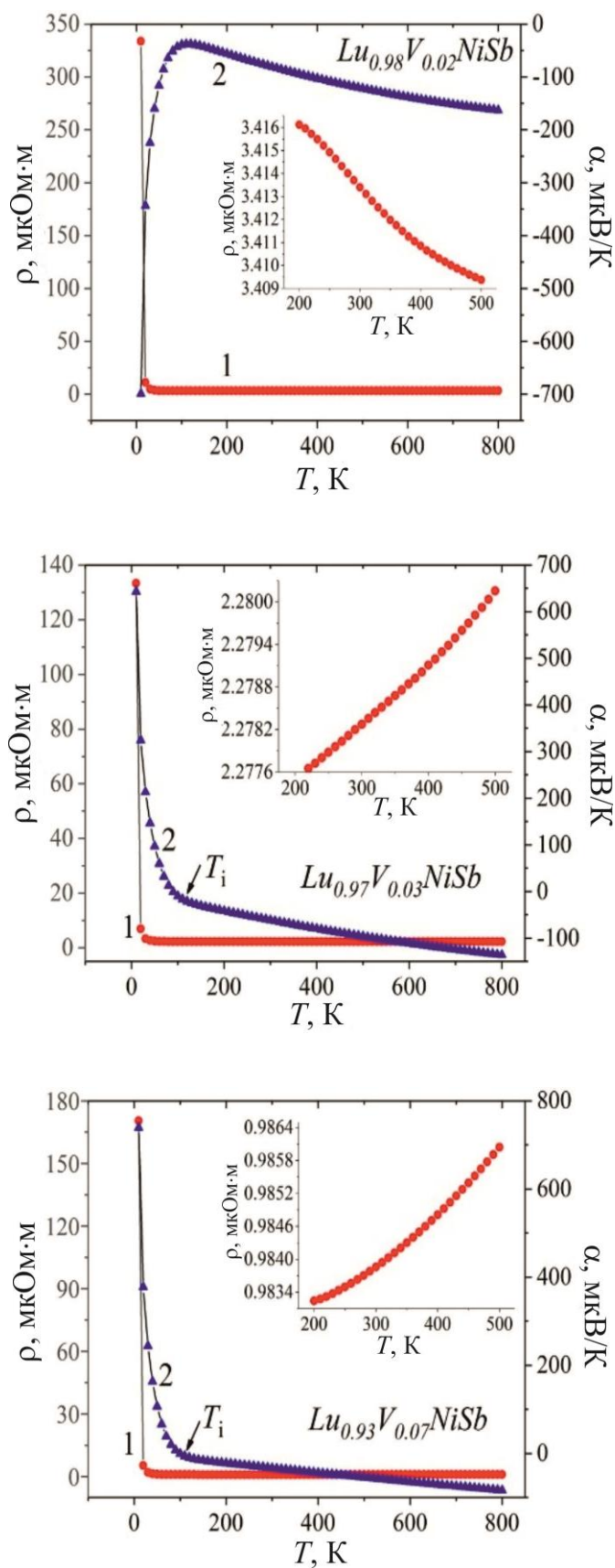


Рис. 5. Моделювання зміни значень питомого електричного опору  $\rho(T,x)$  (1) і коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T,x)$  (2)  $Lu_{1-x}V_xNiSb$

У напівпровіднику  $Lu_{0.98}V_{0.02}NiSb$  температурна залежність питомого опору  $\rho(T, x)$  при низьких температурах не включає область зростання значень опору, яка була в  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  і пов'язана зі зменшенням концентрації дірок при компенсації акцепторних станів  $\varepsilon_A^{Vac}$  електронами іонізованих донорних станів  $\varepsilon_D^V$ . Моделювання показує лише швидке зменшення значень питомого опору  $\rho(T, x)$  від  $\rho_{10\text{ К}} = 333.7$  мкОм·м до значень  $\rho_{20\text{ К}} = 11.2$  мкОм·м та  $\rho_{30\text{ К}} = 4.9$  мкОм·м. Водночас знак коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$   $Lu_{0.98}V_{0.02}NiSb$  залишається від'ємним за всіх досліджуваних температур. Така поведінка температурних залежностей  $\rho(T, x)$  і  $\alpha(T, x)$   $Lu_{0.98}V_{0.02}NiSb$  свідчить про те, що всі акцепторні стани  $\varepsilon_A^{Vac}$  компенсовані, рівень Фермі  $\varepsilon_F$  фіксується при донорних станах  $\varepsilon_D^V$  і знаходиться в забороненій зоні  $\varepsilon_g$  біля крайових зон провідності  $\varepsilon_c$ .

Результати моделювання кінетичних характеристик  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  при вищих концентраціях домішки  $V$ ,  $x \geq 0.03$ , вказують на появу в напівпровіднику значної кількості структурних дефектів акцепторної природи. Про це свідчать позитивні значення коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$  при температурах  $T \leq 90$  К у напівпровіднику  $Lu_{0.97}V_{0.03}NiSb$  і  $T \leq 100$  К у напівпровіднику  $Lu_{0.93}V_{0.07}NiSb$  (рис. 5). Вище ми зазначали, що атоми  $V$  ( $3d^34s^2$ ) можуть займати різні кристалографічні позиції в  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ , зокрема позицію  $4c$  атомів  $Ni$  ( $3d^84s^2$ ). Останнє призведе до генерації структурних дефектів акцепторної природи ( $V$  має менше  $3d$ -електронів, ніж  $Ni$ ) і появи в забороненій зоні домішкових акцепторних станів  $\varepsilon_A^N$ . При цих температурах основними носіями струму є дірки.

При вищих температурах  $T > T_i$ , знак коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$  змінюється з позитивного на негативний (рис. 5), і основними носіями струму стають електрони. Той факт, що інверсія знака коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$  відбувається при температурах  $T_i > 90 - 100$  К свідчить про те, що в забороненій зоні  $\varepsilon_g$  напівпровідника глибина донорних станів  $\varepsilon_D^V$  відносно краю зони провідності  $\varepsilon_c$  більша, ніж у акцепторних станів  $\varepsilon_A^{Ni}$  відносно краю валентної зони  $\varepsilon_v$ . Тому при низьких температурах спочатку іонізуються акцептори, а при вищих,  $T > T_i$ , донори. Така зміна знака коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T, x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$  (типу основних носіїв струму) показує, що за концентрацій атомів  $V$ ,  $x \geq 0.03$ , кількість структурних дефектів донорної природи переважає над кількістю дефектів акцепторної природи.

Моделювання температурних залежностей питомого електричного опору  $\rho(T, x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x \geq 0.03$ , показує, що в напівпровіднику  $Lu_{0.97}V_{0.03}NiSb$ , значення опору зменшуються в інтервалі температур  $T = 10 - 160$  К, а зростають лише при вищих температурах (рис. 5, вставка). У випадку напівпровідника  $Lu_{0.93}V_{0.07}NiSb$ , зменшення значень питомого опору  $\rho(T, x)$  відбувається при температурах  $T = 10 - 110$  К, після чого опір зростає. Така поведінка  $\rho(T, x)$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x \geq 0.03$ , показує, що при низьких температурах рівень Фермі  $\varepsilon_F$  знаходиться в забороненій зоні  $\varepsilon_g$  напівпровідника, а при вищих температурах перетинає край зони провідності  $\varepsilon_c$  і рухається вздовж смуги безперервних енергій. Відбудеться перехід провідності діелектрик-метал, який є переходом Андерсена [28]. У разі проведення експериментальних вимірювань температурної залежності питомого електричного опору  $\ln(\rho(1/T))$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$

високотемпературних ділянок активації не буде, а значення опору  $\rho$  зростатимуть із підвищенням температури.

### Моделювання термоелектричних характеристик $Lu_{1-x}V_xNiSb$

Вичерпною характеристикою термоелектричного матеріалу з точки зору ефективності перетворення теплової енергії в електричну є значення термоелектричного коефіцієнта при різних температурах. На Рис.6 наведено результати моделювання  $ZT$  в інтервалі температур  $T = 10 - 800$  К для твердого розчину напівпровідника  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x \leq 0.10$ . Зазначимо, що при моделюванні значень термоелектричної добротності  $Z$  враховували електронну складову теплопровідності  $\kappa_e$ .

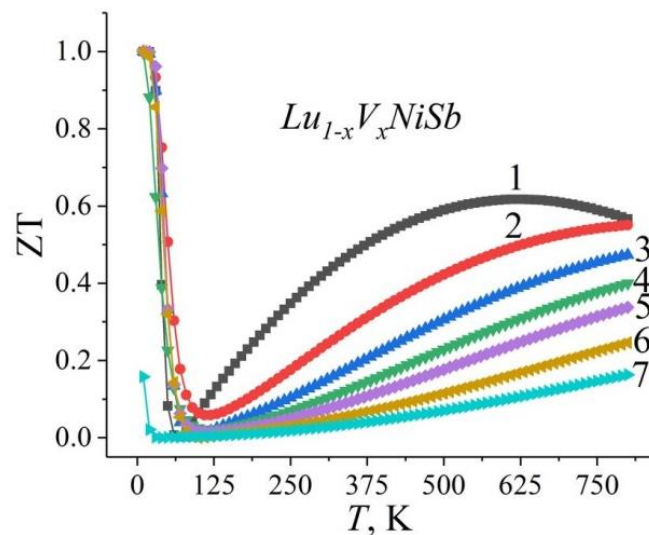


Рис. 6. Моделювання зміни значень  $ZT$   $Lu_{1-x}V_xNiSb$  при підвищенні температури:

1 –  $x=0,01$ ; 2 –  $x=0,02$ ; 3 –  $x=0,03$ ;  
4 –  $x=0,04$ ; 5 –  $x=0,05$ ; 6 –  $x=0,07$ ; 7 –  $x=0,10$

З рис. 6 видно, що в твердому розчині напівпровідника  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$  при температурі  $T \approx 620$  К, значення термоелектричної добротності  $Z$  максимальні і досягають  $ZT = 0.62$ . Отримані за допомогою математичного моделювання значення термоелектричної добротності для  $Lu_{1-x}V_xNiSb$ ,  $x \leq 0.10$ , свідчать про перспективність отриманого твердого розчину напівпровідника як термоелектричного матеріалу.

### Висновки

Результатом моделювання кристалічної та електронної структур, термодинамічних і кінетичних властивостей з  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  є встановлення природи генерованих енергетичних станів.

Показано, що напівпровідниковий твердий розчин  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  є перспективним термоелектричним матеріалом, причому при температурі  $T \approx 620$  К і концентрації  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$ , значення термоелектричної добротності  $Z$  максимальні і досягають  $ZT = 0.62$ . Встановлено, що домішкові атоми  $V$  ( $3d^34s^2$ ), введені в структуру сполуки  $LuNiSb$ , одночасно займають кристалографічні позиції  $4a$  атомів  $Lu$  ( $5d^16s^2$ ) і  $4c$  атомів  $Ni$  ( $3d^84s^2$ ) у різних співвідношеннях, генеруючи в забороненій зоні  $\varepsilon_g$  домішковий донорний  $\varepsilon_D^V$  і акцепторний  $\varepsilon_A^{Ni}$  енергетичні стани. Співвідношення концентрацій донорів і акцепторів визначає розташування рівня Фермі  $\varepsilon_F$  і механізми електропровідності.

## Література

1. Romaka V.V., Rogl P.F., Carlini R., Fanciulli C. (2017). Prediction of the Thermoelectric Properties of Half-Heusler Phases from the Density Functional Theory. – P. 286-323. In “Alloys and Intermetallic Compounds. From Modeling to Engineering”. Genova, Italy: CRC Press Taylor & Francis Group. International Standard Book Number–13: 978–1–4987–4143–9.
2. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Krayovskyy V.Ya., Romaka L.P., Guk O.P., Romaka V.V., Mykyuchuk M.M., Horyn A.M. (2020). *Novitni termochutlyvi materialy ta peretvoriuvachi temperatury [New thermosensitive materials and temperature converters]*. Lviv: Lvivska Polytechnika [in Ukrainian]. DOI: <https://opac.lpnu.ua/bib/1131184>.
3. Hartjes K., Jeitschko W. (1995). Crystal structure and magnetic properties of the lanthanoid nickel antimonides  $LnNiSb$  ( $Ln=La-Nd, Sm, Gd-Tm, Lu$ ). *J. Alloys Compd.*, 226, 81-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01573-6](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01573-6).
4. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelectricheskiie ustroistva. Spravochnik. [Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
5. Karla I., Pierre J., Skolozdra R.V. (1998). Physical properties and giant magnetoresistance in  $RNiSb$  compounds. *J. Alloys Compd.*, 265, 42–48. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00419-2).
6. Romaka V.V., Romaka L., Horyn A., Rogl P., Stadnyk Yu., Melnychenko N., Orlovskyy M., Krayovskyy V. (2016). Peculiarities of thermoelectric half-Heusler phase formation in  $Gd-Ni-Sb$  and  $Lu-Ni-Sb$  ternary systems. *J. Solid State Chem.*, 239, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.04.029>.
7. Romaka V.V., Romaka L., Horyn A., Stadnyk Yu. (2021). Experimental and theoretical investigation of the  $Y-Ni-Sb$  and  $Tm-Ni-Sb$  systems. *J. Alloys Compd.*, 855, 157334–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157334>.
8. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka L.P., Pashkevych V.Z., Romaka V.V., Horyn A.M., Demchenko P.Yu. (2021). Study of structural, thermodynamic, energy, kinetic and magnetic properties of thermoelectric material  $Lu_{1-x}Zr_xNiSb$ . *J. Thermoelectricity*, 1, 32-48. DOI: [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2021\\_01\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2021_01_en.pdf).
9. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Horyn A., Pashkevych V., Nychporuk H., Garanyuk P. (2022). Investigation of Thermoelectric Material Based on  $Lu_{1-x}Zr_xNiSb$  Solid Solution.

10. I. Experimental Results. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 23, 235-241. DOI: 10.15330/pcss.23.2.235-241.
11. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Krayovskyy V., Horyn A., Klyzub P., Pashkevych V. (2020). Study of structural, electrokinetic and magnetic characteristics of the  $Er_{1-x}Zr_xNiSb$  Semiconductor. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 21, 689-694. DOI: 10.15330/pcss.21.4.689-694.
12. Wolańska I., Synoradzki K., Ciesielski K., Załęski K., Skokowski P., Kaczorowski D. (2019). Enhanced thermoelectric power factor of half-Heusler solid solution  $Sc_{1-x}Tm_xNiSb$  prepared by high-pressure hightemperature sintering method. *Materials Chemistry and Physics*, 227, 29–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.01.056>.
13. Romaka V.V., Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka L.P., Demchenko P.Y., Pashkevych V.Z., Horyn A.M. (2022). Features of mechanisms of electrical conductivity in semiconductive solid solution  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ . *Ukr. J. Phys.*, 67, 370-379. DOI: <https://doi.org/10.15407/ujpe67.5.370>.
14. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka V.V., Demchenko P.Yu., Romaka L.P., Pashkevych V.Z., Horyn A.M., Horpeniuk A.Ya. (2021). Investigation of properties of new thermoelectric material  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ . *J. Thermoelectricity*, 2, 18–30. DOI: [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2021\\_02\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2021_02_en.pdf).
15. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Krayovskyy V., Klyzub P., Pashkevych V., Horyn A., Garanyuk P. (2021). Synthesis and Electrical Transport Properties of  $Er_{1-x}Sc_xNiSb$  Semiconducting Solid Solution. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 22, 146–152. DOI:10.15330/pcss.22.1.146-152.
16. Kresse G., Hafner J. (1993). Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev.*, B 47, 558–561.
17. Kresse G., Joubert D. (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev.*, B 59, 1758–1775.
18. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. (1976). Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, 77(18), 3865–8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>.
19. Monkhorst H.J., Pack J.K. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev.*, B 13, 5188–5192.
20. Okhotnikov K., Charpentier T., Cadars S. (2016). Supercell program: a combinatorial structure-generation approach for the local-level modeling of atomic substitutions and partial occupancies in crystals. *J. Cheminform*, 8(17), 1–15.
21. Vinet P., Rose J.H., Jr Ferrante J.S. (1989). Universal features of the equation of state of solids. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 1, 1941–1964.
22. Gulans A., Kontur S., Meisenbichler C., Nabok D., Pavone P., Rigamonti S., Sagmeister S., Werner U., Draxl C. (2014). Exciting – a full-potential all-electron package implementing density-functional theory and many-body perturbation theory. *J. Phys.: Condens Matter.*, 26, 363202, 1–24.
23. Nag B.R. (1996). *Electron Transport in Compound Semiconductors*. Berlin: Springer Verlag.
24. Mahan G.D. and Sofo J.O. (1996). The best thermoelectric. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93 7436.
25. Scheidemantel T.J., Ambrosch-Draxl C., Thonhauser T., Badding H.V., and Sofo J.O. (2003). Transport coefficients from first-principles calculations. *Phys. Rev.*, B 68, 125210.
26. Babak V.P., Babak S.V., Myslovykh M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2020). Technical provision of diagnostic systems *Studies in Systems, Decision and Control*, 281, 91–133.

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_4)

27. Schruter M., Ebert H., Akai H., Entel P., Hoffmann E., Reddy G.G. (1995). First-principles investigations of atomic disorder effects on magnetic and structural instabilities in transition-metal alloys. *Phys. Rev. B* 52, 188–209
28. Moruzzi V.L., Janak J.F., Williams A.R. (1978). *Calculated Electronic Properties of Metals*. NY: Pergamon Press.
29. Shklovskii B.I. and Efros A.L. (1984). *Electronic properties of doped semiconductors*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-662-02403-4.

Надійшли до редакції: 15.02.2022

**V.A.Romaka**, *doc. techn sciences,*  
*cand phis.-mat. science, professor*<sup>1</sup>  
**Yu.V. Stadnyk**, *cand. chem. of science*<sup>2</sup>  
**L.P. Romaka**, *cand. chem. of science*<sup>2</sup>  
**Yu.O. Plevachuk**, *cand. chem. of science*<sup>2</sup>  
**V.V. Romaka**, *doc. techn sciences,*  
*cand. chem. of science*<sup>3</sup>  
**A.M. Horyn**, *cand. chem. of science*<sup>2</sup>  
**V.Z. Pashkevych**, *cand. tehn. of science*<sup>1</sup>  
**A.V. Zelinskiy**, *cand. chem. of science*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University “Lvivska Politechnika”,  
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine;  
*e-mail: vromaka@polynet.lviv.ua;*

<sup>2</sup>Ivan Franko National University of Lviv,  
6, Kyryla and Mefodiya Str., Lviv, 79005, Ukraine;  
*e-mail: lyubov.romaka@lnu.edu.ua*

<sup>3</sup>Leibniz Institute for Solid State and Materials Research,  
IFW-Dresden, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden, Germany;  
*e-mail: vromakal@gmail.com*

**RESEARCH OF THE THERMOELECTRIC MATERIAL**  
 **$Lu_{1-x}V_xNiSb$ : MODELING OF PROPERTIES**



The result of modeling the crystal and electronic structures, thermodynamic and kinetic properties of  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  is establishing the nature of the generated energy states. It is shown that the semiconductor solid solution  $Lu_{1-x}V_xNiSb$  is a promising thermoelectric material, and at a temperature of  $T \approx 620$  K and a concentration of  $Lu_{0.99}V_{0.01}NiSb$ , the thermoelectric factor  $Z$  values reach the maximum values of  $ZT = 0.62$ . It was established that the impurity atoms of V ( $3d^34s^2$ ), introduced into the structure of the  $LuNiSb$  compound, simultaneously occupy the crystallographic positions 4a of Lu atoms ( $5d^16s^2$ ) and 4c of Ni atoms ( $3d^84s^2$ ) in different ratios, generating in the band gap  $\varepsilon_g$  impurity donor  $\varepsilon_D^V$  and acceptor  $\varepsilon_A^{Ni}$  energy states. The ratio of concentrations of donors and acceptors determines the location of the Fermi level  $\varepsilon_F$  and the mechanisms of electrical conductivity.

**Keywords:** electronic structure, figure of merit of thermoelectric material, resistivity, thermopower coefficient.

## References

1. Romaka V.V., Rogl P.F., Carlini R., Fanciulli C. (2017). Prediction of the Thermoelectric Properties of Half-Heusler Phases from the Density Functional Theory. – P. 286-323. In “*Alloys and Intermetallic Compounds. From Modeling to Engineering*”. Genova, Italy: CRC Press Taylor & Francis Group. International Standard Book Number–13: 978–1–4987–4143–9.
2. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Krayovskyy V.Ya., Romaka L.P., Guk O.P., Romaka V.V., Mykyuchuk M.M., Horyn A.M. (2020). *Novitni termochutlyvi materialy ta peretvoriuvachi temperatury [New thermosensitive materials and temperature converters]*. Lviv: Lvivska Polytechnika [in Ukrainian]. DOI: <https://opac.lpnu.ua/bib/1131184>.
3. Hartjes K., Jeitschko W. (1995). Crystal structure and magnetic properties of the lanthanoid nickel antimonides  $LnNiSb$  ( $Ln=La-Nd, Sm, Gd-Tm, Lu$ ). *J. Alloys Compd.*, 226, 81-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01573-6](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01573-6).
4. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelectricheskie ustroystva. Spravochnik. [Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
5. Karla I., Pierre J., Skolozdra R.V. (1998). Physical properties and giant magnetoresistance in  $RNiSb$  compounds. *J. Alloys Compd.*, 265, 42–48. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00419-2).
6. Romaka V.V., Romaka L., Horyn A., Rogl P., Stadnyk Yu., Melnychenko N., Orlovskyy M., Krayovskyy V. (2016). Peculiarities of thermoelectric half-Heusler phase formation in  $Gd-Ni-Sb$  and  $Lu-Ni-Sb$  ternary systems. *J. Solid State Chem.*, 239, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.04.029>.
7. Romaka V.V., Romaka L., Horyn A., Stadnyk Yu. (2021). Experimental and theoretical investigation of the  $Y-Ni-Sb$  and  $Tm-Ni-Sb$  systems. *J. Alloys Compd.*, 855, 157334–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157334>.
8. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka L.P., Pashkevych V.Z., Romaka V.V., Horyn A.M., Demchenko P.Yu. (2021). Study of structural, thermodynamic, energy, kinetic and magnetic properties of thermoelectric material  $Lu_{1-x}Zr_xNiSb$ . *J. Thermoelectricity*, 1, 32-48. DOI: [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2021\\_01\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2021_01_en.pdf).

9. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Horyn A., Pashkevych V., Nychporuk H., Garanyuk P. (2022). Investigation of Thermoelectric Material Based on  $Lu_{1-x}Zr_xNiSb$  Solid Solution. I. Experimental Results. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 23, 235-241. DOI: 10.15330/pcss.23.2.235-241.
10. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Krayovskyy V., Horyn A., Klyzub P., Pashkevych V. (2020). Study of structural, electrokinetic and magnetic characteristics of the  $Er_{1-x}Zr_xNiSb$  Semiconductor. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 21, 689-694. DOI: 10.15330/pcss.21.4.689-694.
11. Wolańska I., Synoradzki K., Ciesielski K., Załęski K., Skokowski P., Kaczorowski D. (2019). Enhanced thermoelectric power factor of half-Heusler solid solution  $Sc_{1-x}Tm_xNiSb$  prepared by high-pressure hightemperature sintering method. *Materials Chemistry and Physics*, 227, 29–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.01.056>.
12. Romaka V.V., Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka L.P., Demchenko P.Y., Pashkevych V.Z., Horyn A.M. (2022). Features of mechanisms of electrical conductivity in semiconductive solid solution  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ . *Ukr. J. Phys.*, 67, 370-379. DOI: <https://doi.org/10.15407/ujpe67.5.370>.
13. Romaka V.A., Stadnyk Yu.V., Romaka V.V., Demchenko P.Yu., Romaka L.P., Pashkevych V.Z., Horyn A.M., Horpeniuk A.Ya. (2021). Investigation of properties of new thermoelectric material  $Lu_{1-x}Sc_xNiSb$ . *J. Thermoelectricity*, 2, 18–30. DOI: [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2021\\_02\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2021_02_en.pdf).
14. Romaka V.A., Stadnyk Yu., Romaka L., Krayovskyy V., Klyzub P., Pashkevych V., Horyn A., Garanyuk P. (2021). Synthesis and Electrical Transport Properties of  $Er_{1-x}Sc_xNiSb$  Semiconducting Solid Solution. *J. Phys. Chem. Sol. State*, 22, 146–152. DOI: 10.15330/pcss.22.1.146-152.
15. Kresse G., Hafner J. (1993). Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev.*, B 47, 558–561.
16. Kresse G., Joubert D. (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev.*, B 59, 1758–1775.
17. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. (1976). Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, 77(18), 3865–8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>.
18. Monkhorst H.J., Pack J.K. (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev.*, B 13, 5188–5192.
19. Okhotnikov K., Charpentier T., Cadars S. (2016). Supercell program: a combinatorial structure-generation approach for the local-level modeling of atomic substitutions and partial occupancies in crystals. *J. Cheminform*, 8(17), 1–15.
20. Vinet P., Rose J.H., Jr Ferrante J.S. (1989). Universal features of the equation of state of solids. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 1, 1941–1964.
21. Gulans A., Kontur S., Meisenbichler C., Nabok D., Pavone P., Rigamonti S., Sagmeister S., Werner U., Draxl C. (2014). Exciting – a full-potential all-electron package implementing density-functional theory and many-body perturbation theory. *J. Phys.: Condens Matter.*, 26, 363202, 1–24.
22. Nag B.R. (1996). *Electron Transport in Compound Semiconductors*. Berlin: Springer Verlag.
23. Mahan G.D. and Sofo J.O. (1996). The best thermoelectric. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93 7436.
24. Scheidemantel T.J., Ambrosch-Draxl C., Thonhauser T., Badding H.V., and Sofo J.O. (2003). Transport coefficients from first-principles calculations. *Phys. Rev.*, B 68, 125210.
25. Babak V.P., Babak S.V., Myslovykh M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2020). Technical provision of diagnostic systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 281, 91–133. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_4)

- 26.Schruter M., Ebert H., Akai H., Entel P., Hoffmann E., Reddy G.G. (1995). First-principles investigations of atomic disorder effects on magnetic and structural instabilities in transition-metal alloys. *Phys. Rev. B* 52, 188–209
- 27.Moruzzi V.L., Janak J.F., Williams A.R. (1978). *Calculated Electronic Properties of Metals*. NY: Pergamon Press.
- 28.Shklovskii B.I. and Efros A.L. (1984). *Electronic properties of doped semiconductors*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-662-02403-4.

Submitted: 15.02.2022

УДК 53.082

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Черкез Р.Г. докт. фіз-мат. наук, професор<sup>1,2</sup>  
Порубаний О.М.<sup>2</sup>, Жукова О.С.<sup>2</sup>

<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

## ВПЛИВ ТОВЩИНИ ВІТКИ ТА ШВИДКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОНИКНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО ТЕРМОЕЛЕМЕНТА

---

*В роботі представлені результати комп'ютерних досліджень по впливу товщини вітки та швидкості прокачки газу для 3D моделі проникного генераторного термоелемента на ЕРС та ККД. Розраховано залежності енергетичних характеристик термоелемента з матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb.*

**Ключові слова:** проникний термоелемент, комп'ютерне моделювання, генерація електричної енергії, енергетичні характеристики.

### Вступ

Найбільш широке застосування термоелектричних перетворювачів енергії засновано на використанні термопарного елемента [1, 2]. Ефективність перетворення енергії якого визначається параметром добротності використаних матеріалів  $Z$ . Тому, пошук матеріалів з максимальним значенням параметра добротності стає основною задачею термоелектричного матеріалознавства. Однак, незважаючи на інтенсивні дослідження, в цьому напрямку, суттєвого зростання добротності за останні 20-30 років не спостерігається [3, 4]. Максимальні значення безрозмірного параметру добротності термоелектричних матеріалів промислового використання залишаються на рівні  $1 \div 1.2$ . Отже, для покращення ефективності необхідно використання нових, нетрадиційних підходів які полягають у використанні інших нетрадиційних варіантів фізичних моделей термоелементів, що є основною складовою термоелектричного перетворювача енергії.

Одним із них є використання термоелементів із розвиненою внутрішньою поверхнею теплообміну – проникних термоелементів. В таких термоелементах теплообмін з джерелом та стоком тепла відбувається не тільки на спаях, а й в об'ємі вітки. Вже перші теоретичні [5] та експериментальні [6] дослідження для охолодження потоків газів показали на їх перспективність. Вони вказують на можливість покращення ефективності перетворення енергії в  $1.3 \div 1.4$  рази.

Однак, такі дослідження були проведені для моделі яка складна для практичної реалізації. Тому, необхідно створення та дослідження більш реальної 3D моделі проникного термоелемента, що є метою даної роботи.

### Фізична модель та її математичний опис

Фізичну модель проникного термоелемента, у якого теплообмін з теплоносієм відбувається не тільки через комутаційні пластини, а й з бічними поверхнями вітки, наведено на рис. 1. Вона включає вітки  $n$  – та  $p$  – типу провідності (2, 10) охоплені адіабатичною ізоляцією 1 та 8, які разом утворюють канали 5, 6, 9. Через канал 6 подається теплоносієм 7 з температурою  $T_h$  який перетікає через канали 3, 5 та 5, 9. Вітки виконані з однорідного матеріалу на основі  $Bi-Te$  з максимальним значенням добротності  $Z$  в інтервалі температур  $20 \div 320$  °С. Температурну залежність параметрів матеріалу слід врахувати. Комутаційні пластини  $c$  виконані з міді, комутаційний опір –  $10^{-6}$  Ом  $см^2$ . Температура  $T_0$  нижніх комутаційних пластин термостатовано. Вітки  $n$  – та  $p$  – типу провідності з'єднані між собою тонким прошарком 14, теплопровідністю, електропровідністю та товщиною яких нехтуємо. Матеріал віток є однорідним і ізотропним з відомими температурними залежностями: електропровідності  $\sigma(T)$ , коефіцієнта термоЕРС  $\alpha(T)$ , теплопровідності  $\kappa(T)$ . В термоелектричному середовищі враховані об'ємні ефекти Трмсона, Джоуля-Ленса та приконтактного ефекту Пельте. Температура теплоносія на вході в термоелемент приймалась рівній температурі гарячих спаїв. Розмір термоелементу в напрямі, перпендикулярному до площини рисунка –  $d$ , величина  $d = a$ . Площина  $d = 0$  і  $d = a$  є адіабатичними ізоляціями, що формують канали 5, 6, 9, Тертя між теплоносієм та адіабатичними ізоляціями 1, 8 відсутнє.

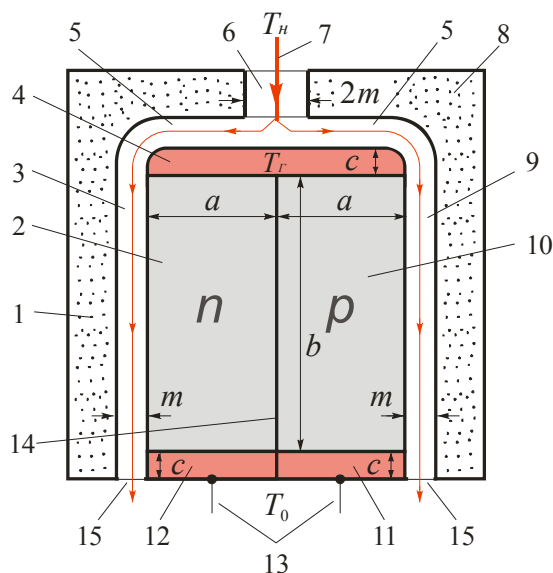


Рис. 1. Фізична модель проникного термоелемента: 1 – адіабатична ізоляція, 2 – вітки  $n$ -типу, 3 – канали, 4 – комутаційна пластина, 5 – канал, 6 – канал, 7 – теплоносієм, 8 – адіабатична ізоляція, 9 – канал, 10 – вітка  $p$ -типу, 11, 12 – комутаційні пластини, 13 – електричні контакти, 14 – прошарок між відками  $n$ -і  $p$ -типу, 15 – виходи каналів.

На бічній поверхні віток 2 комутаційних пластин 4 які знаходяться в тепловому контакті з теплоносієм 4, теплообмін описується законом Ньютона-Ріхмана:

$$q_0 = \alpha_T(t - T), \quad (1)$$

де  $\alpha_T$  – коефіцієнт теплообміну,  $T$  – температура вітки термоелемента,  $t$  – температура теплоносія.

Система рівнянь, що описує розподіл температури і потенціалу в термоелектричному середовищі описується фундаментальними законами збереження енергії та носіїв струму [7]:

$$\vec{\nabla} \vec{W} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \vec{i} = 0 \quad (3)$$

де  $\vec{W} = \vec{q} + U\vec{i}$  – густина потоку енергії.

Використавши узагальнені закони Фур'є та Ома для термоелектричного середовища:

$$\vec{q} = -\kappa \vec{\nabla} T + \alpha \vec{i} T \quad (4)$$

$$\vec{i} = -\sigma (\vec{\nabla} U + \alpha \vec{\nabla} T) \quad (5)$$

де  $U$  – потенціал,  $\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\alpha$  – коефіцієнт термоЕРС,  $\sigma$  – електропровідність.

Можна отримати систему диференціальних рівнянь для знаходження розподілів температур та потенціалів:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \kappa \vec{\nabla} T + \frac{i^2}{\sigma} - T \vec{i} \vec{\nabla} \alpha &= 0; \\ \vec{\nabla} (-\sigma (\vec{\nabla} U + \alpha \vec{\nabla} T)) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для опису руху теплоносія в каналі використовується система рівнянь Нев'є-Стокса та рівняння неперервності, а для розподілу температури в теплоносії – рівняння теплопровідності.

Рівнянь Нев'є-Стокса та рівняння неперервності можна записати у вигляді [8]:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{d\vec{g}}{dt} &= \rho \vec{F} - \vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{g} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\text{div} \vec{g}), \\ \text{div} \rho \vec{g} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Ліва частина (7) являє собою силу інерції рідини. Перший доданок у правій частині (7) – масову силу, другий – дію поверхневих сил тиску (нормальних напружень), а останні два доданки – дію дотичних складових поверхневих сил (сил внутрішнього тертя).

Теплообмін в рідині описується рівнянням теплопровідності [9]:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{g}\vec{\nabla})T \right) = -(\vec{\nabla}\vec{q}) + \sum_{i,j} \tau_{ij} S_{ij} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_P \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{g}\vec{\nabla})P \right) + Q \quad (8)$$

де  $\rho$  – густина,  $C_p$  – теплоємність,  $T$  – температура,  $\vec{g}$  – вектор швидкості рідини,  $q$  – густина потоку тепла,  $P$  – тиск,  $\tau_{ij}$  – тензор в'язкого напруження, де  $\eta$  – в'язкість,  $I$  – одиничний тензор,  $\vec{S}_{ij}$  – тензор швидкості деформації.

Оскільки дана задача розглядається для стаціонарного випадку, то ліва частина першого рівняння системи (7) рівна нулю. Впливом масових сил також нехтуємо, тоді перший доданок у лівій частин цього ж рівняння теж рівний нулю. Рівняння (8) теж необхідно записати для стаціонарного випадку, а нагрівом рідини за рахунок внутрішнього тертя, стисненням рідини, а також нагрівом рідини за рахунок внутрішніх джерел тепла нехтуємо. Тоді система рівнянь Нев'є-Стокса, неперервності та теплопровідності для даної задачі запишеться у виді:

$$\left. \begin{aligned} -\vec{\nabla}P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{g} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla}(\text{div} \vec{g}) &= 0, \\ \text{div} \rho \vec{g} &= 0, \\ \rho C_p (\vec{g}\vec{\nabla})T + \vec{\nabla}\vec{q} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Граничні умови, що описують спряжену задачу використовуються в даній задачі мають наступний вигляд:

– для термоелектричного середовища:

$$\text{температура} - \left. \begin{aligned} T|_0 &= 300K \\ T|_{z_h} &= \alpha_T (T_h - T) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{потенціал} - \left. \begin{aligned} U|_0 &= 0 \\ U|_{x_3} &= U_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

– для теплоносія:

$$\text{швидкість} - \left. \begin{aligned} g|_0 &= g_0 \\ g|_{z_h} &= P_0 = 0 \\ g|_{S_0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\text{температура на вході} - t|_{z_h} = T_h \quad (13)$$

де  $g_0$  – початкова швидкість теплоносія,  $U_0$  – фіксоване значення потенціалу,  $S_0$  – бічна поверхня термоелемента.

## Реалізація поставленої задачі в пакеті прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics

Для розрахунку поставленої задачі було обрано пакет прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics, а саме – рівняння в часткових похідних (*PDE modes*). Де одним із способів представлення рівняння є коефіцієнтна форма:

$$e_a \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}(-c\vec{\nabla}\vec{u} - \alpha\vec{u} + \gamma) + \beta\vec{\nabla}u + a\vec{u} = f \quad (14)$$

Дане рівняння використано для термоелектричного середовища і приведено до вигляду  $\vec{\nabla}(-c\vec{\nabla}\vec{u}) = 0$ . Для цього  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $a$  зануляються, а величину  $c$  записують у вигляді матриці:

$$c = \begin{pmatrix} \kappa + \alpha^2 \sigma T + \sigma U \alpha & \alpha T \sigma + \sigma U \\ \alpha \sigma & \sigma \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Причому вектор  $\vec{u}$  має такий вигляд матриці:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} T \\ U \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Для опис руху та теплообміну рідини використовується модуль Comsol Multiphysics – Non-Isothermal Flow [11]. Модуль включає систему рівнянь Нав'є-Стокса, рівняння неперервності та рівняння теплопередачі рідини, змінному в часі чи стаціонарному режимі. Розрахунок приведеної моделі, в стаціонарному режимі, проводився за співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \rho(\vec{\nabla}\vec{\nabla})\vec{u}_2 &= \vec{\nabla} \left[ -PI + \mu(\vec{\nabla}\vec{\nabla} + (\vec{\nabla}\vec{\nabla})^T) - \frac{2}{3}\mu(\vec{\nabla}\vec{\nabla})I \right], \\ \vec{\nabla}(\rho\vec{\nabla}) &= 0, \\ \rho C_p \vec{\nabla}T + \vec{\nabla}(\kappa\vec{\nabla}T) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Значення електричного струму розраховувалось через інтеграл по площі поперечного перерізу  $S_V$ :

$$I = \iint_{S_V} I_n dS_V, \quad (19)$$

де  $I_n = n_x I_x + n_y I_y + n_z I_z$  - вектор густини електричного струму. Значення  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$  визначались співвідношеннями:



$$I_x = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} - \sigma \alpha \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (20)$$

$$I_y = -\sigma \frac{\partial U}{\partial y} - \sigma \alpha \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (21)$$

$$I_z = -\sigma \frac{\partial U}{\partial z} - \sigma \alpha \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (22)$$

Витрата теплоносія визначалась інтегруванням швидкості  $v$  по площі перерізу каналу  $S_{VI}$ :

$$G = \iint_{S_{VI}} v dS_{VI} \quad (23)$$

Електрична потужність термоелемента  $W = I \cdot U$ , тепловий потік, що надходить до термоелемента  $Q_h = GC_p \Delta t$ .

Основним параметром, що характеризує ефективність роботи термоелемента в режимі генерації електричної енергії є коефіцієнт корисної дії, який визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{W}{Q_h}. \quad (24)$$

### Результати комп'ютерних досліджень характеристик повітряного проникного термоелемента в матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb*

Розрахунок проводився для матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb*. Функціональні залежності параметрів матеріалу - коефіцієнта термоЕРС  $\alpha$ , теплопровідності  $k$  та електропровідності  $\sigma$  від температури [3].

Моделювання проникного термоелемента здійснювалось в програмі Comsol Multiphysics для наступної базової конструкції (рис. 1): висота  $b = 2$  мм, довжина 2 мм, ширина  $a = 0.5$  мм. Розміри нижньої комутації – висота  $c = 0.1$  мм, довжина 2 мм, ширина  $a = 0,5$  мм; верхньої – висота  $d = 0.1$  мм, довжина  $c = 2$  мм, ширина 2 мм. Матеріал комутації – мідь. Ці прорізи в комутації разом з вітками утворюють систему каналів для прокачки теплоносія. Контактний опір складав величину  $2 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. На рис. 2 представлено розбиття такої конструкції на скінченні елементи.

Приклад розподілу температур температури в теплоносії та матеріалі термоелемента при температурі газу на вході 600 К приведено на рис. 3.

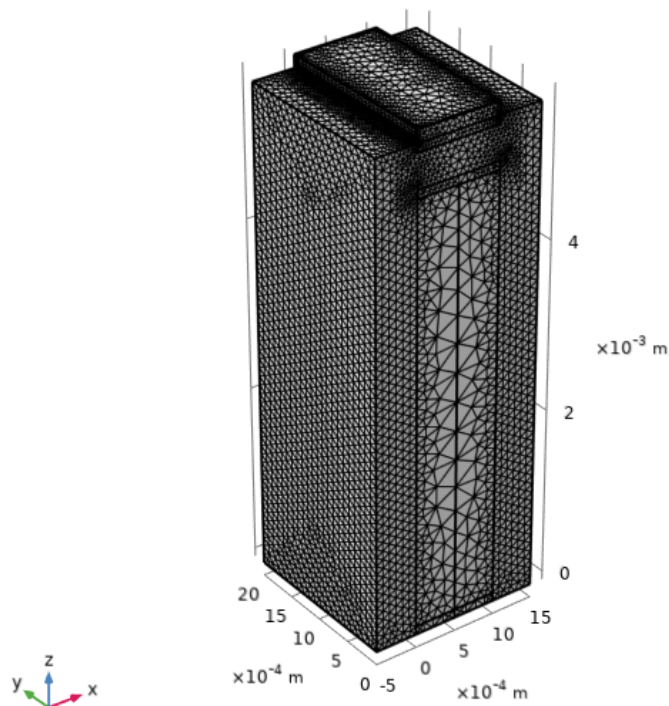
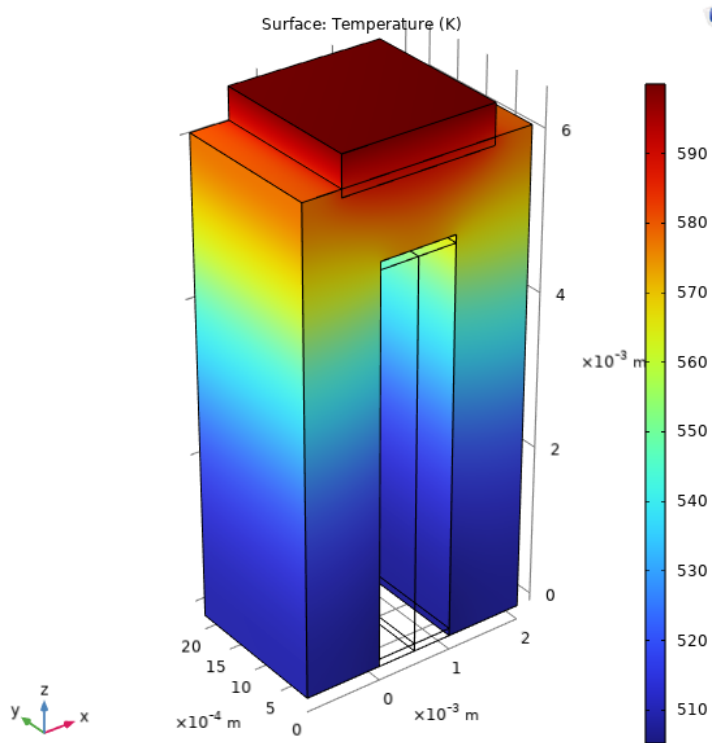
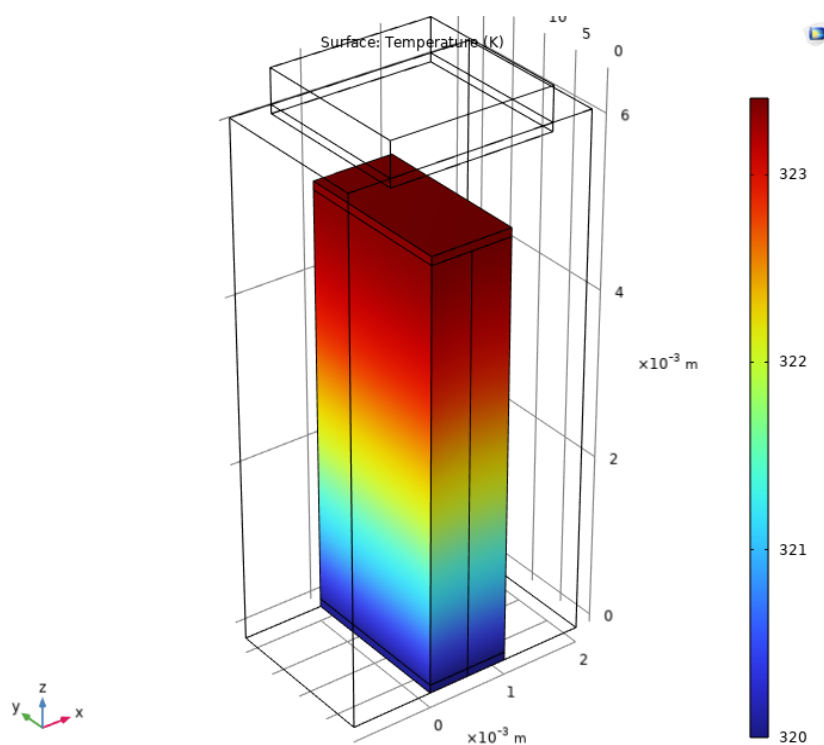


Рис. 2. Геометрична сітка.



а) розподіл температур в теплоносії



б) розподіл температур в матеріалі термоелемента

Рис. 3. Розподіли температур.

Ширина віток термоелемента змінювалась від 0.05мм до 0.2 мм, а швидкість теплоносія на вході в термоелемент змінювалась від 0.001м/с до 0.05 м/с. Коефіцієнт теплообміну -  $\alpha_T$ , в законі Ньютона-Ріхмана, складав величину 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Таблиця 1

Залежності енергетичних параметрів від ширини вітки та швидкості теплоносія.

$a, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$	$t_{\text{вих}}, \text{ К}$	ЕРС, В	$I, \text{ А}$	$G, \text{ м}^3/\text{с}$	$W, 10^{-8} \text{ Вт}$	$\eta (\%)$
0.002	0.001	506.80	4.09E-04	1.25E-05	0.000855	0.50929	1.52
0.002	0.01	518.18	4.18E-04	1.32E-05	0.008724	0.551344	2.19
0.002	0.03	543.75	4.47E-04	1.49E-05	0.027447	0.665821	2.18
0.002	0.05	558.25	4.62E-04	1.59E-05	0.046937	0.732695	2.18
0.001	0.001	506.75	6.81E-04	6.71E-06	8.55E-04	4.57042	2.05
0.001	0.01	523.25	7.17E-04	7.31E-06	0.008823	5.24203	1.64
0.001	0.03	471.62	5.71E-04	4.14E-06	0.022122	2.3663	0.54
0.0005	0.001	474.75	0.001043	2.11E-06	7.75E-04	2.19625	0.11
0.0001	0.001	511.87	0.005279	9.16E-08	8.67E-04	4.83785	0.177

Для вказаних параметрів визначались середньоінтегральні характеристики термоелемента: температури повітря на виході з термоелемента -  $t_{вих}$ ; електрорушійна сила термоелемента - ЕРС; значення електричного струму  $I$ ,  $A$ ; витрати повітря -  $G$ ; електрична потужність  $W$ ; коефіцієнт корисної дії  $\eta$ . Залежності цих параметрів від ширини вітки  $a$  та висоти  $0.002\text{м}$  для різних швидкостей теплоносія  $V$  на вході в термоелемент представлено в таблиці 1. Температура теплоносія на вході в термоелемент складала  $600\text{ К}$ .

Як видно з таблиці, для ширини віток  $0.002\text{м}$  значення ККД від швидкості подачі теплоносія в термоелемент виходить на насичення з невеликим максимумом при швидкості  $0.01\text{ м/с}$ . При зменшенні товщини віток ( $0.001\text{ м}$ ) отримуємо менші значення ККД при тих самих швидкостях теплоносія. Тому, для виявлення максимуму ККД необхідно проводити багато параметричну оптимізацію проникного термоелемента. Таку задачу засобами програмного пакету Comsol Multiphysics складно розв'язати перебором параметрів, оскільки для сучасних комп'ютерів з тактовою частотою  $4.7\text{ ГГц}$  розв'язок задачі з одним набором параметрів шукається програмою на протязі  $8\text{ годин}$ . Тому, для розв'язку багато параметричної оптимізаційної задачі доцільніше використовувати математичну теорію оптимального керування розроблену для 1D модель проникного термоелемента.

## Висновки

1. Розроблено 3D модель проникного генераторного термоелемента в пакеті прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics.
2. Визначено розподіли температур в матеріалі віток термоелемента та теплоносії, потенціалів в термоелементі, швидкостей повітря та енергетичні характеристики проникного генераторного термоелемента з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb*.
3. Для проведення багатопараметричної оптимізації конструкційних та теплофізичних параметрів проникного термоелемента доцільно використовувати математичну теорію оптимального керування розроблену для 1D модель проникного термоелемента.

## Список літератури

1. Анатичук Л. И Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Справочник – Киев: Наукова думка. – 1979. – 762 с.
2. Анатичук Л.И. Термоэлектричество, Т.1. Физика термоэлектричества. Черновцы. – 2008. – 388с.
3. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // Nature materials. – 2008. – Vol. 7. – P. 105 – 114.
4. Анатичук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
5. Anatychuk L. I., Vikhor L. N., Cherkez R. G. Optimal control of semiconductor material inhomogeneity for permeable cooling thermocouples // Thermoelectricity. – 2000. – №3. – P. 45 – 55.

6. Анатичук Л.І., Черкез Р.Г., Дем'янюк Д.Д., Бухараєва Н.Р. Дослідження енергетичних характеристик проникного площинного термоелемента // Термоелектрика. – 2012. – № 2. – С. 88 – 92.
7. Анатичук Л. И., Семенюк В. А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. – Чв: Прут. – 1992. – 264 с.
8. Каденко І.М., Харитонов О.М., Єрмоленко Р.В. Основи тепло гідравліки ядерних енергетичних установок. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2010. – 320 с.
9. Охрименко Д.И. Применение пакета COMSOL Multiphysics 3.4 для решения задач гидродинамики и теплообмена в химической технологии: Курс. роб. – Д. – 2009. – 64с.
10. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB: Методическое пособие. – С.-П.: СПб ГУ ИТМО. – 2006. – 78 с.
11. <http://www.comsol.com>.

Надійшли до редакції: 09.03.2022

**Anatychuk L.I.** *acad. National Academy  
of Sciences of Ukraine*<sup>1,2</sup>

**Cherkez R.G.** *doc. phys.– mat. sciences,  
professor*<sup>1,2</sup>

**Porubanyi O.M.**<sup>2</sup>, **Zhukova A.S.**<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2 Kotsiubynsky str., 58000, Chernivtsi, Ukraine

## **EFFECT OF LEG THICKNESS AND HEAT CARRIER VELOCITY ON THE EFFICIENCY OF A PERMEABLE GENERATOR THERMOELEMENT**

*The paper presents the results of computer research on the influence of leg thickness and gas pumping velocity for a 3D model of a permeable generator thermoelement on the EMF and efficiency. The dependences of the energy characteristics of a thermoelement made of materials based on Bi-Te-Se-Sb are calculated.*

**Key words:** permeable thermoelement, computer simulation, electric energy generation, energy characteristics.

## References

1. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiie ustroistva. Spravochnik. [Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book].* Kyiv [in Russian].
2. Anatyshuk L.I. (2008). *Termoelektrichestvo. T.1. Fizika termoelektrichestva [Thermoelectricity. Vol.1. Physics of Thermoelectricity].* Chernivtsi [in Russian].
3. Snyder G.J., Toberer E.S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7, 105 – 114.
4. Anatyshuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20.
5. Anatyshuk L. I., Vikhor L. N., Cherkez R. G. (2000). Optimal control of semiconductor material inhomogeneity for permeable cooling thermocouples. *J. Thermoelectricity*, 3, 45 – 55.
6. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G., Demyanyuk D.D., Bukharayeva N.R. (2012). Research on the energy characteristics of a permeable planar thermoelement. *J. Thermoelectricity*, 2, 88 – 92.
7. Anatyshuk L.I., Semeniuk V.A. (1992). *Optimalnoie upravleniie svoistvami termoelektricheskikh materialov i priborov [Optimal control over the properties of thermoelectric materials and devices].* Chernivtsi: Prut [in Russian].
8. Kadenko I.M., Kharitonov O.M., Yermolenko R.V. [2010]. *Osnovy teplohidravliki yadernykh energetychnykh ustanovok [Fundamentals of thermal hydraulics of nuclear power plants].* Kyiv: VPC “Kyiv University” [in Ukrainian].
9. Okhrimenko D.I. (2009). The use of COMSOL Multiphysics 3.4 package for solving hydrodynamics and heat exchange problems in chemical technology: Course paper. D.
10. Biriulin G.V. (2006). *Thermophysical calculations in the COMSOL/FEMLAB finite element package: A Guidebook.* St-Petersburg: ITMO University [in Russian].
11. <http://www.comsol.com>.

Submitted: 09.03.2022

УДК 621.431:621.365

**Дмитриченко М.Ф.** *док. техн. наук*

**Гутаревич Ю.Ф.** *док. техн. наук*

**Трифонов Д.М.** *канд. техн. наук*

**Сирота О.В.** *канд. техн. наук*

**Шуба Е.В.** *канд. техн. наук*

**Кухтик Н.О.** *доктор філософії*

Національний транспортний університет  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ,  
01010, Україна, e-mail: d.trifonov@ntu.edu.ua

**ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИСТРОЮ  
ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ  
ПОВІТРЯ НА ВПУСКУ ДВИГУНА З ІСКРОВИМ  
ЗАПАЛЮВАННЯМ ЗА РОБОТИ НА СПИРТОВМІСНОМУ  
БЕНЗИНІ**

---

*У статті розглядається проблема, що пов'язана з підвищенням ефективності експлуатації двигуна з іскровим запалюванням. Серед альтернативних палив, для двигунів з іскровим запалюванням у всьому світі розглядається етанол як важливе відновлюване джерело енергії. Додавання етанолу до товарного бензину забезпечує зниження шкідливих забруднювачів повітря, парникових газів, а також ціни на виробництво. З іншого боку, використання бензоетанольних сумішей як палива пов'язано з більш низьким тиском насичених парів, що робить пуск холодного двигуна досить складним, а також призводить до погіршення паливно-економічних і екологічних показників двигуна в режимі прогріву. Запропоновано пристрій що використовує термоелектричні модулі для підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна з іскровим запалюванням при роботі на бензоетанольних сумішах в режимах пуску і прогріву холодного двигуна. Наведено опис запропонованого термоелектричного пристрою, принцип його функціонування та результати функціональних випробувань. Бібл. 9, рис. 4.*

**Ключові слова:** двигун з іскровим запалюванням, бензоетанольна суміш, термоелектричні модулі, пуск і прогрів холодного двигуна, підігрів повітря на впуску.

## **Вступ**

Транспорт став невід'ємною частиною сучасного життя і одним з ключових секторів з точки зору споживання енергії. Двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), що працює на викопному

паливі є одним з найбільш ефективних і універсальних джерел механічної енергії, що застосовується в автомобілях, будівельній та сільськогосподарській техніці, стаціонарних енергетичних установках та ін. Нестабільність світових цін на викопне паливо, скорочення його запасів, проблеми з транспортуванням змушують шукати альтернативні види палива. Застосування альтернативних видів палив повинно знижувати екологічний збиток, що наноситься навколишньому середовищу, який пов'язаний з застосуванням викопних палив. Розвиток ринку альтернативних видів палива має знизити залежність України від нафти та сприяти економічному зростанню та скороченню викидів парникових газів на транспорті. Зниження впливу автомобільного транспорту на забруднення атмосферного повітря є одним з найважливіших пріоритетів державної політики в галузі автомобільного транспорту [1].

Тому дослідження, що присвячені впливу альтернативних видів палива на екологічні та енергетичні показники роботи двигуна транспортного засобу (ТЗ), а також визначення рекомендацій щодо їх застосування з урахуванням умов експлуатації транспортного засобу є важливим науковим завданням, яке зумовлює можливість широкого використання альтернативних видів палива у майбутньому.

## **Аналіз попередніх досліджень**

Сучасні тенденції в паливній промисловості, такі як посилення екологічних вимог до палив, зростання обсягів споживання високооктанових бензинів, підвищення собівартості видобутку нафти, погіршення якості видобутої нафти і, як наслідок, подорожчання її переробки призводять до необхідності перегляду традиційних підходів до виробництва моторних палив. В першу чергу це стосується отримання високооктанових бензинів та використання палив і їх компонентів альтернативних нафтовим.

Одним із шляхів розв'язання цих завдань може стати використання спирту, як добавки до традиційних товарних бензинів, і в першу чергу спирту етилового зневодненого (паливного біоетанолу), виготовленого з біологічно відновлювальної сировини. Використання спиртовмісних бензинових сумішей, стало загальносвітовою тенденцією, яке дозволяє поліпшити енергоефективність ДВЗ, збільшити його експлуатаційний ресурс, зменшити витрати на технічне обслуговування і головне – знизити залежність від викопного палива [2 – 5].

Разом з цим виявлено ряд істотних недоліків застосування спирту як моторного палива, що обмежують його максимальну концентрацію в бензоетанольних сумішах. Так, висока прихована теплота випаровування ускладнює пуск холодного двигуна (при температурі нижче 10°C він стає практично неможливим), менша теплота згорання порівняно з теплотою згорання нафтових палив вимагає збільшення витрат на 25...30 %, нижча температура відпрацьованих газів призводить до збільшення часу виходу каталітичного нейтралізатора на ефективний режим конверсії шкідливих речовин в режимі прогріву двигуна, внаслідок чого збільшуються викиди шкідливих речовин, відносно висока електропровідність в поєднанні з високим вмістом кисню вимагає захисту деталей системи паливоподачі від корозії, фазова нестабільність



спиртовмісного палива (особливо це проявляється при застосуванні метанолу), незадовільні трибологічні характеристики [6, 7].

Для подолання деяких недоліків застосування бензоетанольної суміші як моторного палива, що дозволить поліпшити експлуатаційні характеристики ДВЗ, існують в основному два можливих підходи. Перший – введення мінімальної кількості спирту в товарний бензин (до 20 %, щоб уникнути проблем зі штатним режимом роботи ДВЗ). Другий – забезпечення підігріву повітря на впуску до оптимальних значень температури і її стабілізацію при застосуванні бензоетанольної суміші (в залежності від концентрації спирту в суміші) в умовах низьких температур навколишнього повітря, зокрема в режимах пуску і прогріву холодного двигуна.

Сучасні конструкції систем впуску двигуна ТЗ шляхом застосування різних конструктивних рішень, в першу чергу, забезпечують низьку концентрацію шкідливих речовин у відпрацьованих газах і високі економічні показники в нормальних умовах експлуатації, при яких відсутні будь-які фактори, що перешкоджають здійсненню функціональних або технологічних процесів. Як відомо, експлуатаційні характеристики двигуна ТЗ в різних режимах його роботи залежать не тільки від вдосконалення конструкції систем двигуна, але і від умов експлуатації. Найбільший вплив на експлуатаційні характеристики двигуна ТЗ чинять природно-кліматичні умови. Основною характеристикою природно-кліматичних умов, що істотно впливає на експлуатаційні властивості транспортного засобу, є температура навколишнього повітря. Температура навколишнього повітря є визначальним фактором у формуванні паливоповітряної суміші через вплив на температуру у впускному колекторі двигуна ТЗ [8, 9].

Утворення оптимального складу паливоповітряної суміші, швидкість і повнота її згорання при роботі двигуна в різних режимах, в тому числі при низьких температурах навколишнього повітря в досить великій мірі залежить від фізико-хімічних властивостей застосовуваного палива, які визначаються низкою показників, у тому числі тиском насичених парів (ТНП) що характеризує випаровуваність палива. За величиною ТНП можна судити про пускові властивості палива (рис. 1).

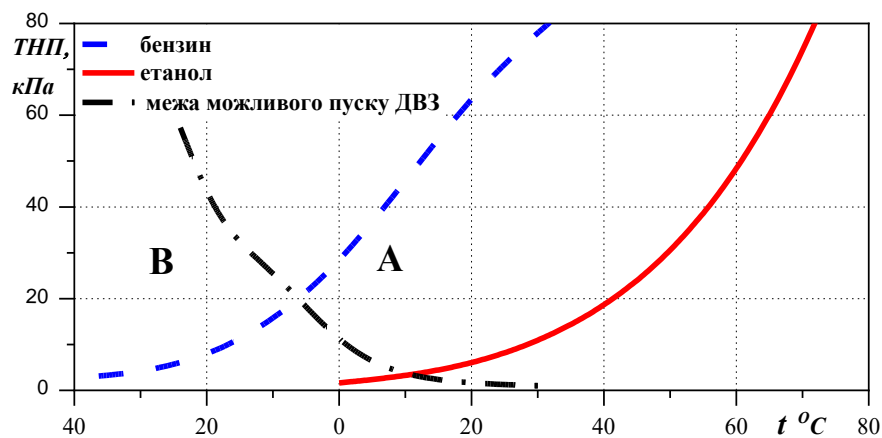


Рис. 1. Залежність значення ТНП бензину і спирту від температури навколишнього повітря та залежність можливого пуску двигуна від їх ТНП: А – область, де пуск ДВЗ можливий; В – область, де пуск неможливий

Представлені на рис. 1 графічні залежності, що отримані з досить великої кількості джерел, показують, що зі збільшенням вмісту етанолу в бензоетанольній суміші ТНП зменшується і доходить до значення, яке робить неможливим пуск двигуна, особливо в умовах низьких температур.

Для інтенсифікації випаровування палива в умовах низьких температур застосовуються різні методи, серед яких – попередній підігрів палива, підігрів впускного колектора, підігрів повітря на впуску, посилення турбулізації повітряного потоку та інші.

У зв'язку з цим застосування бензоетанольної суміші, особливо з досить великим вмістом етанолу, вимагає розробки різних методів і пристроїв з метою забезпечення приготування паливоповітряної суміші оптимального складу і її кількості незалежно від кліматичних умов і режимів роботи двигуна ТЗ.

Результати проведеного аналізу свідчать про актуальність і доцільність досліджень, спрямованих на створення та використання пристроїв, що забезпечують поліпшення експлуатаційних характеристик двигуна з іскровим запалюванням при роботі на бензоетанольних сумішах в режимах пуску і прогріву холодного двигуна.

## Результати досліджень

Враховуючи вимоги щодо мінімізації втручання в конструкцію двигуна, систем, що забезпечують його роботу та сучасні технологічні рішення авторами запропоновано систему, що забезпечує автоматичне підтримання оптимальної температури повітря у впускному колекторі двигуна ТЗ, що складається з ДВЗ, повітроочисника, впускного колектора, термоелектричного пристрою (ТЕП), електронного блоку управління, датчика температури повітря у впускному колекторі, датчика навантаження. Термоелектричний прилад складається з термоелектричних модулів, внутрішнього і зовнішнього радіатора з вентиляторами та датчика температури зовнішнього радіатора (рис. 2).

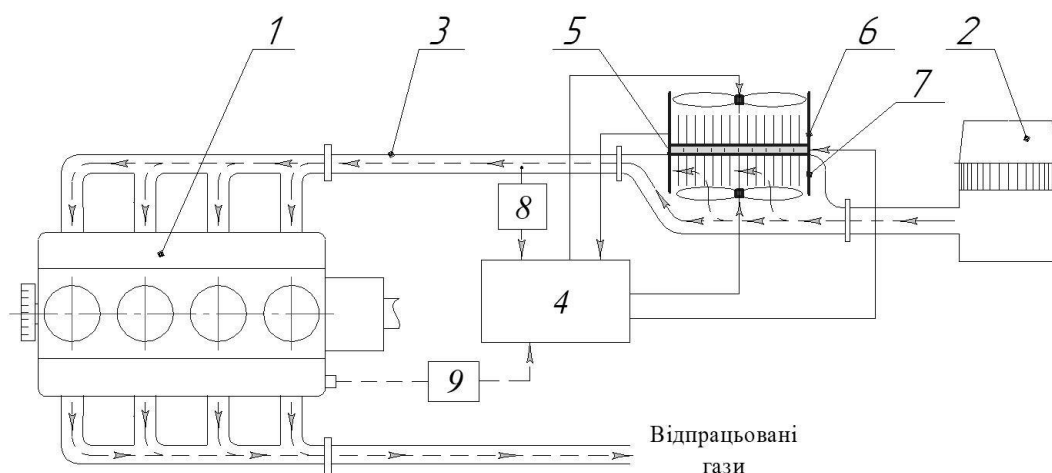


Рис. 2. Конструктивна схема запропонованої системи, що забезпечує автоматичне підтримання оптимальної температури повітря у впускному колекторі ДТЗ: 1-ДВЗ, 2-повітроочисник, 3-впускний колектор, 4-електронний блок управління, 5-термоелектричний модуль, 6- зовнішній радіатор з вентилятором та датчиком температури, 7-внутрішній радіатор з вентилятором, 8-датчик температури повітря у впускному колекторі, 9-датчик навантаження.

Основним елементом запропонованої системи є термоелектричний прилад, що складається з термоелектричних модулів, принцип дії яких заснований на ефекті Пельтьє (TEC1-12706). Найбільш значущими особливостями термоелектричних модулів є: невеликі масогабаритні розміри, відсутність рухомих частин, досить висока швидкість нагріву при низькому енергоспоживанні, практично не вимагають обслуговування. Застосування термоелектричних модулів часто дозволяє отримати просте рішення складних технічних задач управління тепловою енергією і забезпечує суттєві переваги перед альтернативними технологіями.

Функції електронного блоку управління: формує безперервний струм і напругу на термоелектричних модулях, вимірює і стабілізує температуру повітря на впуску, обмежує потужність, яку споживає за заданим значенням, контролює температуру зовнішнього радіатора термоелектричного приладу і управляє його вентилятором, згладжує пульсації і скачки напруги бортової мережі, здійснює діагностику елементів запропонованої системи.

Для інтенсифікації теплообміну (посилення турбулізації) повітряного потоку у впускному колекторі з внутрішнім радіатором термоелектричних модулів застосовано вентилятор. З метою недопущення зниження ефективності запропонованої системи, за рівнем сигналу датчика температури зовнішнього радіатора електронний блок управління забезпечує включення вентилятора зовнішнього радіатора.

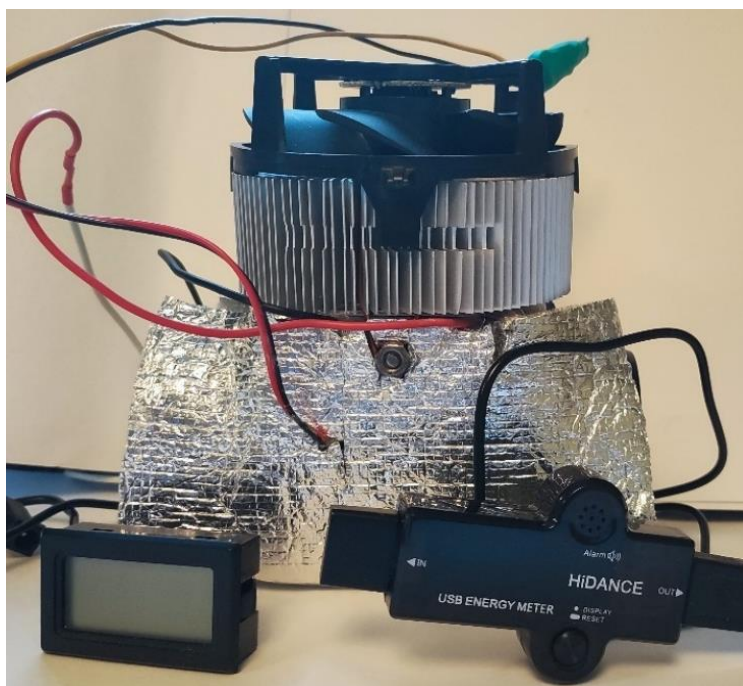
Принцип функціонування запропонованої термоелектричної системи полягає в наступному: під час роботи двигуна на електронний блок управління надходять сигнали від датчиків температури повітря у впускному колекторі, зовнішнього радіатора та навантаження. В залежності від рівня цих сигналів електронний блок управління змінюючи потужність електричного струму, що підводиться до термоелектричних модулів, забезпечує необхідну (оптимальну) температуру внутрішнього радіатора (ступінь його нагріву).

Запропонована система забезпечує наступні режими функціонування:

– в умовах оптимальної температури повітря у впускному колекторі (за рівнем сигналу датчика температури повітря у впускному колекторі) з повітроочисника по впускному колектору повітря потрапляє в циліндри двигуна (термоелектричний прилад відключений);

– в умовах, коли температура повітря у впускному колекторі менша оптимальної електронний блок управління підключає термоелектричні модулі до бортової мережі, що забезпечує збільшення температури внутрішнього радіатора і змінюючи потужність електричного струму забезпечує підігрів повітря у впускному колекторі до оптимальних значень.

На кафедрі двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету виготовлено робочий зразок запропонованого термоелектричного пристрою (рис. 3) і проведені його функціональні випробування з метою оцінки можливої ефективності запропонованого пристрою для підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна з іскровим запалюванням за роботи на бензоетанольних сумішах в умовах низьких температур навколишнього повітря.



а)



б)

Рис. 3. Експериментальний зразок запропонованого термоелектричного пристрою: а) загальний вигляд ТЕП з виносним датчиком температури та тестером напруги, струму і споживаної потужності, б) внутрішній радіатор з вентилятором

Функціональні випробування робочого зразка проводили при температурі навколишнього повітря мінус 5 °С. При цьому здійснювався контроль зміни температури на виході з термоелектричного пристрою, напруги і сили струму на термоелектричному модулі. Виходячи з аналізу літератури, яка присвячена особливостям пуску холодного двигуна оптимальна температура на впуску в режимах пуску і прогріву складає близько +40...60 °С. Враховуючи більш високу теплоємність бензоетанольних сумішей в порівнянні з товарним бензином обрано за кінцеву температуру на впуску близько +60 °С.

За результатами проведених досліджень встановлено наступне. Середнє значення напруги на термоелектричному модулі склала 12.7 В, сили струму – 4.1 А. Температура повітря за 3 хв. досягла 56.8 °С, при цьому спостерігалось зниження швидкості збільшення температури повітря. (рис. 4) Це явище обумовлено зниженням потужності струму, що пояснюється відсутністю під час проведення дослідження ТЕП електронного блоку управління, зокрема керуючого контролера термоелектричного модуля. Відсутність контролера термоелектричного модуля призвело до зниження потужності струму майже на 12 % в порівнянні з початковим значенням.

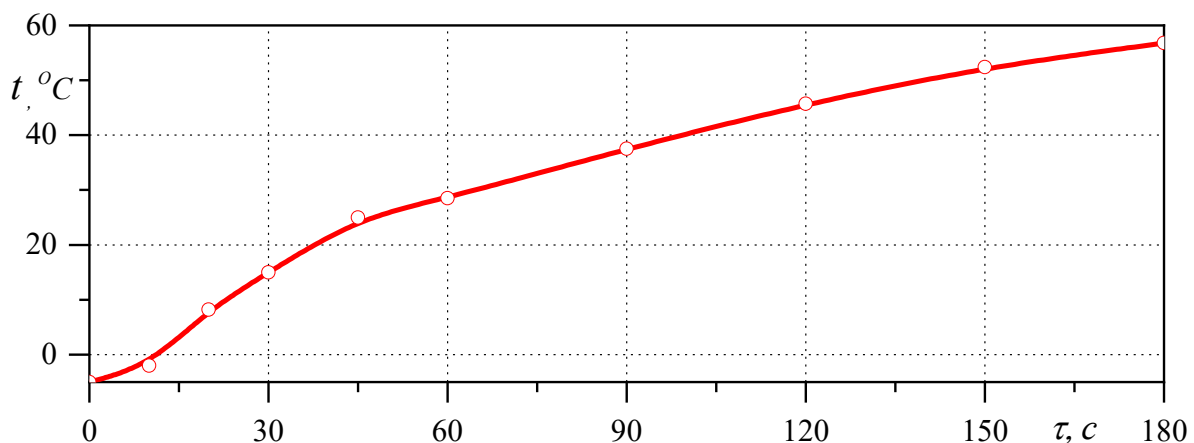


Рис. 4. Зміна температури повітря на впуску при використанні ТЕП

За результатами функціональних випробувань підтверджена можливість і доцільність використання пристроїв, що забезпечують підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна з іскровим запалюванням в режимах пуску і прогріву холодного двигуна за роботи на бензоетанольних сумішах, зокрема, термоелектричних модулів, принцип дії яких ґрунтується на ефекті Пельтьє. За результатами проведеного дослідження встановлено необхідність застосування керуючого контролера термоелектричного модуля, відсутність якого призводить до різкого зниження ефективності модуля (за деякими даними до 30...40 %).

## Висновки

1. Альтернативні види палива, зокрема бензоетанольні суміші мають великий потенціал у

вирішенні паливно-енергетичних та екологічних проблем, пов'язаних з викопними видами палива.

2. Досліджено можливість використання термоелектричних пристроїв для підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна ТЗ за роботи на бензоетанольних сумішах, зокрема в режимах пуску і прогріву холодного двигуна.
3. Визначено переваги та перспективні напрямки використання термоелектричних пристроїв при експлуатації двигунів ТЗ в умовах низьких температур навколишнього повітря. Встановлено, що такі пристрої можуть реалізувати підігрів повітря на впуску до оптимальних значень.
4. Функціональні випробування ТЕП свідчать про можливість і доцільність використання термоелектричних модулів, принцип дії яких заснований на ефекті Пельтьє з керуючим контролером для підтримання оптимальної температури повітря на впуску двигуна з іскровим запалюванням в режимах пуску і прогріву за його роботи на бензоетанольних сумішах.

## **Література**

1. Закон України про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2019, № 16, ст.70. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19>.
2. Erdiwansyah, Mamat, R., Sani, M. S. M., Sudhakar, K., Kadarohman, A., and Sardjono, R. E. An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines, *Energy Reports*, Volume 5, 2019, Pages 467-479, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.009>
3. Awad O.I., Mamat R., Ali O.M., Sidik N.A.C., Yusaf T., Kadirgama K., Kettner M. Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 3, 2018, Pages 2586-2605, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>.
4. Tibaquirá, J.E.; Huertas, J.I.; Ospina, S.; Quirama, L.F.; Niño, J.E. The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles. *Energies* 2018, 11, 221. <https://doi.org/10.3390/en11010221>.
5. Sivakumar Kasibhatta Alcohol Fuels as an Alternative Fuels - Bringing New Heights in Sustainability, *Alcohol Fuels - Current Technologies and Future Prospect*, Yongseung Yun, IntechOpen, (November 5th 2019). DOI: 10.5772/intechopen.86626.
6. Matějovský, L., Macák, J., Pospíšil, M., Staš, M., Baroš, P., & Krausová, A. Study of corrosion effects of oxidized ethanol-gasoline blends on metallic materials. *Energy & Fuels*, Volume 32 Part 4, 2018, Pages 5145-5156, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b04034>.
7. Raja, A., Arasu, A. Exhaust gas treatment for reducing cold start emissions of a motorcycle engine fuelled with gasoline-ethanol blends. *Journal of Energy in Southern Africa*. Volume 26, Part 2, Pages 84-93, 2015, ISSN 2413-3051, <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2015/v26i2a2199>.
8. Luis Carlos Monteiro Sales, José Ricardo Sodré, Cold start characteristics of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel, *Applied Thermal Engineering*, Volume 40, 2012, Pages 198-201, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.057>.

9. Dmytrychenko M.F., Gutarevych Y.F., Trifonov D.M., Syrota O.V. (2020). The use of thermoelectric energy converters to reduce the influence of natural and climatic factors on the technical readiness of a vehicle. *J. Thermoelectricity*, 3, 56-68.

Надійшли до редакції: 23.02.2022

**Dmytrychenko M.F., D.Sc (Tech)**

**Gutarevych Yu.F., D.Sc (Tech)**

**Trifonov D.M., Cand.Sc. (Tech)**

**Syrota O.V., Cand.Sc. (Tech)**

**Shuba E.V., Cand.Sc. (Tech)**

**Kukhtyk N.O., PhD**

National Transport University

1, M.Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv,

01010, Ukraine, *e-mail: d.trifonov@ntu.edu.ua*

**USE OF A THERMOELECTRIC DEVICE TO MAINTAIN  
OPTIMAL AIR TEMPERATURE AT THE INTAKE OF A  
SPARK-IGNITION ENGINE WHEN OPERATING ON  
ALCOHOL-CONTAINING GASOLINE**

*The article deals with the problem associated with increasing the efficiency of operation of a spark ignition engine. Among the alternative fuels for spark ignition engines, ethanol is regarded worldwide as an important renewable energy source. Adding ethanol to commercial gasoline reduces harmful air pollutants, greenhouse gases, and production costs. On the other hand, the use of benzoethanol mixtures as a fuel is associated with a lower saturated vapor pressure, which makes starting a cold engine quite difficult, and also leads to deterioration in the fuel-economic and environmental performance of the engine in the warm-up mode. A device with the use of thermoelectric modules is proposed for maintaining the optimal air temperature at the intake of a spark-ignition engine when operating on benzoethanol mixtures in the start-up and warm-up modes of a cold engine. The description of the proposed thermoelectric device, the principle of its functioning and the results of functional tests are presented. Bibl. 9, Fig 4.*

**Key words:** spark ignition engine, benzoethanol mixture, thermoelectric modules, cold engine start and warm-up, intake air heating.

## References

1. The Law of Ukraine on the basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030. Verkhovna Rada Vidomosti, 2019, 16, p.70.
2. Erdiwansyah Mamat, R., Sani M. S. M., Sudhakar K., Kadarohman A., and Sardjono R. E. (2019). An overview of higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines. *Energy Reports*, 5, 467-479, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.04.009>
3. Awad O.I., Mamat R., Ali O.M., Sidik N.A.C., Yusaf T., Kadirgama K., Kettner M. Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review. (2018). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, Part 3, 2586-2605, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>.
4. Tibaquirá J.E., Huertas J.I., Ospina S., Quirama L.F., Niño J.E. (2018). The effect of using ethanol-gasoline blends on the mechanical, energy and environmental performance of in-use vehicles. *Energies* 11, 221. <https://doi.org/10.3390/en11010221>.
5. Sivakumar Kasibhatta (2019). *Alcohol fuels as an alternative fuel - bringing new heights in sustainability, alcohol fuels - current technologies and future prospect*, Yongseung Yun, IntechOpen, (November 5th 2019). DOI: 10.5772/intechopen.86626.
6. Matějovský L., Macák J., Pospíšil M., Staš M., Baroš P., & Krausová A. (2018). Study of corrosion effects of oxidized ethanol-gasoline blends on metallic materials. *Energy & Fuels*, 32 Part 4, 5145-5156, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b04034>.
7. Raja A., Arasu A. (2015). Exhaust gas treatment for reducing cold start emissions of a motorcycle engine fuelled with gasoline-ethanol blends. *Journal of Energy in Southern Africa*. 26, Part 2, 84-93. ISSN 2413-3051, <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2015/v26i2a2199>.
8. Monteiro Sales Luis Carlos, Sodré José Ricardo (2012). Cold start characteristics of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel. *Applied Thermal Engineering*, 40, 198-201, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.057>.
9. Dmytrychenko M.F., Gutarevych Y.F., Trifonov D.M., Syrota O.V. (2020). The use of thermoelectric energy converters to reduce the influence of natural and climatic factors on the technical readiness of a vehicle. *J.Thermoelectricity*, 3, 56-68.

Submitted: 23.02.2022



УДК 621.384.3

**Колобродов В.Г.,** докт. техн. наук, професор  
**Микитенко В.І.,** докт. техн. наук, доцент  
**Тимчик Г.С.,** докт. техн. наук, професор  
**Колобродов М.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: deanpb@kpi.ua

---

**ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ  
ТЕПЛОВІЗОРІВ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ  
ЯВИЩ ТА ДИСТАНЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ**

---

*Робота присвячена обґрунтуванню вибору поляризаційних оптичних елементів для тепловізійних дистанційних спостережень та вимірювань. Виконано порівняльний аналіз основних методів отримання поляризаційних зображень: з допомогою обертання поляризатора, обертання фазової пластинки і з використанням комбінованих матричних приймачів інфрачервоного випромінювання з мікро поляризаторами. Для аналізу використано спрощені математичні моделі перетворення сигналів в основних оптичних елементах поляриметричних тепловізорів – лінійних поляризаторах та фазових (чверть-хвильових) пластинках. Показана перевага дротяних поляризаторів порівняно з поляризаторами на основі відбивання. Також обґрунтовано, що серед різних фізичних ефектів, що викликають фазові затримки - подвійне променезаломлення, повне внутрішнє відбивання і відбивання випромінювання на межі повітря-метал, дифракція на дротяній дифракційній ґратці – найбільш прийнятним є використання останнього ефекту. Бібл. 22, рис. 7.*

**Ключові слова:** поляриметричні тепловізори, вектори Стокса, поляризатор, чверть-хвильова пластинка

## **Вступ**

Термоелектричні явища досить широко використовуються в різних галузях життєдіяльності людини. Однією з актуальних науково-прикладних задач, наприклад, є утилізація відходів тепла з використанням термоелектрики [1]. Повний комплекс засобів технічної реалізації процесів перетворення енергії потребує багато складових, в тому числі – вимірювальних технологій. Для контролю якості термоелектричних перетворювачів енергії створюються комп'ютеризовані методи абсолютних вимірювань з використанням термопар [2].

Більш узагальнений моніторинг фізичних явищ, пов'язаних з тепловими контрастами, можливий з використанням тепловізорів. Класичні тепловізори дозволяють спостерігати тепловий радіаційний контраст енергетичної яскравості (інтенсивності) між об'єктом і фоном [3]. За низького радіаційного контрасту об'єкта спостереження, ефективність використання класичних тепловізорів може бути невисокою. Для підвищення радіаційного контрасту зображень об'єктів на рівномірному тлі в деяких країнах розпочалися дослідження із створення тепловізорів, в яких носієм інформації є поляризаційні властивості інфрачервоного (ІЧ) випромінювання цілі і фону (завади) [4, 5, 6]. Такі поляриметричні тепловізори (ПТ) вимірюють поляризаційні характеристики випромінювання від об'єкта і фону, а саме: інтенсивність, ступінь поляризації та азимут і еліптичність поляризації [7, 8]. Ці характеристики дозволяють вимірювати комплексний показник заломлення, який поєднує в собі оптичні і електричні параметри досліджуваного середовища.

Оптична система ПТ складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, чверть-хвильової пластинки (quarter-wave retarder) і ІЧ об'єктива [9, 10]. Дослідженню такої оптичної системи присвячено ряд монографій і статей [11, 12], де розглядаються поляризаційні елементи (ІЧ поляризатор і чверть-хвильова пластинка), які здійснюють відповідні перетворення оптичного сигналу для отримання поляризаційних параметрів випромінювання від об'єкта спостереження і фону. Також велика увага приділяється калібруванню ПТ [13]. В той же час відсутня інформація про дослідження оптичної системи ПТ з метою обґрунтування вибору інфрачервоного поляризатора і фазової пластинки для покращення експлуатаційних характеристик тепловізора.

*Метою цієї роботи є дослідження і обґрунтування вибору інфрачервоного поляризатора і фазової пластинки для узгодження їх параметрів, що дозволить підвищити експлуатаційні характеристики поляриметричних тепловізорів.*

## **Фізико-математична модель оптико-електронної системи поляриметричного тепловізора**

Поляризаційні характеристики випромінювання, що змінюються під час розповсюдження і відбивання, можна виразити вектором Стокса, вектором Джонса або матрицею Мюллера [14, 15]. Вектор Стокса був запропонований для дослідження частково поляризованого, а також неполяризованого і повністю поляризованого світла. Чотири параметра вектору Стокса  $\vec{S} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$  описують інформацію про стан поляризації об'єкта спостереження. Найбільшого розповсюдження отримав метод чотирьох сегментацій модуляції матричного приймача випромінювання (МПВ) поляризаційним станом випромінювання для вимірювання вектору Стокса [4, 5, 9].

На рис. 1 зображена схема, яка пояснює принцип роботи такого ПТ на основі модуляції [10]. Для спрощення дослідження будемо вважати, що розглядається монохроматичне випромінювання. Досліджуване частково поляризоване випромінювання з амплітудою  $\vec{E}_{pp}$

проходить через поляризатор, чверть-хвильову пластину, які можуть змінювати кут поляризації  $\theta$  і різницю фаз  $\varepsilon$  між складовими  $E_x$  і  $E_y$  вектору  $\vec{E}_{pp}$  за допомогою механічного обертання, або неперервної періодичної модуляції. Інфрачервоний МПВ формує групу значень інтенсивності вихідного випромінювання, які використовують для отримання чотирьох параметрів вектору Стокса поляризаційного зображення шляхом зміни кутів  $\theta$  і  $\varepsilon$ .

Вектори Стокса дозволяють отримати основні параметри поляризації випромінювання: інтенсивність, ступінь поляризації, кут поляризації і еліптичність поляризації.

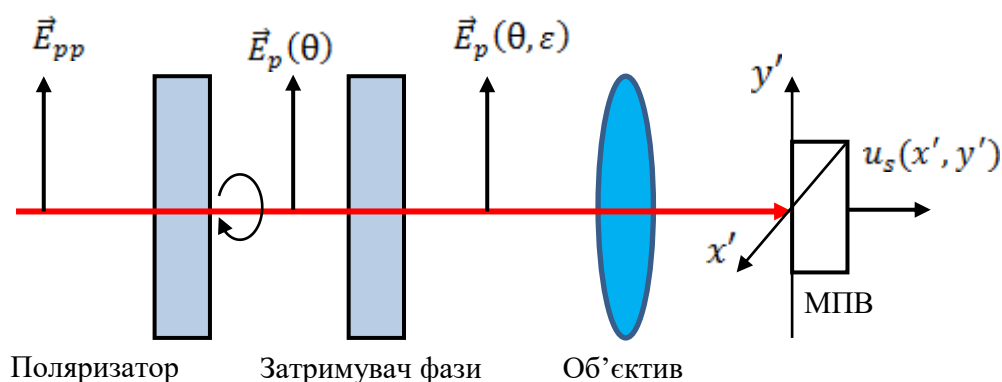


Рис. 1. Принцип роботи поляризаційного тепловізора

Розглянемо оптичну систему ПТ, яка складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, чверть-хвильової пластини і ІЧ об'єктива тепловізора (рис. 2). Нехай на вхід оптичної системи надходить паралельний пучок природнього або частково поляризованого випромінювання з амплітудами  $\vec{E}_n$  або  $\vec{E}_{pp}$  відповідно. На виході поляризатора формується лінійно поляризоване випромінювання з вектором  $\vec{E}_{lp}$ , який орієнтований під кутом  $\theta$  відносно осі  $x$ . Після проходження чверть-хвильової пластинки, оптична вісь якої є паралельною поверхні пластини і утворює кут  $\alpha$  з вектором  $\vec{E}_{lp}$  (площиною поляризації), в результаті подвійного променезаломлення в пластині утворюються звичайний і незвичайний промені з амплітудами  $E_0$  і  $E_\varepsilon$ . Ці промені розповсюджуються в одному напрямку і мають на виході із пластинки різницю фаз

$$\Delta\varphi = \varepsilon = k \cdot d = \frac{2\pi}{\lambda}(n_0 - n_\varepsilon)d, \quad (1)$$

де  $d$  – товщина пластини,  $n_0$  і  $n_\varepsilon$  – показники заломлення для звичайного і незвичайного променів відповідно.

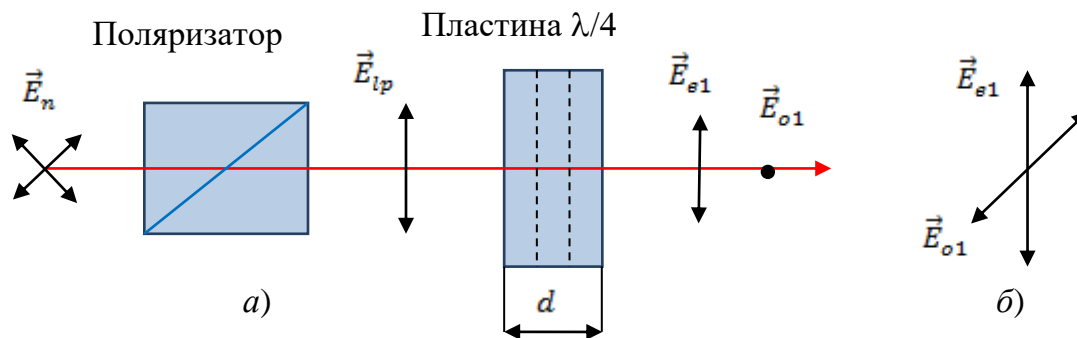
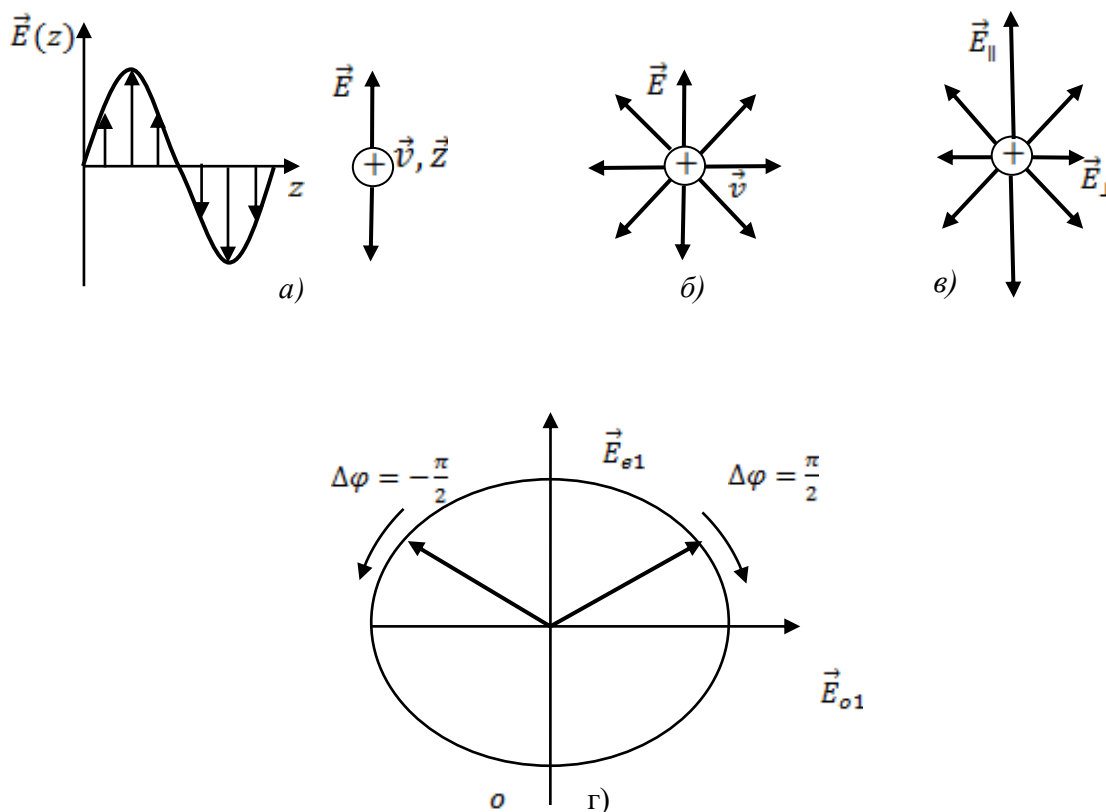


Рис. 2. Схема для дослідження поляризації випромінювання (а) і її векторна модель (б)

В сучасних ПТ використовуються три методи отримання поляризаційного зображення: обертання поляризатора, обертання фазової пластинки і використання МПВ, кожен піксель якої має мікро поляризатор з певною орієнтацією поляризаційної осі [16]. Перший і другий методи мають обмежене використання через наявність механічної системи обертання оптичних елементів і необхідність використання трьох-чотирьох послідовних кадрів. На рис. 3 наведені різні стани поляризації оптичного випромінювання, які можна повністю описати чотирма параметрами Стокса.



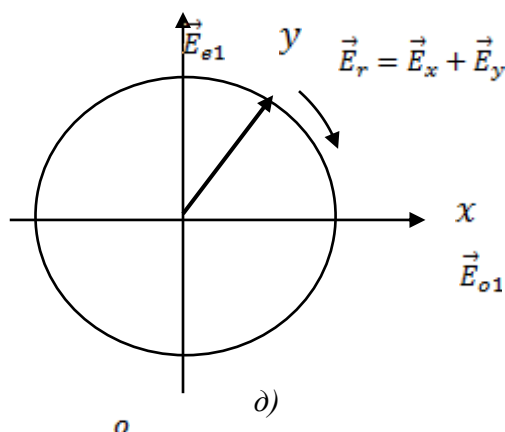


Рис. 3. Стан поляризації випромінювання: а) – лінійно поляризований;  
 б) – природній; в) – частково поляризований; г) – еліптично поляризований;  
 д) – циркулярно поляризований

Перший параметр Стокса  $S_0$  визначає загальну оптичну інтенсивність. Другий параметр Стокса  $S_1$  визначає перевагу записаного оптичного сигналу для горизонтальної поляризації над вертикальною поляризацією. Третій параметр Стокса  $S_2$  визначає перевагу записаного оптичного сигналу з лінійною поляризацією, що орієнтована вздовж  $45^\circ$  над лінійною поляризацією вздовж  $135^\circ$ , які виміряні відносно горизонтального напрямку. Четвертий параметр Стокса  $S_3$  характеризує перевагу право-кругової поляризації над ліво-круговою поляризацією.

Параметри Стокса можна визначити за допомогою двох ортогональних електричних полів випромінювання  $E_x$  і  $E_y$ , які визначаються рівняннями

$$E_x(t) = E_{x0} \exp[j2\pi\nu t - \varphi_x] \text{ і } E_y(t) = E_{y0} \exp[j2\pi\nu t - \varphi_y] \quad (2)$$

де  $E_{x0}$ ,  $E_{y0}$  і  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  – постійні амплітуди і початкові фази цих полів відповідно;  $\nu$  – частота випромінювання. Електричне поле випромінювання, яке пройшло через лінійний поляризатор з віссю поляризації в напрямку  $\theta$ , і фазову пластинку з затримкою на кут  $\varepsilon = \varphi_x - \varphi_y$ , визначається рівнянням (3):

$$E_1(\theta, \varepsilon) = E_x \cos\theta + E_y \exp(j\varepsilon) \sin\theta. \quad (3)$$

Розглянемо особливості застосування поляризаторів і фазових пластинок в оптичних системах ПТ.

## Поляризатори для ІЧ області спектру

Поляризаційний оптичний елементом є будь-який оптичний елемент, який змінює стан поляризації випромінювання [15]. Поляризатори і фазові пластинки (затримувачі фази, retarder) є поляризаційними оптичними елементами.

*Загальні положення*

*Поляризатор* – це оптичний елемент, що призначений для створення поляризованого світла незалежно від властивостей вхідного світла. Бажаний стан поляризованого світла може бути лінійним, круговим або еліптично поляризованим (рис. 3), а оптичний елемент, що призначений для створення одного із цих станів, називається лінійним, круговим або еліптичним поляризатором. В поляризаторах використовуються такі оптичні явища як поглинання, заломлення, відбивання, подвійне променезаломлення і дифракція випромінювання.

Лінійний поляризатор має два параметра пропускання: основний головний коефіцієнт пропускання  $T_1$  і другорядний головний коефіцієнт пропускання  $T_2$ . Параметр  $T_1$  визначається як відношення інтенсивності на виході поляризатора  $I_{p, \max}$  до інтенсивності на вході  $I_0$ , коли падаючий промінь лінійно поляризований в азимуту коливань, який забезпечує максимальний коефіцієнт пропускання. Аналогічно параметр  $T_2$  визначається для мінімального коефіцієнта пропускання. Таким чином

$$T_1 = \frac{I_{p, \max}}{I_0}; \quad T_2 = \frac{I_{p, \min}}{I_0}. \quad (4)$$

Відношення  $R_t = T_1/T_2$  називають *основним коефіцієнтом пропускання (коефіцієнтом екстинкції)* поляризатора. Для поляризаторів високої якості цей коефіцієнт може досягати  $10^5$ . Середнє значення основних коефіцієнтів пропускання називають загальним коефіцієнтом пропускання

$$T_t = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (5)$$

Параметр  $T_t$  визначається як відношення інтенсивності на виході поляризатора до інтенсивності вхідного неполяризованого променя.

Закон Малюса для ідеального поляризатора має вигляд

$$I_{id}(\theta) = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta. \quad (6)$$

Для реального поляризатора закон Малюса має вигляд

$$I_r(\theta) = I_{90}(I_0 - I_{90})\cos^2\theta. \quad (7)$$

### Поляризатори з дротяною сіткою

В ІЧ області спектру широко використовуються поляризатори у вигляді плоскої ґратки, що утворена паралельними дротами (wire grid polarizer, WGP) [15, 16]. Такий поляризатор формує лінійно поляризоване випромінювання в площині, перпендикулярній дротам. Відстань між дротами повинна бути меншою, ніж довжина хвилі. Дротяна ґратка наноситься на підкладку, поверхня якої має анти відбиваюче покриття. Випромінювання, яке є поляризованим паралельно дротам, відбивається. Період ґратки ІЧ поляризаторів зазвичай складає 0.5 мкм і більше.

Оскільки втрати на відбивання і поглинання зменшують коефіцієнт пропускання дротяних ґраток, на підкладку наносять просвітлюючі покриття. Тому його якість і ахроматичність є важливими факторами при виготовленні дротяних ґраток. Комерційні поляризатори на основі дротяних ґраток мають основний коефіцієнт пропускання (20 – 10000) для лінійної поляризації випромінювання в режимі пропускання в спектральному діапазоні від 1.5 мкм до міліметрових довжин хвиль.

Типові технічні характеристики дротяних поляризаторів наведені в табл. 1.

*Таблиця 1*

### Технічні характеристики дротяного поляризатора

Параметри при $\lambda = 5$ мкм	Технічні характеристики
Ефективність пропускання, $T_1$ , %	90
Пропускання небажаного випромінювання, $T_2$ , %	0.4
Ступінь поляризації, $(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$ , %	99
Коефіцієнт екстинкції, $T_1/T_2$	225

В [17] розглядається ПЧ дротяний поляризатор, який складається із ґратки з періодом 400 нм на фотозатверджуваній плівці товщиною 30 мкм. Ґратка виготовлена із золота з використанням термічного напилення і зняття відбитка з плівки в умовах підвищеної вологості. Поляризатор має поперечне магнітне пропускання більше 75 % в діапазоні довжин хвиль (4 – 5.5) мкм і коефіцієнт екстинкції більше 20 дБ в діапазоні (2.5 – 7.5) мкм. Максимальний коефіцієнт екстинкції більше 28 дБ для довжини хвилі 6.5 мкм. Такий плівковий поляризатор з високим коефіцієнтом пропускання є дешевшим порівняно із звичайними ПЧ поляризаторами.

В [16] описано процес виготовлення дротяного поляризатора для пікселів мікроболометричного МПВ. Дротяна сітка із золота наноситься на підкладку, яка має низькі втрати для довжини хвилі падаючої хвилі, тобто мала уявна і реальна частина показника заломлення  $n$ ,  $k$  [18] повинні мати мінімальні величини. Ідеальне рішення цієї проблеми – механічне розташування золотої сітки в повітрі, що технологічно неможливо. Тому були використані підкладки з різними показниками заломлення (рис. 4).

Проведено чисельне моделювання розповсюдження ТМ і ТЕ полів для різних дротяних мереж (період, товщина металу, матеріали підкладки та довжини хвиль) із використанням теорії дифракційних ґраток [19]. Якщо вектор електричного поля є паралельним до границі поділу двох середовищ, то говорять про ТЕ-поляризацію хвилі. Якщо паралельним границі поділу двох середовищ є вектор магнітного поля, то випромінювання вважають ТМ-поляризованим. Метою цього моделювання є пошук геометричних розмірів ґратки, коли коефіцієнт екстинкції поля ТМ/ТЕ на виході поляризатора перевищує 100:1, значення пропускання ТМ перевищує 80 %.

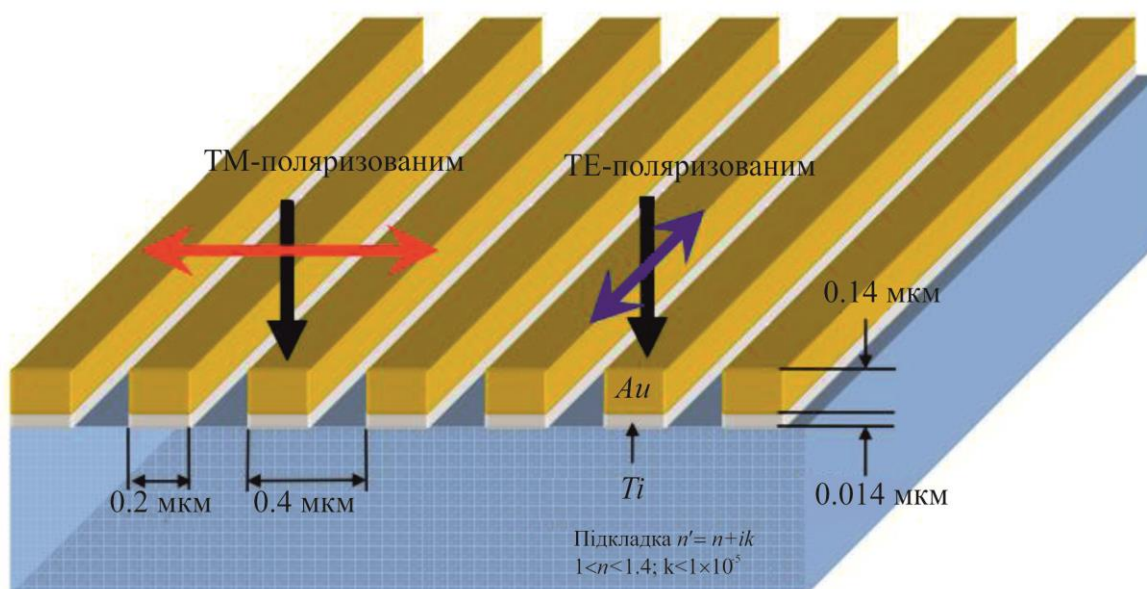


Рис. 4. Ілюстрація поляризатора сітки із золотого дроту на підкладці з низьким значенням показника заломлення для  $n$  і  $k$  та різними геометричними розмірами [15]



Спрощений варіант оптичної системи ПТ використовує фазову пластинку, що обертається, за якою розташований фіксований лінійний поляризатор, який дозволяє отримати декілька послідовних зображень для визначення параметрів Стокса по усьому полю зору. Альтернативний метод – це поле зору, яке просторово поділено на суперпікселі, в кожному з яких параметри Стокса визначаються одночасно. Кожна комірка суперпікселя має окремий дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації.

Ключовим елементом оптичної системи ПТ є чверть-хвильова пластинка, призначена для відповідного просторового поділу зображення. В таких пластинках можуть використовуватись різні фізичні явища: відбивання під кутом Брюстера, подвійне променезаломлення, дифракція випромінюванні на дротяній ґратці з малим періодом. Такі підхвильові (subwavelength) ґратки мають ефективний показник заломлення, який залежить від поляризації вхідного випромінювання. Цей ефект відомий як подвійне променезаломлення і може бути використаний для створення хвильової пластинки.

В [16] наведені результати виконання проекту в Sandia National Laboratories (Albuquerque, New Mexico, USA) по розробці мікро поляризаційного пристрою для довгохвильового інфрачервоного випромінювання для поляриметричної візуалізації. Інформація про поляризаційний стан випромінювання від об'єкта і фону може допомогти виявити і розпізнати об'єкти, що мають інтерес для різних задач дистанційного зондування та для військових застосувань. У той час як традиційні послідовні поляриметричні зображення створюють сцени з інформацією про поляризацію за допомогою серії зібраних зображень, використання МПВ, кожен піксель якого має поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації, дозволяє за рахунок обробки сигналів з пікселів визначати розподіл в площині зображення усіх чотирьох параметрів Стокса одночасно.

На рис. 5 наведена модель суперпікселя МПВ, який складається із чотирьох комірок, що мають окремі мікро поляризатори з різними орієнтаціями площини поляризації. Орієнтація дротів у кожній комірці є різною, що призводить до того, що кожна комірка утворює поляризатор, оптична вісь якого утворює кути  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $135^\circ$  з оптичною віссю ретардера. Таким чином, використання суперпікселя дозволяє в одному кадрі одночасно отримувати сигнали на виході окремих комірок для різних кутів поляризації. Обробка цих сигналів дає змогу розрахувати компоненти вектору Стокса, який визначає поляризаційні характеристики випромінювання об'єкта спостереження [16]:

$$S_0 = 1; S_1 = \{2I(0^\circ, 0) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)];$$

$$S_2 = \{2I(45^\circ, 0) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)];$$

$$S_3 = \{2I(135^\circ, \pi/2) - [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)]\} / [I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0)].$$

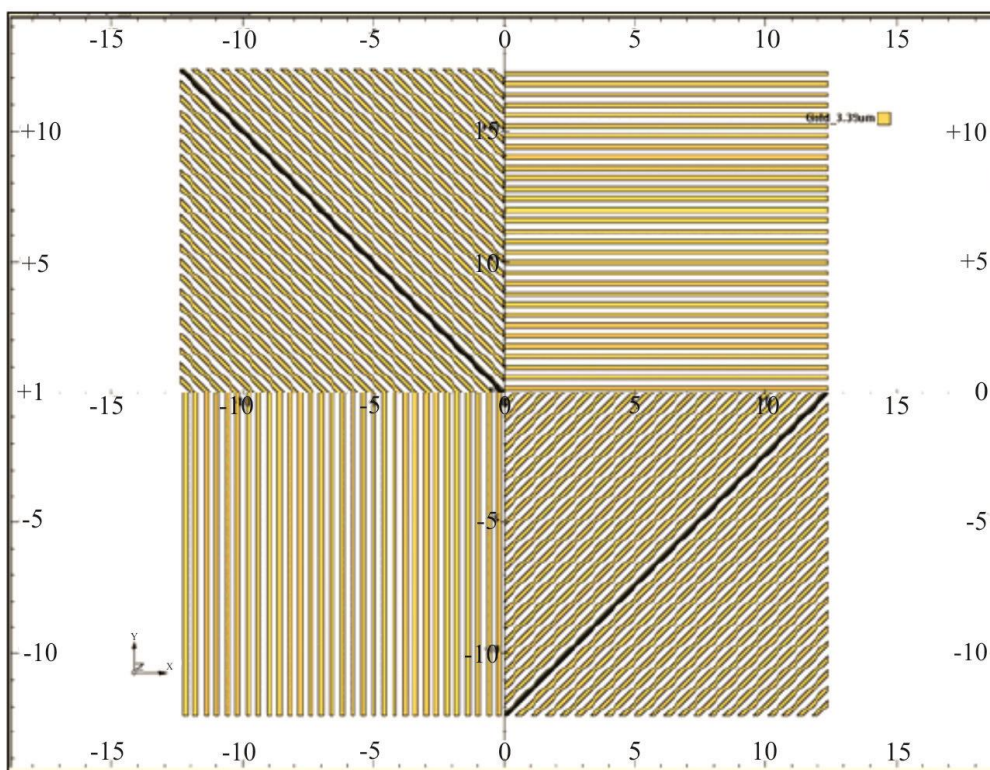


Рис. 5. Модель суперпікселя МБМ

Комерційні поляризатори для ІЧ області спектру постачаються на ринок деякими оптичними фірмами, наприклад, Edmund & Tydex. Такі поляризатори призначені для лінійної поляризації випромінювання в режимі пропускання в спектральному діапазоні від 1,5 мкм до міліметрових довжин хвиль. Вони є різновидністю дифракційних ґраток і нарізуються на кристалічній або полімерній підкладці. Ґратка поляризатора є набором штрихів трикутного профілю. На одну із граней кожного штриха наноситься алюмінієве покриття. В залежності від матеріалу підкладки, поляризатори виготовляють по технології виробництва дифракційних ґраток.

Фірма Edmund Optics поставляє на ринок поляризатори за спеціальною голографічною технікою, завдяки якій відстань між дротами становить мікрометри [20]. Порівняно із звичайними методами, голографічний метод створює тонший інтервал пазів, що оптимізує характеристики для коротких довжин хвиль. Створюються голографічні дротяні поляризатори з фтору барію ( $BaF_2$ ), селеніду цинку ( $ZnSe$ ), бромі-йодиду талію (KRS-5) та германію ( $Ge$ ).

В табл. 2 наведені характеристики дротяних поляризаторів, а на рис. 6 зображено зовнішній вигляд поляризатора [20].

Таблиця 2

Технічні характеристики дротяних поляризаторів

Матеріал підкладки	ZnSe	Ge	KRS-5
Спектральний діапазон, мкм	(1.5 – 14)	(8 – 14)	(2 – 30)
Стандартна апертура, мм	D25 × 25	D25 × 25	D34
Розмір оправы для стандартної апертури, мм	D42 × 8	D42 × 8	-
Ефективний коефіцієнт пропускання, $T_1$	65- 70 % з одностороннім просвітлюючим покриттям 50 % без покриття	>50 % з одностороннім просвітлюючим покриттям	60 %
Пропускання небажаної поляризації, $T_2$	<0.1 % для 10 мкм	<0.1 % для 10 мкм	-
Ступінь поляризації $(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$	>99 % для 10 мкм	>99 % для 10 мкм	
Фірма виробник	TYDEX	TYDEX	Edmund Optics

Для фізико-математичного моделювання дротяних поляризаторів, період яких є набагато меншим за довжину хвилі, використовується теорія зв'язаних хвиль [16, 19].



а)



б)

Рис. 6. Поляризатор KRS-5 (а) і фазова пластинка (б) фірми Edmund Optics [18]

### **Чверть-хвильова пластинка**

В [16] продемонстрована можливість виготовлення і використання дротяних поляризаторів та дротяних ахроматичних фазових пластинок, які забезпечують необхідні коефіцієнт екстинкції та затримку фази. Результати тестування мікро поляризаційних суперпиксельних масивів вказують на те, що кожен елемент (поляризатор та фазова пластина) виготовляється на власній підкладці, оскільки є занадто чутливими до перехресних впливів. Цей перехресний вплив є наслідком дифракції від періодичних структур мікро поляризаторів та/або мікрохвильових пластин. Дифраговане світло поширюється всередині підкладки до наступного елемента або у

вільний простір. Для зменшення впливу цього явища на температурне і просторове розділення пропонується мікро поляризатори інтегрувати в матричну структуру МПВ під час його виготовлення. Двопроменезаломлюча хвильова пластинка виготовляється на власній підкладці та є сумісною із активною зоною інтегрованої структури «мікро поляризатор – піксель». Хвильова пластинка повинна мати двостороннє просвітлююче покриття. Такий підхід значно ускладнює процес виготовлення оптико-електронної системи ПТ.

Чверть-хвильова пластинка (ретардер) може бути виготовлений у вигляді ромбічної призми або хвильової пластинки. Такі оптичні елементи часто називають компенсаторами, наприклад, компенсатор Бабіне-Солейля (Babinet-Soleil). Ретардери можуть бути розраховані на певну довжину хвилі або для широкої області спектру (ахроматичні компенсатори).

*Затримувачі фази на основі одновісних кристалів.*

Зміну різниці фаз в компенсаторах можна досягти використанням анізотропних одновісних кристалах, в яких оптична вісь є паралельною граням кристала:

$$\Delta\varphi = \varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o). \quad (8)$$

Оптична різниця ходу обумовлена двома параметрами: товщиною пластинки  $d$  і подвійним променезаломленням  $(n_e - n_o)$ . Для додатних кристалів  $n_e > n_o$ . Незвичайний промінь з показником заломлення  $n_e$  є поляризованим паралельно оптичній осі, а звичайний промінь з показником заломлення  $n_o$  є поляризованим перпендикулярно оптичній осі.

*Повільна вісь* – це напрямок в середовищі, з найбільшим високим показником заломлення  $n_e$ , тобто для одновісного додатного середовища це буде його оптична вісь. *Швидка вісь* – це напрямок в середовищі з найменшим показником заломлення  $n_o$ .

Найбільш розповсюдженими комерційними затримувачами є чверть-хвильові і пів-хвильові пластинки, які забезпечують рівницю фаз між  $E_s$  і  $E_p$  компонентами рівну  $\pi/2$  і  $\pi$ . Чверть-хвильовий ретардер створює кругову поляризацію, коли азимут лінійно поляризованого падаючого світла утворює кут  $45^\circ$  зі швидкою віссю. Пів-хвильовий ретардер формує лінійно поляризоване світло, площина поляризації якого повернута на кут  $2\theta$ , коли азимут частково поляризованого падаючого світла знаходиться під кутом  $\theta$  відносно швидкої осі.

*ПЧ ахроматичний ретардер.*

На рис. 7 наведено схему роботи призматичного ретардера, в якому не відбувається відхилення пучка променів [13]. В оптичному елементі відбувається два повних внутрішніх відбивання (ПВВ, total internal reflection) в точках  $A_1$ ,  $B_1$  і  $A_2$ ,  $B_2$  і відбивання на межі повітря-метал в точках  $C_1$ ,  $C_2$ .

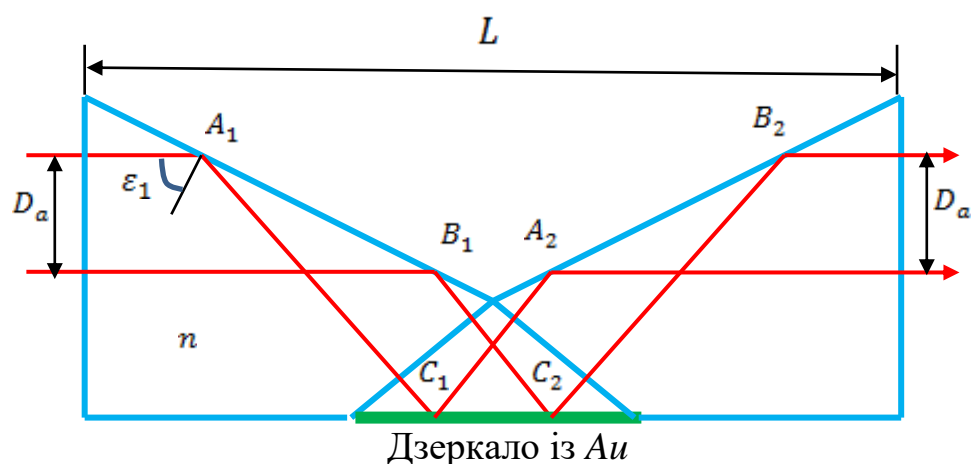


Рис. 7. Інфрачервоний ахроматичний призматичний ретардер

Принцип роботи призми ґрунтується на тому, що між плоскополяризованими компонентами  $E_s$  і  $E_p$  вхідного випромінювання відбуваються значні фазові зсуви в точках ПВВ. Ці фазові зміни (різниця фаз) розраховуються за формулами [13]

$$\delta_{pr,s} = 2 \arctg \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \varepsilon_1 - 1}}{n \cos \varepsilon_1}, \quad (9)$$

$$\delta_{pr,p} = 2 \arctg \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \varepsilon_1 - 1}}{\cos \varepsilon_1}, \quad (10)$$

де  $\varepsilon_1$  – кут падіння, а  $n$  – показник заломлення матеріалу призми (рис. 7).

Лінійна затримка, яка пов'язана з ПВВ, є чистим фазовим зсувом між двома компонентами  $E_s$  і  $E_p$ :

$$\Delta_{pr} = \delta_{pr,p} - \delta_{pr,s}. \quad (11)$$

Крім того, при відбиванні від металу спостерігаються фазові зсуви між компонентами  $E_s$  і  $E_p$ :

$$\Delta_{met} = \delta_{met,p} - \delta_{met,s}. \quad (12)$$

Тоді повна затримка для двох ПВВ і відбивання від металу дорівнює

$$\Delta\varphi = 2\Delta_{pr} + \Delta_{met}. \quad (13)$$

Показники заломлення оптичних матеріалів, які добре пропускають випромінювання в ІЧ діапазоні спектру, є вищим, ніж показники заломлення для видимого діапазону. Як правило, для ІЧ діапазону вони більше 2.0, а видимого діапазону вони знаходяться в межах (1.4 – 1.7). Більш

високі показники заломлення для ІЧ діапазону призводять до більших фазових затримок між компонентами  $E_s$  і  $E_p$  для певного кута падіння, ніж для видимого діапазону. Призматичний затримувач для ІЧ випромінювання, який має більше двох ПВВ, буде мати великі розміри, що визиває певні труднощі при його застосуванні.

Призми виготовляють із однорідних матеріалів, в яких відсутнє подвійне променезаломлення. Таким вимогам в ІЧ діапазоні спектру задовольняє селенід цинку, сульфід цинку, германій і арсенід галію. Для виготовлення дзеркальних поверхонь використовують золото, срібло, мідь, алюміній. Перевагу віддають золоту, яке має високий коефіцієнт відбивання в ІЧ діапазоні і значну стійкість до корозії.

Кути падіння на вході і виході двох призм обирались такими, щоб зменшити френелівські втрати на відбивання. В табл. 3 наведені параметри ретардера із селену цинку і золотого дзеркала, який забезпечує зміну оптичної довжини на  $\lambda/4$  в діапазоні (8 – 14) мкм. Розрахунок зроблено для довжини хвилі 10 мкм [14].

Таблиця 3

Числові дані ІЧ ахроматичного ретардера

Довжина хвилі $\lambda$ , мкм	Показник заломлення $ZnSe, n$	Показник заломлення $Au, n$	Індекс екстинкції $Au, k$	Загальна фазова затримка $\delta$ , град
8	2.418	4.93	57.6	89.91
10	2.407	7.62	71.5	90.02
12	2.394	10.8	85.2	90.04
14	2.378	14.5	98.6	89.98

Використання дрютяної ґратки підхвильової довжини призводить до утворення подвійного променезаломлення, яке забезпечує бажану різницю фаз, а також дисперсію, що допомагає проектувати ахроматичну фазову пластинку [16]. Ефективна теорія середовища моделює підхвильову ґратку як тонку плівку з ефективним показником, що визначається матеріалами ґратки та поляризацією падаючого випромінювання.

Для виробництва комерційних ІЧ ретардерів фірма Edmund Optics використовує дрютяні

гратки, що працюють в нульовому порядку дифракції [20]. Порівняно з фазовими пластинами кількох порядків, пластини нульового порядку забезпечують збільшене пропускання та нижчу чутливість до зміни температури. Ці пластинки виготовляються із фазовою затримкою на  $\lambda/4$  або  $\lambda/2$  в широких спектральних діапазонах і вони ідеально підходять для різноманітних приладів, які працюють в ІЧ діапазоні.

Характеристики комерційної фазової пластинки наведені в табл. 4, а зовнішній вигляд зображено на рис. 6б.

Таблиця 4

## Характеристики фазової пластинки фірми Edmund Optics

Затримка	$\lambda/4$
Спектральний діапазон, мкм	(3 – 9)
Діаметр оправы, мм	25.4
Апертура, мм	10
Товщина, мм	8
Матеріал фазової пластинки	Тіогалат кадмію
Коефіцієнт пропускання	0.5

**Рекомендації по вибору ІЧ поляризатора і фазової пластинки**

Наведені вище дослідження свідчать про таке:

1. Практичного використання в ПТ заслуговують в першу чергу дротяні поляризатори (ДП), які мають ряд переваг порівняно з поляризаторами на основі закону відбивання Брюстера, а саме:

- мають відносно високий коефіцієнт пропускання;
- формують випромінювання з високим ступенем поляризації;
- мають малі габарити і вагу.

Головними недоліками ДП є: значні хроматичні спотворення (дисперсія); технологічні складності їх виготовлення, що обумовлює їх високу вартість.



2. Фазову пластинку (ретардер) можна виготовити, використовуючи:

- подвійне променезаломлення, що є проблематичним для спектральної області (8 – 14) мкм;
- закон повного внутрішнього відбивання і відбивання випромінювання на межі повітря-метал. Однак така фазова пластинка має великі габаритні розміри, що ускладнює її використання в малогабаритних тепловізорах;
- дифракцію випромінювання на дротяній дифракційній ґратці. Така дифракційна ґратка певної структури забезпечує фазову затримку на  $90^\circ$  в широкому спектральному діапазоні.

3. Перспективним напрямком створення ПТ є використання МБМ, кожен піксель якої має дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації. Чотири сусідні пікселі утворюють суперпіксель, який дає можливість одночасно визначати чотири параметри вектору Стокса без використання оптико-механічної системи сканування. Використання МБМ з мікро поляризаторами має значні переваги:

- відсутність оптико-механічної системи сканування (обертання) поляризатора або фазової пластинки;
- можливість одночасно вимірювати усі параметри Стокса в одному кадрі зображення;
- спрощена електронна система обробки сигналів з пікселів МПВ для визначення параметрів вектору Стокса;
- малі розміри оптичної системи і невелике енергоспоживання ПТ.

Головними недоліками ПТ, які використовують МБМ з мікро поляризаторами є:

- технологічні труднощі виготовлення таких МБМ з мікро поляризаторами і висока вартість таких матриць;
- додаткові спотворення зображення, що обумовлені дифракцією випромінювання після проходження дифракційної ґратки і його поширенням всередині підкладки до наступного елемента.

## Висновки

Глибоке розуміння фізичних процесів перетворення інфрачервоного випромінювання в поляриметричному тепловізорі дозволяє провести дослідження оптичної системи тепловізора і обґрунтувати вибір поляризатора і фазової пластинки для ефективного отримання поляризаційних характеристик випромінювання від об'єкта спостереження і фону.

В якості інфрачервоного поляризатора доцільно використовувати комерційні дротяні поляризатори. Для проведення лабораторних досліджень поляризаційних властивостей випромінювання можна використовувати закон відбивання Брюстера від пластинки із германію.

В поляриметричних тепловізорах, що працюють в широкому спектральному діапазоні, в якості інфрачервоної ахроматичної фазової пластинки необхідно використовувати комерційні ретардери на основі дротяної дифракційної ґратки. Для проведення експериментальних досліджень можна використовувати інфрачервоний призматичний ретардер.

Перспективним напрямком створення сучасного поляриметричного тепловізора є використання мікроболометричної матриці, кожен піксель якої має дротяний мікро поляризатор з певною орієнтацією площини поляризації. Чотири сусідні пікселі утворюють суперпіксель, який дає можливість одночасно визначати чотири параметри вектору Стокса без використання оптико-механічної системи сканування.

Подальші дослідження слід направити на розробку математичної моделі ТП, яка дала б змогу розраховувати температурне і просторове розділення, обґрунтувати методи їх підвищення, що є важливим для екологічного моніторингу, моніторингу природних ресурсів, систем теплового спостереження широкого застосування[21, 22].

## Література

1. Анатичук Л.І. Критерій ефективності термоелектричних перетворювачів енергії, що використовують теплові відходи // Термоелектрика. – № 4. – 2020. – С.59-63.
2. Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В. Автоматизація та комп'ютеризація процесів вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних та холодильних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 63-70.
3. Vollmer Michael. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – pp. 788.
4. Tooley R. D. Man-made target detection using infrared polarization / R. D. Tooley // Polarization considerations for optical systems II. – International Society for Optics and Photonics, 1990. – Vol 1166. – pp 52-60.
5. Zhang Y. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information / Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu // Journal of Electronic Imaging. – 2017. – Vol 33004. – №. 1.
6. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Sokol B.V. Temperature resolution of computerintegrated polarization thermal imager. Journal of Thermoelectricity, 2020, № 4, p. 22-37.
7. Kaplan Herbert. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment / Herbert Kaplan. – 3rd ed. – SPIE Press (Washington). – 2007. – 236 p.
8. Yang Bin. Polarization Remote Sensing Physical Mechanism, Key Methods and Application / Bin Yang, Taixia Wu, Wei Chen, Yanfei LI, Yuri Knjazihhin and other. – The Internation Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Wuhan, China. – 2017. – Vol XLII-2/W7. – pp 956–960.
9. Gurton K.P. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging / K.P. Gurton, A.J. Yuffa, Videen G.W. // Optical Society of America. – 2014. – Vol 39, No 13. – pp 3857–3859.
10. Gurton K.P. Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging / Kristan P. Gurton and Melvin Felton // OSA. – 2012. – Vol 20. – No 20. –pp 22344 – 22359.
11. Russell A. Chipman. Polarized Light and Optical Systems / A. Chipman Russell, Wai-Sze Tiffany Lam, Young Garam. – Taylor & Francis Group, LLC.– 2019. – 982p.

12. Kolobrodov, V. G. (2020) “Computer Modelling Technologies of Optical System of Polarizing Thermal Imager”, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, (83), pp 69–74. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.69-74.
13. Zunyi Sun, Weiqi Jin, Guoguo Kang, Li Li, Jianguo Yang. A temperature-controlled mid-wave infrared polarization radiation source with adjustable degree of linear polarization. *Measurement*, Volume 196, 15 June 2022, 111210. Doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111210.
14. J. Peterson, G. L. Jensen, J. A. Kristi, and J. A. Shaw, “Polarimetric imaging using continuously spinning polarizer element,” *Proc. SPIE*, 4133, 292-300, 2000.
15. Goldstein D.H. *Polarized Light*. Third edition / Dennis H. Goldstein. – 2011. – CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. – London New York. – 786 p.
16. Kemme Shanalyn A. *Micropolarizing Device for Long Wavelength Infrared Polarization Imaging* / Shanalyn A. Kemme, Alvaro A. Cruz-Cabrera, Robert R. Boye, Tony Carter, Sally Samora, Chuck Alford, Joel R. Wendt, Gregory A. Vawter, Jody L. Smith // Sandia National Laboratories. – Albuquerque, New Mexico (USA). – 2006. – 60 p.
17. Itsunari Yamada. *Infrared wire-grid polarizer with an ultrathin photoimprinted polymer film*” / Itsunari Yamada, Tsuyoshi Akiyama // *Optical Engineering* 58(5), 057104 (2019), doi: 10.1117/1.OE.58.5.057104.
- 18 Kolobrodov, V.G., Mykytenko, V.I., Tymchyk, G.S. Polarization model of thermal contrast observation objects. *Journal of Thermoelectricity*, 2020, 2020(1), pp. 36–49.
- 19 Born M. *Principles of optics*, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. 7th edition. – 2002 p.
- 20 Wire Grid (Reflective) Polarizers *Електронний ресурс* <https://www.edmundoptics.com/c/wire-grid-reflective-polarizers/1337/> Дата звернення 10.11.2022.
- 21 L. Globa, S. Dovgiy, O. Kopyika and O. Kozlov, “Approach to building uniform information platform for the national automated ecological information and analytical system,” In: *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, 3021, pp. 53–65.
- 22 Globa, L., Dovgiy, S., Kopyika, O. & Kozlov, O. Approach to Uniform Platform Development for the Ecology Digital Environment of Ukraine. *Book: Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems*. 83–100 DOI : 10.1007/978-3-031-16368-5

Надійшли до редакції: 08.02.2022

**V.G. Kolobrodov**, *doc. techn. sciens, professor*  
**V.I. Mykytenko**, *doc. techn. sciences, assist professor*  
**G.S. Tymchik**, *doc. techn. sciens, professor*  
**M.S. Kolobrodov**

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine  
*e-mail: [deanpb@kpi.ua](mailto:deanpb@kpi.ua)*

## **INCREASING THE SENSITIVITY OF COMPUTER-INTEGRATED THERMAL IMAGERS IN THE STUDY OF THERMOELECTRIC PHENOMENA AND REMOTE OBSERVATIONS**

*The work is devoted to the substantiation of the choice of optical polarizing elements for thermal imaging remote observations and measurements. A comparative analysis of the main methods of obtaining polarization images was performed, namely using polarizer rotation, phase plate rotation, and using combined infrared matrix receivers with micro polarizers. Simplified mathematical models of signal transformation in the main optical elements of polarimetric thermal imagers – linear polarizers and phase (quarter-wave) plates - were used for the analysis. The advantage of wire polarizers compared to polarizers based on reflection is shown. It is also substantiated that among the various physical effects causing phase delays – birefringence, total internal reflection and reflection of radiation at the air-metal interface, diffraction on a wire diffraction grating – the use of the latter effect is most acceptable. Bibl. 22, Figs. 7.*

**Key words:** polarimetric thermal imagers, Stokes vectors, polarizer, quarter-wave plate.

### **References**

1. Anatyshuk L.I. (2020). Efficiency criterion of thermoelectric energy converters using waste heat. *J. Thermoelectricity*, 4, 59-63.
2. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2021). Automation and computerization of processes of measuring thermoelectric parameters of materials forming part of generator and cooling thermoelectric modules. *J. Thermoelectricity*, 3, 63-70.
3. Vollmer Michael and Mollman Klaus-Peter (2018). *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications*. Second Ed. Wiley – VCH, Weinheim, Germany.
4. Tooley R. D. (1990). Man-made target detection using infrared polarization. Polarization considerations for optical systems II. – *International Society for Optics and Photonics*, 1166, 52-60.
5. Zhang Y., Shi Z.G., Qiu T.W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *Journal of Electronic Imaging*, 1 33004, №. 1.
6. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Mykytenko V. I., Sokol B.V. (2020). Temperature resolution of

- computer-integrated polarization thermal imager. *J. Thermoelectricity*, 4, 22-37.
7. Kaplan Herbert (2007). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. 3rd ed. SPIE Press (Washington).
  8. Yang Bin, Wu Taixia, Chen Wei, Li Yanfei, Knjazhihin Yuri, et al. (2017). Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Wuhan, China, XLII-2/W7, pp. 956 - 960.
  9. Gurton K.P., Yuffa A.J., Videen G.W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optical Society of America*, 39 (13), 3857–3859.
  10. Gurton K.P., Felton M. (2012). Remote detection of buried land-mines and IEDs using LWIR polarimetric imaging. *OSA*, 20 (20), 22344 – 22359.
  11. Russell A. Chipman, Lam Wai-Sze Tiffany, Garam Young (2019). *Polarized light and optical systems*. Taylor & Francis Group, LLC.
  12. Kolobrodov, V. G. (2020). Computer modeling technologies of optical system of polarizing thermal imager. *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, (83), pp 69–74. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.69-74.
  13. Sun Zunyi, Jin Weiqi, Kang Guoguo, Li Li, Yang Jianguo (2022). A temperature-controlled mid-wave infrared polarization radiation source with adjustable degree of linear polarization. *Measurement*, Volume 196, 111210. Doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111210.
  14. Peterson J., Jensen G. L., Kristi J. A., and Shaw J.A. (2000). Polarimetric imaging using continuously spinning polarizer element. *Proc. SPIE*, 4133, 292-300.
  15. Goldstein D.H. (2011). *Polarized Light*. Third edition. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. London New York.
  16. Kemme Shanalyn A. (2006). Micropolarizing device for long wavelength infrared polarization imaging. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico (USA).
  17. Yamada Itsunari, Akiyama Tsuoshi. (2019). Infrared wire-grid polarizer with an ultrathin photoimprinted polymer film. *Optical Engineering*, 58(5), 057104, doi: 10.1117/1.OE.58.5.057104.
  18. Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I., Tymchyk G.S. (2020). Polarization model of thermal contrast observation objects. *J. Thermoelectricity*, 1, 36–49.
  - 19 Born M., Wolf E. *Principles of optics. 7th ed.* Cambridge University Press.
  - 20 Wire grid (reflective) polarizers. Retrieved from <https://www.edmundoptics.com/c/wire-grid-reflective-polarizers/1337>.
  - 21 Globa L., Dovgiy S., Kopyika O. and Kozlov O. (2021). Approach to building uniform information platform for the national automated ecological information and analytical system, In: *CEUR Workshop Proceedings*, 3021, 53–65.
  - 22 Globa L., Dovgiy S., Kopyika O. and Kozlov O. Approach to uniform platform development for the ecology digital environment of Ukraine. *Book: Progress in Advanced Information and Communication Technology and Systems*. 83–100 DOI: 10.1007/978-3-031-16368-5

Submitted: 08.02.2022

**Філін С.О, док. техн. наук**  
**Вишнівський Віктор**

Західнопоморський технологічний  
університет у Щецині алея Піастів 17,  
Щецин, 70-310, Польша, e-mail: sergiy.filin@zut.edu.pl

---

## **ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ХОЛОДИЛЬНИК ДЛЯ КУПЕ СПАЛЬНИХ ВАГОНІВ**

---

*У даній статті представлена конструкція термоелектричного холодильника, холодильний агрегат якого вбудований в кутову шафу купе спального вагона РКР Intercity моделі 308А. Конструкція холодильного агрегату передбачає кілька варіантів виконання. Холодильник має інноваційну дворівневу систему живлення, що дозволяє зменшити споживання енергії. Холодильна шафа розділена на два відділення, які «обслуговують» два сусідніх купе. Термоелектричний блок холодильника охолоджує обидві камери одночасно. Застосування винаходу дозволяє підвищити рівень комфорту пасажирів залізничного транспорту. Бібл. 11, рис. 9, табл. 1.*

**Ключові слова:** транспортний термоелектричний охолоджувач, дворівнева система живлення, термоелектрична установка

### **Вступ**

Дослідження, наведені в статті, показують рішення, яке можна використовувати для підвищення комфорту пасажирів, що подорожують у спальних вагонах, як правило, у період з квітня по жовтень. Протягом кількох років спостерігається значне потепління клімату [1]. Це призводить до підвищення температури в теплі періоди (наприклад, літній період в Європі). Це впливає на потребу пасажирів поїзда зберігати під час поїздки охолоджені напої чи їжу, квіти чи чутливі до температури ліки. Можливість зберігання цих товарів підвищить комфорт пасажирів, які подорожують на більш довгих маршрутах, а також сприятиме підвищенню стандартів пасажирських перевезень у цих купе. Сучасні тенденції розвитку використання термоелектричних охолоджувачів на транспорті детально описані в тематичній літературі [2], [3]. Серед нових застосувань варто відзначити бар з термоелектричним охолоджувачем, встановлений на борту Boeing-747 (рис. 1).

Термоелектричний охолоджувач вважається найбільш раціональним рішенням серед інших охолоджувачів, що використовуються в транспортних засобах, через численні переваги цього способу охолодження [4]. Однією з переваг його застосування в транспортних засобах є

можливість адаптувати напругу живлення термоелектричного блоку до напруги, що подається в мережах залізничних вагонів, і використання сучасних методів дворівневого регулювання температури в термоелектричних охолоджувачах [5]. Все це дозволяє уникнути використання складних, ненадійних і дорогих енергосистем [4].



Рис. 1. Термоелектричний охолоджувач у барі літака Boeing-747 [2].

Особливо вигідним місцем для розміщення холодильника в купе є шафа (звичайна або кутова), розміщена над умивальником (рис. 2).



Рис. 2. Трьохмісні спальні купе для вагонів 305 Аb (ліворуч) і 308 А (праворуч)

Сконструйований таким чином охолоджувач, порівняно з рішенням встановлення холодильників стоячих в купе окремо, т.е. без спеціально виділеного місця [6], є раціональним рішенням для купе, оскільки не зменшує корисну площу, характеризується меншою вартістю виконання та меншим енергоспоживанням.

### Загальна інформація про спальні вагони виробництва Польщі

Купе спального вагона типу 305Ab, що виготовляється на фабриці *Zakłady Cegielskiego* в Познані з 2004 року, а також купе спальних вагонів інших моделей, оснащені, серед іншого, трьома ліжками, умивальником і однодверною шафою з дерев'яним корпусом (рис. 2). Дана шафа має внутрішні розміри 49 x 17.5 x 59 мм (ширина x глибина x висота), оснащена замком з кульковою засувкою, посередині на задній стінці знаходиться дзеркало, на верхній стінці - лампа освітлення, на бічній стінці - електричне гніздо для підключення бритви. Внутрішній простір шафи розділений горизонтальною полицею. Провідник перед початком рейсу поміщає в неї, наприклад, неохолоджену мінеральну воду (ПЕТ-пляшка 0,5 л для кожного пасажера), булочку або гігієнічний набір (рушник + мило). У купе немає холодильника, єдиний холодильник у вагоні розташований в купе провідника і недоступний для безпосереднього користування пасажиром. Те саме стосується вагонів-ресторанів, де холодильник вбудований до кухонної секції [7].

Більш сучасним спальним вагоном, для якого була запропонована конструкція холодильника, є модель спального вагону 308A. У 2013 році компанія РКР Intercity підписала контракт на реалізацію проекту під назвою «Оновлення рухомого складу РКР Intercity Перемишль – Щецин – II етап». Було замовлено модернізацію 10 спальних вагонів, а виконання було доручено компанії PESA з міста Бидгощ. Перший вагон вийшов на тестові треки у 2015 році (рис. 3).



Рис. 3. Спальний вагон 308А на залізничній станції *Szczecin Główny*



Крім того, в рамках зазначеного проекту були модернізовані автомобілі 1977-1981 років випуску. Цей тендер також включав монтаж нових візків для вагонів. Були встановлені нові коляски типу 39AN без пневматичної подушки на гнучких пружинах. Крім того, у вагоні були встановлені розсувні двері. У спальному вагоні є 9 загальнодоступних купе і одне відділення для провідника. У кожному купе є 3 розкладних ліжка, розташовані горизонтально, одне над одним [8]. Це типовий асортимент спальних купе середнього класу. 3 пасажирських місця в просторі близько 8 м<sup>3</sup> – це висока щільність, яка викликає додаткове підвищення температури в купе. Порівняння обраних транспортних засобів представлено в табл. 1.

*Таблиця 1*

*Щільність людей на кубічний метр вагона*

Транспортний засіб	Тип (модель)	Кількість осіб в салоні у тім (включаючи екіпаж)	Вимір салону (приблизно), м	Об'єм салону, м <sup>3</sup>	Щільність, осіб/м <sup>3</sup>
Літак	Boeing 737-700	126 (4)	20 × 5 × 1.8	200	0.63
Автокар	Setra 500	69 (2)	13.5 × 2.4 × 2.8	90.7	0.76
Залізниця	308А Увесь вагон	28 (2)	24.5 × 2.9 × 4.2	298.41	0.094
	Купе на 3 місця	3	1.66 × 1.94 × 2.5	8.051	0.372

Як видно з Таблиці 1, щільність людей на кубічний метр у повністю укомплектованому купе залізничного вагона більш як в сім разів разів нижча для всього вагона порівняно з повітряним чи автобусним транспортом, а для одного спального купе майже вдвічі менша, ніж у повітряному чи автобусному транспорті, що приносить додаткові переваги, а саме: більшу безпеку під час пандемії коронавірусу. Менша кількість людей на кубічний метр відповідно зменшує ймовірність зараження, наприклад, вірусом SARS = CoV-2 чи будь-яким іншим вірусом.

На користь залізниці свідчить ще один факт: викиди CO<sub>2</sub> на одного пасажера становлять лише 24 г/км [9] Це більш ніж у 3 рази менше, ніж в автомобільному транспорті (102 г/км) і приблизно в 10 разів менше, ніж в повітряному транспорті (244 г/км).

Модернізація залізничного вагона 308А полягає, в тому числі, в тому, що вагон пристосований для перевезення людей з обмеженими можливостями; одне спеціальне купе для двох осіб з туалетом було адаптоване для інвалідів-візочників. Збоку від цього купе є ручний пандус, який дозволяє інвалідному візку заїхати у залізничний вагон 308А [8].

## Опис холодильника і вибір варіанту конструкції

Двокамерний термоелектричний охолоджувач для залізничного вагона моделі 305Ав спроектовано в декількох варіантах, які відрізнялися розташуванням агрегату (збоку або зверху охолоджувача) і орієнтацією перегородки (поздовжньою, тобто паралельно стіні, що розділяє два купе вагона, або поперечною - перпендикулярно цій стіні).

У першому варіанті холодильник розміщується в отворі стінки 1, що розділяє суміжні купе залізничного вагона, біля зовнішньої стінки 2 вагона, від якої він відділений повітропроводом 3 (рис. 4а). Усередині холодильника є перегородка товщиною 3-4 мм, виготовлена з пластику, розташована вздовж стінки 1. Перегородка 4 розділяє внутрішній простір холодильника на дві камери однакового об'єму. Доступ до окремих камер в кожному купе вагона можливий завдяки дверям 5 і 5'. Стінки 6 холодильника містять всередині теплоізоляційний матеріал. Блок охолодження складається з холодного радіатора 7, перехідних елементів 8 і 9 з алюмінію, термоелектричного модуля 10, гарячого радіатора 11 з кришкою 12 і вентилятора 13. Блок і, зокрема, радіатор 7, розташовані симетрично по відношенню до поверхні перегородки 4, що забезпечує охолодження обох камер з однаковою холодопродуктивністю. З одного боку перегородка 4 розміщена між ребрами холодного радіатора (як показано на рис. 4), що забезпечує додаткову стабільність її положення та полегшує збірку холодильника.

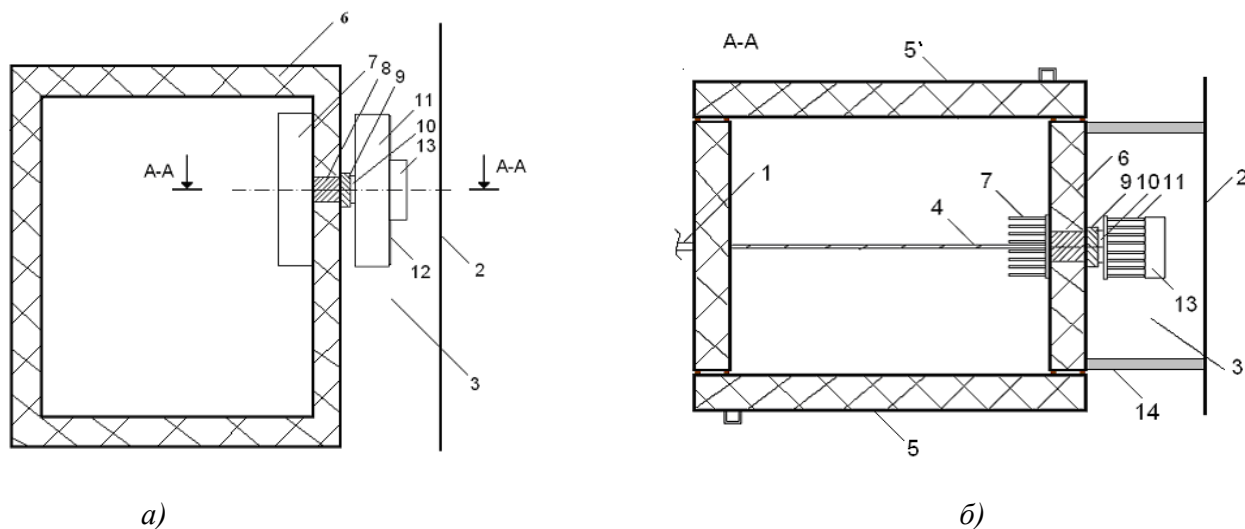


Рис. 4. Схематичний малюнок двокамерного термоелектричного холодильника вагону 305Ав [10] з боковим розташуванням агрегату і поздовжньою перегородкою:

1 - міжкупейна стінка, 2 - зовнішня стінка вагона, 3 - повітропровід, 4 - перегородка, 5, 5' - двері, 6 - нерухомі стінки холодильника, 7 - холодний радіатор, 8, 9 - перехідні елементи, 10 - модуль, 11 - гарячий радіатор, 12 - кришка, 13 - вентилятор, 14 - стінка повітропроводу.

В іншому варіанті спроектованого холодильника агрегат розміщений у верхній стінці корпусу (рис. 5). Перегородка 4 встановлена перпендикулярно стіні 1, що розділяє купе залізничного вагона, завдяки чому створюються дві камери. Перегородка 4 має товщину 2-3 мм. Розміри дверей адаптовані до розмірів камер. У цьому варіанті тепло розсіюється з гарячого

радіатора в простір над холодильником, що ізолюваний від купе залізничного вагона і з'єднується з вентиляційним каналом вагона, що проходить під його стелею. Щоб збільшити корисну ємність камер, ребра радіатора 7 встановлені в поглиблення, зроблене у верхній стінці, як показано на рис. 5.

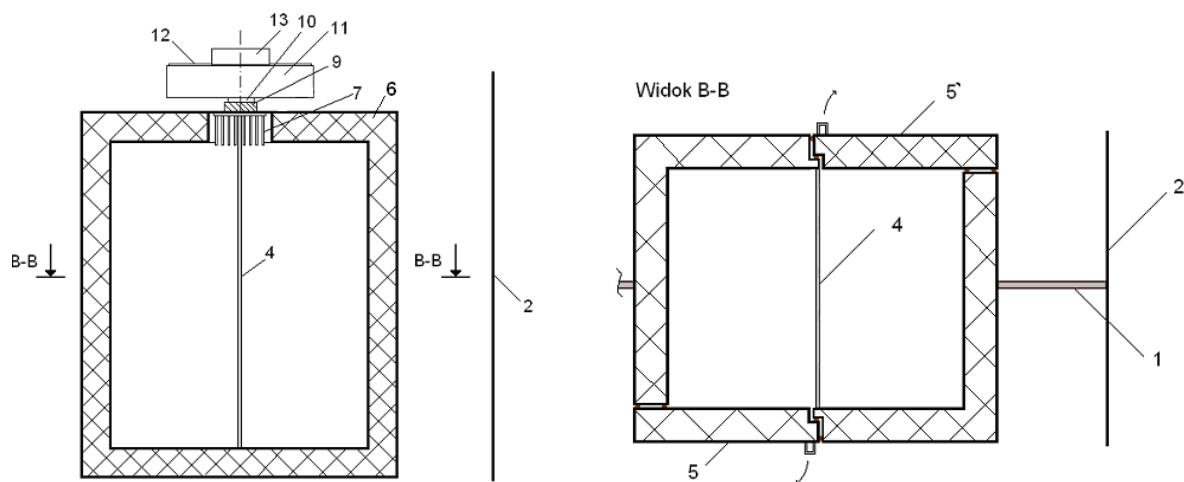


Рис. 5. Схематичний малюнок двокамерного термоелектричного холодильника вагону 305Ab [10] з верхнім розташуванням агрегату і поздовжньою перегородкою. Позиції

Кутова шафа в спальному купе вагону типу 308А має 3 полиці. Знявши верхню полицю (рис. 6, жовта стрілка), утворений простір між стелею та нижньою полицею можна використовувати як камеру до термоелектричного охолоджувача.



Рис .6. Кутова шафа в купе вагону типу 308А

При розміщенні агрегату біля перегородки купе на рівні багажної полиці необхідно ізолювати його від багажу і таким чином забезпечити додатковий захист агрегату. Цієї проблеми можна уникнути, якщо зняти не верхню, а середню полицю. Тоді гаряча сторона агрегату поміститься в простір між верхньою полицею і стелею шафи.

Кутова шафа після вставлення перегородки та внесення конструктивних змін, показаних на рис. 7, має такі внутрішні розміри:

- Ширина: 260 мм (отримано шляхом додавання заміної перегородки);
- Висота: 340 мм (після зняття середньої полиці та підняття верхньої);
- Глибина: 200 мм (усереднено від двох основ трапеції).

Сконструйована таким чином шафа здатна вмістити 1.5-літрову пляшку.

Замінивши стінку між купе на перегородку, можна отримати збільшення обсягу холодильної камери. Графічне порівняння двох варіантів показано на рис.7. Через дуже низьку ймовірність відкриття обох дверей холодильника одночасно запропоноване рішення не погіршує звукоізоляцію між сусідніми купе вагона.

Якщо термоелектричний агрегат буде розташовуватися на верхній полиці кутової шафи, необхідно зменшити висоту дверцят шафи, щоб отримати кращу циркуляцію повітря, що охолоджує гарячий радіатор агрегату.

На рисунках 8 і 9 представлені фрагменти конструкції термоелектричного холодильника для купе вагону моделі 308А. Розрахункове значення теплового навантаження однієї холодильної камери в даному варіанті становило 11.5 Вт. У рамках проекту [11] було обрано тип термоелектричного модуля, розраховано необхідні поверхні теплообміну теплообмінників при прийнятих умовах експлуатації холодильника.

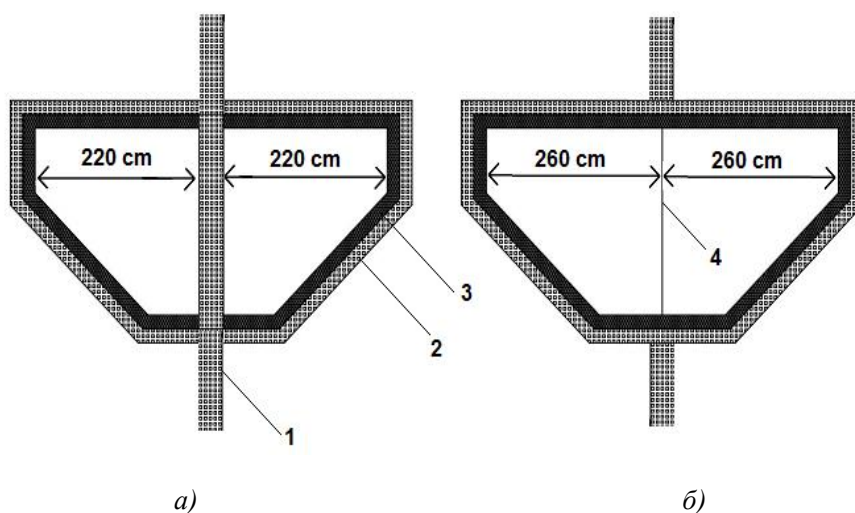


Рис. 7. Порівняння ширини холодильної камери: а - без вирізу вікна в міжкупейній стінці вагона, б) - з використанням міжкамерної перегородки: 1 – перегородка, 2 – меблева плита, 3 - теплоізоляція, 4 – міжкупейна перегородка.

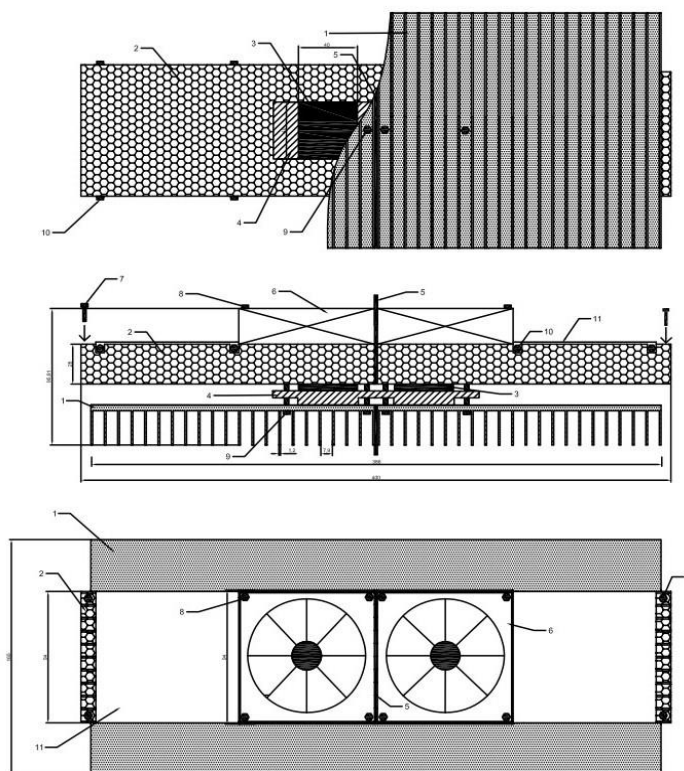


Рис. 8. Агрегат двокамерного термоелектричного холодильника вагону типу 308А [11]:  
1 – теплообмінник холодної сторони, 2 – теплообмінник гарячої сторони,  
3 – термоелектричний модуль; 4 – перехідний елемент, 5 – перегородка,  
6 – вентилятор, 7, 8, 9 – гвинти, 10 – теплоізоляція, 11 – стінка шафи.

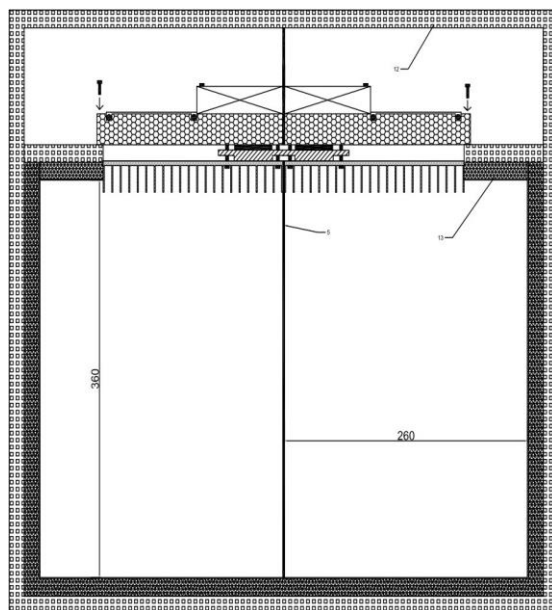


Рис. 9. Вертикальний розріз холодильника вагону типу 308А.  
Позиції як на рис. 8.

## Висновки

1. Спостерігається світова тенденція підвищення комфорту подорожей, особливо під час подорожей залізничним транспортом на великі відстані. Тому важливо надати пасажирам можливість користуватися холодильником у спальному купе.
2. Раціональним рішенням для оснащення купе холодильними пристроями може бути використання термоелектричного охолоджувача.
3. У статті наведено кілька варіантів конструкції термоелектричного холодильника, який може бути використаний для охолодження продуктів у суміжних купе залізничного вагона.
4. Результати дослідження можуть бути цікаві для виробників термоелектричних холодильників і залізничних вагонів, які можуть розглянути можливість впровадження запропонованих рішень.

## Література

1. Climate warming accelerates (Ocieplanie klimatu przyspiesza). No limits, 1, 2020, pp.16-25 (in Polish), <https://us.edu.pl/no-limits-ocieplanie-klimatu-przyspiesza/> (Accessed: 28.08.2021).
2. Pierwsza klasa w Emirates deklaruje konkurencję, <https://mrluxury.pl/2017/12/29/pierwsza-klasa-emirates-deklaruje-konkurencje/> (Accessed: 28.08.2021).
3. Jasińska B., Filin S. Economical transport thermoelectric refrigerators with two-level temperature control: the experience of creation and test results. Journal of Thermoelectricity, 3, 2015, 38-44.
4. Fairbanks J.W. Thermoelectric Applications Review. European Thermoelectric Conference. Odessa, Ukraine, September 10–13, 2007, <https://ect2007.thermion-company.com/ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/10.pdf> (Accessed: 20.09.2021).
5. Filin S., Owsicki A. Principles of design and operation of thermoelectric refrigerators (Zasady projektowania i eksploatacji chłodziarek termoelektrycznych). ZAPOL, Szczecin, 2010 (in Polish).
6. Filin S., Jasińska B., Zakrzewski B., Chmielowski M. Patent RP no. 224189. Way to reduce energy consumption of thermoelectric refrigerator and thermoelectric refrigerator (Sposób redukcji zużycia energii przez chłodziarkę termoelektryczną i chłodziarka termoelektryczna), Published 06.12.2016 (in Polish).
7. Railway dining car. Patent GB 224461 B61D37/00, 13.11.1924.
8. <https://bazawagonow.pl/308A.html> (Accessed: 20.09.2021).
9. PKP z dumą informuje, że mniej truje. Samochód kontra pociąg - sprawdź teraz różnicę w emisji CO2 (spidersweb.pl) (Accessed: 02.06.2021).
10. Filin S., Zakrzewski B. Patent RP nr 217390. Publ. 08.08.2014. Wagon especially sleeping, equipped with thermoelectric refrigerator.
11. Wiśniewski W. Design of a thermoelectric refrigerator for sleeping compartments of railway carriages. (Projekt chłodziarki termoelektrycznej dla przedziałów sypialnych wagonów kolejowych). Bachelor Diploma Project, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Szczecin, 2021.

Надійшли до редакції: 01.03.2022

**Filin S.O., doc. techn sciences**  
**Wisniewski Wiktor**

West Pomeranian University of Technology, Szczecin  
al. Piastow 17, Szczecin, 70-310, Poland;  
*e-mail: sergiy.filin@zut.edu.pl*

## **THERMOELECTRIC REFRIGERATOR FOR SLEEPING CAR COMPARTMENTS**

*In this article, a thermoelectric refrigerator's design was presented, the cooling unit of which is integrated into a corner cabinet in the sleeping car compartment of PKP Intercity model 308A. The design of the cooling unit provides for several execution options. The refrigerator has an innovative two-level power supply system, which allows reducing energy consumption. The refrigerator cabinet is divided into two chambers "serving" two adjacent compartments. The thermoelectric unit of the refrigerator cools both chambers simultaneously. The application of the invention allows increasing the comfort level of rail transport passengers. Bibl. 15, Fig. 4, Table 7.*

**Key words:** thermoelectric transport refrigerator, two-level power supply system, thermoelectric unit.

### **References**

1. Climate warming accelerates (Ocieplanie klimatu przyspiesza). No limits, 1, 2020, pp.16-25 (in Polish), <https://us.edu.pl/no-limits-ocieplanie-klimatu-przyspiesza/> (Accessed: 28.08.2021).
2. Pierwsza klasa w Emirates deklasuje konkurencję, <https://mrluxury.pl/2017/12/29/pierwsza-klasa-emirates-deklasuje-konkurencje/> (Accessed: 28.08.2021).
3. Jasińska B., Filin S. Economical transport thermoelectric refrigerators with two-level temperature control: the experience of creation and test results. Journal of Thermoelectricity, 3, 2015, 38-44.
4. Fairbanks J.W. Thermoelectric Applications Review. European Thermoelectric Conference. Odessa, Ukraine, September 10–13, 2007, <https://ect2007.thermion-company.com/ect2007.its.org/system/files/u1/pdf/10.pdf> (Accessed: 20.09.2021).
5. Filin S., Owsicki A. Principles of design and operation of thermoelectric refrigerators (Zasady projektowania i eksploatacji chłodziarek termoelektrycznych). ZAPOL, Szczecin, 2010 (in Polish).
6. Filin S., Jasińska B., Zakrzewski B., Chmielowski M. Patent RP no. 224189. Way to reduce energy consumption of thermoelectric refrigerator and thermoelectric refrigerator (Sposób redukcji zużycia energii przez chłodziarkę termoelektryczną i chłodziarka termoelektryczna), Published 06.12.2016 (in Polish).
7. Railway dining car. Patent GB 224461 B61D37/00, 13.11.1924.

8. <https://bazawagonow.pl/308A.html> (Accessed: 20.09.2021).
9. PKP z dumą informuje, że mniej truje. Samochód konta pociąg - sprawdź teraz różnicę w emisji CO2 (spidersweb.pl) (Accessed: 02.06.2021).
10. Filin S., Zakrzewski B. Patent RP nr 217390. Publ. 08.08.2014. Wagon especially sleeping, equipped with thermoelectric refrigerator.
11. Wiśniewski W. Design of a thermoelectric refrigerator for sleeping compartments of railway carriages. (Projekt chłodziarki termoelektrycznej dla przedziałów sypialnych wagonów kolejowych). Bachelor Diploma Project, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Szczecin, 2021.

Submitted: 01.03.2022



## 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 сторінки:** «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.І. *Термоелементи и термоэлектрические устройства. Справочник*. Київ, 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*. Матеріали XVII Міжнародного форуму по термоелектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновці, 2017. 64 с.

#### Автореферати дисертацій

Кобиланський 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. Thermoelements [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].