

# ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

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

---

№ 5

2019

---

## 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*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

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

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

Редактори

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

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

Адреса редакції:

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

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

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

---

Підписано до друку: з26.11.2019 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, 2019

## ЗМІСТ

### **Теорія**

<i>Горський П.В.</i> Про вплив інтерметалідів на електричний та тепловий контактні опори термоелектричний матеріал – метал	5
--	---

### **Матеріалознавство**

<i>Анатичук Л.І., Лисько А.В., Кравцов С.О.</i> Про проектування термоелектричного генератора для транспортного передпускового нагрівача великої потужності	18
---	----

### **Конструювання**

<i>Анатичук Л.І., Прибила А.В.</i> Про термоелектричні кондиціонери для танків	29
<i>Прибила А.В.</i> Про підвищення ефективності термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання	38

### **Метрологія і стандартизація**

<i>Анатичук Л.І., Кузь Р.В.</i> Про особливості розвитку робіт по створенню термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів	45
---	----

### **Термоелектричні вироби**

<i>Анатичук Л.І., Тодуров Б.М., Кобилянський Р.Р., Джал.С.А.</i> Про використання термоелектричних мікрогенераторів для живлення електрокардіостимуляторів	68
--	----



УДК 537.32

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



Горський П.В.

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

## ПРО ВПЛИВ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ КОНТАКТНІ ОПОРИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ – МЕТАЛ

Показано, що електричний та тепловий контактні опори термоелектричний матеріал (ТЕМ) метал у структурах з антидифузійними шарами істотно зростають, якщо перехідний контактний шар складається з підшару інтерметаліду та підшару композиту ТЕМ – інтерметалід. У парі телурид вісмуту – нікель таким домінуючим інтерметалідам є  $NiTe_2$ . За загальної товщини перехідного шару телурид вісмуту-дітелурид нікелю рівної 40 мкм електричний контактний опір змінюється в інтервалі від  $1.28 \cdot 10^{-6}$  до  $3.46 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловий – в інтервалі від 0.131 до 0.195 К·см<sup>2</sup>/Вт. З часом цей шар може рости, і, наприклад, за загальної товщини 200 мкм його електричний контактний опір змінюється у тому самому температурному інтервалі від  $6.40 \cdot 10^{-6}$  до  $1.73 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловий – в інтервалі від 0.655 до 0.975 К·см<sup>2</sup>/Вт. Це зростання істотно впливає не лише на споживчі характеристики, а й на надійність, довговічність та ресурсну стійкість термоелектричних перетворювачів енергії. Поряд з цим показано, що композит дітелурид нікелю – телурид вісмуту не є високоефективним термоелектричним матеріалом, але безрозмірна термоелектрична ефективність композиту телурид вісмуту – висоелектропровідні металеві кластери може стати істотно більшою. Знайдено граничну безрозмірну термоелектричну ефективність такого композиту.

**Ключові слова:** контактний опір, нестационарна дифузія, інтерметалід, термоелектричний матеріал, легування, металізований композит, поріг перколяції, нанокластери, оптимальний склад композиту, гранична безрозмірна термоелектрична ефективність, високотемпературна надпровідність.

### Вступ

Відомо, що електричний та тепловий контактні опори ТЕМ – метал справляють істотний вплив на споживчі характеристики термоелектричних перетворювачів енергії, особливо в умовах мініатюризації. Але якщо контактні структури, і, отже, перехідні контактні шари, створюються шляхом паяння, можливість зниження зазначених опорів істотно обмежена утворенням інтерметалідів, які мають істотно менші електропровідність та теплопровідність, ніж «чисті» метали. Слід зазначити, що власне нікель дифундує у телурид вісмуту та сплави на його основі відносно повільно [1]. Натомість у процесі виготовлення і старіння контактних структур у нікель інтенсивно дифундує телур, утворюючи за рахунок термічно активованих реакцій на межі поділу шари телуридів нікелю, серед яких домінує дітелурид нікелю  $NiTe_2$  [2]. Термоелектричні

властивості дітелуриду нікелю, утвореного саме таким шляхом, не вивчалися. Однак вивчалися термоелектричні властивості спеціально отриманих сплавів системи  $Ni-Te$  різного складу [3, 4]. Тому у [3], зокрема, зазначається, що  $NiTe_2$  за 300 К має електропровідність 7500 См/см та термоЕРС близько 10 мкВ/К. Таким чином, до певної міри його властивості схожі на властивості металу.

Саме утворення цього інтерметаліду в першу чергу зумовлює істотне зростання електричного та теплового контактних опорів перехідних контактних шарів. Більше того, шари інтерметалідів під впливом температури, а, отже, і електричного струму, здатні рости. Це веде до зростання електричного та теплового контактних опорів. Окрім того, інтерметаліди, утворені в результаті міжфазних реакцій на межах поділу, мають істотно меншу механічну міцність, ніж сплави такого ж складу. Таким чином, утворення інтерметалідів справляє негативний вплив не лише на споживчі характеристики, а й на надійність, стабільність та ресурсну стійкість термоелектричних перетворювачів енергії. Однак метою даної статті є головним чином дослідження температурних залежностей електричного та теплового контактних опорів перехідних шарів, утворених інтерметалідами.

### Розрахунок структури контактного шару

Розподіл молекулярних кластерів інтерметаліду у ТЕМ будемо визначати з рівняння нестационарної дифузії, яке у випадку нульової інтенсивності джерела має вигляд:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація кластерів інтерметаліду на глибині  $x$  від межі поділу ТЕМ – метал,  $t$  – час,  $D$  – коефіцієнт дифузії, який ми вважаємо незалежним від координати, часу та концентрації кластерів інтерметаліду. Для однозначного розв'язання рівняння (1) зробимо такі модельні припущення: 1) на початку процесу створюється тонкий шар атомів кластерів товщини  $\delta$  з концентрацією  $n_0$ ; 2) поблизу межі поділу весь час підтримується концентрація  $n_0$ . За припущення 1 рівняння (1) має такий розв'язок:

$$n(x,t) = n_0 \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x-\delta}{2\sqrt{Dt}} \right) \right], \quad (2)$$

де  $\operatorname{erf}(\dots)$  – так званий інтеграл похибок.

Але для того, щоб задовольнялось припущення 2, необхідно, щоб товщина шару  $\delta$  змінювалась з часом за законом  $\delta = 6\sqrt{Dt}$ . Саме така зміна у багатьох випадках і відбувається насправді. Причому цей шар у даному випадку є шаром інтерметаліду. З формули (2) випливає, що власне контактна структура складається з двох частин: шару інтерметаліду товщиною  $6\sqrt{Dt}$  і шару ТЕМ товщиною  $6\sqrt{Dt}$  з вкрапленими у нього кластерами інтерметаліду, концентрація яких спадає до нуля. Такий розподіл за координатою у структурі загальною товщиною  $12\sqrt{Dt}$  схематично зображено на рис.1.

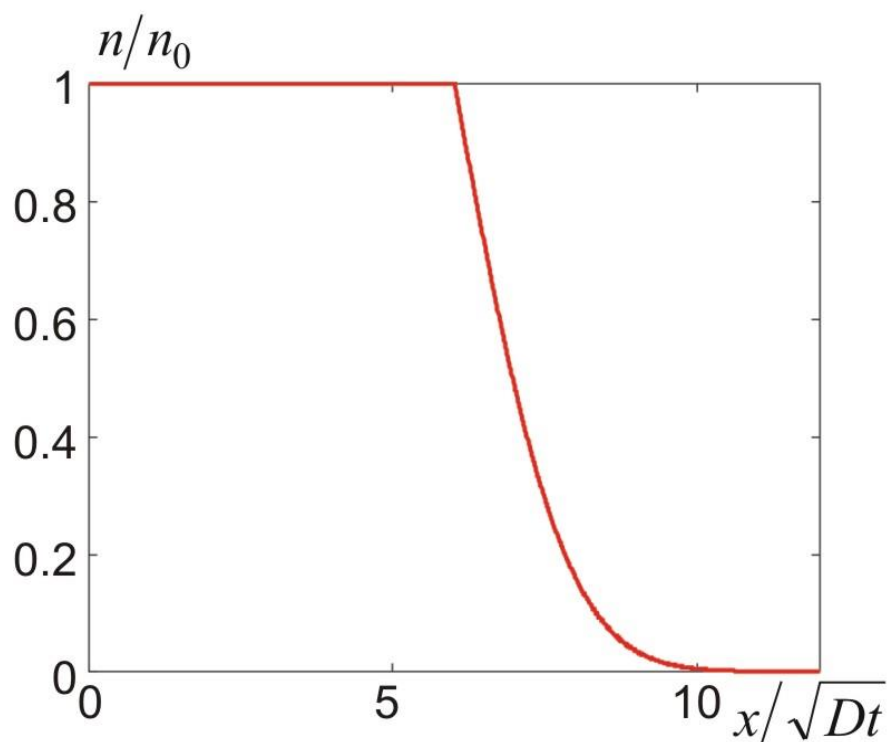


Рис. 1. Розподіл кластерів інтерметаліду у перехідному шарі

Цьому розподілові відповідає такий нормований на товщину перехідного шару розподіл об'ємної частки інтерметаліду у перехідному шарі:

$$v_i(y) = \frac{(A_i/\gamma_i)[1 - \operatorname{erf}(3y)]}{(A_i/\gamma_i)[1 - \operatorname{erf}(3y)] + (A_s/\gamma_s)\operatorname{erf}(3y)}, \quad (3)$$

де  $A_i$ ,  $A_s$ ,  $\gamma_i$ ,  $\gamma_s$  – молекулярні маси та густини інтерметаліду та ТЕМ відповідно,  $\operatorname{erf}(z)$  – так званий інтеграл похибок. Умовно вважаючи кластер інтерметаліду сферичним, визначимо його мінімальний діаметр. Він дорівнює:

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{6A_i N_{\min}}{\pi\gamma_i N_A}}, \quad (4)$$

де  $N_A$  – число Авогадро,  $N_{\min}$  – мінімальна кількість атомів у кластері, необхідна для приписування йому макроскопічних властивостей інтерметаліду в цілому. Якщо кластер містить, наприклад,  $10^6$  атомів, то такі макроскопічні властивості можна приписати йому з точністю до 0.1%. Приймаючи  $A_i = 312$ ,  $\gamma_i = 7750 \text{ кг/м}^3$ , отримаємо  $d_{\min} = 50.3 \text{ нм}$ . В подальшому будемо вважати, що кластери мають діаметр 100 нм.

### Розрахунок електричного та теплового контактних опорів та обговорення отриманих результатів.

Враховуючи, що у рамках вищевикладеного підходу перехідний шар розглядається як композит, у якому має місце явище перколяції, його електропровідність  $\sigma_c$  та теплопровідність  $\kappa_c$  визначатимемо так [5,6]:

$$\sigma_c = 0.25 \left\{ \sigma_s (2 - 3v_i) + \sigma_i (3v_m - 1) + \sqrt{[\sigma_s (2 - 3v_i) + \sigma_i (3v_i - 1)]^2 + 8\sigma_i \sigma_s} \right\}, \quad (5)$$

$$\kappa_c = 0.25 \left\{ \kappa_i (2 - 3v_i) + \kappa_s (3v_i - 1) + \sqrt{[\kappa_s (2 - 3v_i) + \kappa_i (3v_i - 1)]^2 + 8\kappa_i \kappa_s} \right\}. \quad (6)$$

ТермоЕРС перехідного контактного шару визначатимемо так:

$$\alpha_c = \frac{\int_0^1 \{ (\alpha_i / \kappa_i) v_i(y) + (\alpha_s / \kappa_s) [1 - v_i(y)] \} dy}{\int_0^1 \{ \kappa_i^{-1} v_i(y) + \kappa_s^{-1} [1 - v_i(y)] \} dy}. \quad (7)$$

Електричний та тепловий контактні опори визначатимемо за формулами:

$$r_{ce} = d \int_0^1 \frac{dy}{\sigma_c}, \quad (8)$$

$$r_{te} = d \int_0^1 \frac{dy}{\kappa_c}. \quad (9)$$

Окрім того, до цих величин додаємо електричний та тепловий контактні опори власне шарів інтерметаліду.

Апроксимацію необхідних температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів ТЕМ та інтерметаліду на підставі відомих загальних співвідношень [7, 8] за модельних припущень, викладених у працях [6, 9] здійснюватимемо у наступному порядку.

За відомим значенням термоЕРС  $\alpha_{s0}$  ТЕМ за певної температури  $T_0$  з рівняння:

$$\alpha_{s0} = \frac{k}{e} \left[ \frac{2F_1(\eta_0)}{F_0(\eta_0)} - \eta_0 \right] \quad (10)$$

визначимо значення  $\eta_0$  зведеного хімічного потенціалу газу носіїв заряду за цієї температури.

Використовуючи умову сталості концентрації носіїв заряду, з рівняння

$$\frac{T^{1.5} F_{0.5}(\eta)}{T_0^{1.5} F_{0.5}(\eta_0)} = 1 \quad (11)$$



визначимо температурну залежність зведеного хімічного потенціалу  $\eta$  у заданому інтервалі температур.

Зі співвідношення

$$L_s(\eta) = \left(\frac{k}{e}\right)^2 \left[ \frac{3F_2(\eta)}{F_0(\eta)} - \frac{4F_1^2(\eta)}{F_0^2(\eta)} \right] \quad (12)$$

визначимо температурну залежність числа Лоренца ТЕМ.

Температурна залежність електропровідності ТЕМ визначається так:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{F_0(\eta)F_{0.5}(\eta_0)}{F_{0.5}(\eta)F_0(\eta_0)}. \quad (13)$$

Температурна залежність теплопровідності визначається так:

$$\kappa_s = \sigma_s L_s(\eta) T + [\kappa_{s0} - \sigma_{s0} L_s(\eta_0) T_0] \frac{T_0}{T}. \quad (14)$$

У формулах (8) – (11) через  $F_m(\eta)$  позначено інтеграли Фермі, які визначаються наступним співвідношенням:

$$F_m(\eta) = \int_0^{\infty} x^m [\exp(x - \eta) + 1]^{-1} dx. \quad (15)$$

Інтерметалід  $NiTe_2$ , у відповідності з даними [3], розглядатимемо як метал і вважатимемо його електропровідність обернено пропорційною до температури:

$$\sigma_i = \sigma_{i0} (T_0/T), \quad (16)$$

а його теплопровідність, у відповідності з законом Відемана – Франца, вважатимемо в основному зумовленою вільними носіями заряду, незалежною від температури і рівною:

$$\kappa_i = (\pi^2 k^2 / 3e^2) \sigma_{i0} T_0. \quad (17)$$

Окрім того, враховуючи розсіювання носіїв заряду у інтерметаліді на межах кластерів, значення електропровідності та теплопровідності «масивного зразка» інтерметаліду будемо множити на такий коректувальний коефіцієнт:

$$K_c = 1.5 \int_0^1 \int_0^1 \frac{(d_c T / l_0 T_0) \sqrt{1+x^2-2xy}}{0-1(d_c T / l_0 T_0) \sqrt{1+x^2-2xy} + 2} x^2 dy dx. \quad (18)$$

У цій формулі  $d_c$  – діаметр кластера,  $l_0$  – довжина вільного пробігу електрона у інтерметаліді за температури  $T_0$ .

Зауважимо, що цей коректувальний коефіцієнт ми використовуємо виключно для перехідного шару з кластерами. Шар же власне інтерметаліду ми вважаємо суцільним, і, отже, для нього покладаємо коректувальний коефіцієнт рівним 1.

Результати розрахунків температурних залежностей електричного та теплового контактних опорів телурид вісмуту – нікель за наявності інтерметалідів у перехідному шарі наведено на рис.2 і 3.

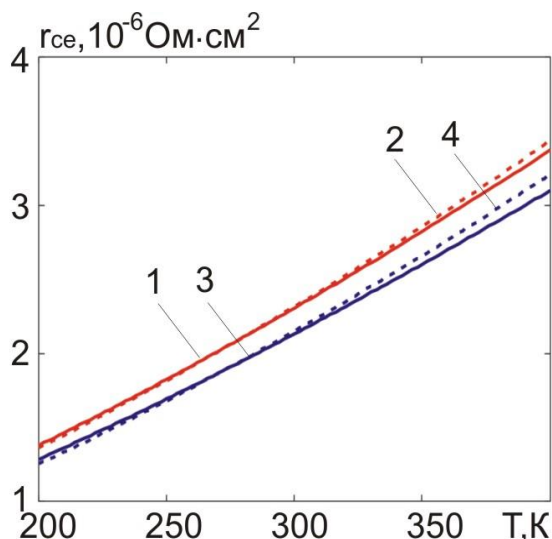


Рис. 2. Температурні залежності електричного контактного опору перехідного контактного шару товщиною 40 мкм: 1,2 – до вирівнювання концентрації кластерів інтерметаліду без урахування і з урахуванням розсіювання носіїв заряду на межах кластерів, 3,4 – після вирівнювання концентрації кластерів інтерметаліду без урахування і з урахуванням розсіювання носіїв заряду на межах кластерів

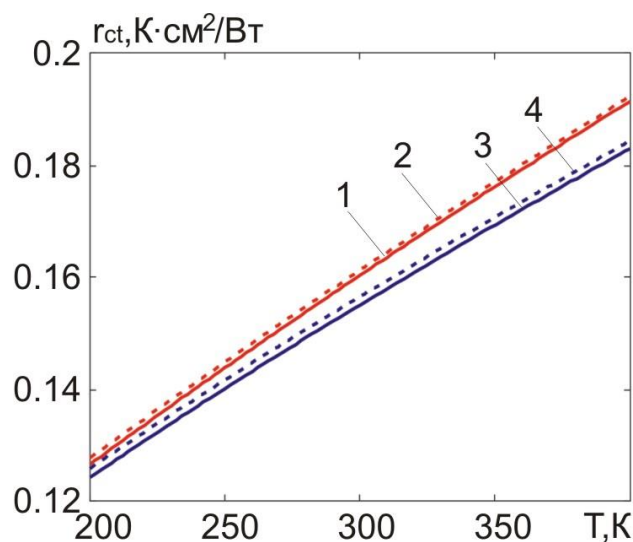


Рис. 3. Температурні залежності електричного контактного опору перехідного контактного шару товщиною 40 мкм: 1,2 – до вирівнювання концентрації кластерів інтерметаліду без урахування і з урахуванням розсіювання носіїв заряду на межах кластерів, 3,4 – після вирівнювання концентрації кластерів інтерметаліду без урахування і з урахуванням розсіювання носіїв заряду на межах кластерів

При побудові графіків прийнято, що  $T_0 = 300$  К,  $\alpha_{s0} = 200$  мкВ/К,  $\sigma_{s0} = 800$  См/см,  $\kappa_{s0} = 1.4$  Вт/(м·К),  $\sigma_{i0} = 7500$  См/см,  $l_0 = 5$  нм.

З графіків видно, що за загальної товщини перехідного шару телурид вісмуту – дітелурид нікелю рівної 40 мкм електричний контактний опір змінюється в інтервалі від  $1.28 \cdot 10^{-6}$  до  $3.46 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловий – в інтервалі від 0.131 до 0.195 К·см<sup>2</sup>/Вт. З часом цей шар може рости, і, наприклад, за загальної товщини 200 мкм його електричний контактний опір змінюватиметься у тому самому температурному інтервалі від  $6.40 \cdot 10^{-6}$  до  $1.73 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловий – в інтервалі від 0.655 до 0.975 К·см<sup>2</sup>/Вт. Це зростання істотно впливає не лише на споживчі характеристики, а й на надійність, довговічність та ресурсну стійкість термоелектричних перетворювачів енергії. Зазначимо також, що після вирівнювання концентрації кластерів у перехідному шарі електричний та тепловий контактні опори дещо зменшуються у порівнянні з нерівномірним розподілом, який диктується процесами нестационарної дифузії, отже це вирівнювання можна вважати позитивним фактором. Розсіювання носіїв заряду на межах кластерів в цілому дещо підвищує електричний та тепловий контактні опори, хоча й незначно.

Під час розрахунків ми були змушені вважати, що інтерметалід у контактному шарі володіє тими ж самими властивостями, що й сплав відповідного складу. Але це є досить істотне наближення, оскільки умови утворення цього інтерметаліду за рахунок міжфазних реакцій у контактному шарі докорінно відрізняються від умов, які мають місце під час прямого сплавлення нікелю з телуром. Ця відмінність може призвести лише до зростання електричного та теплового контактних опорів порівняно з їх розрахунковими значеннями.

### Чи можуть композити дітелурид нікелю – телурид вісмуту слугувати в якості термоелектричних матеріалів?

Для відповіді на це питання було розраховано залежність безрозмірної термоелектричної ефективності згаданих композитів за температури 400 К від об'ємного вмісту дітелуриду нікелю в них, яку наведено на рис.4.

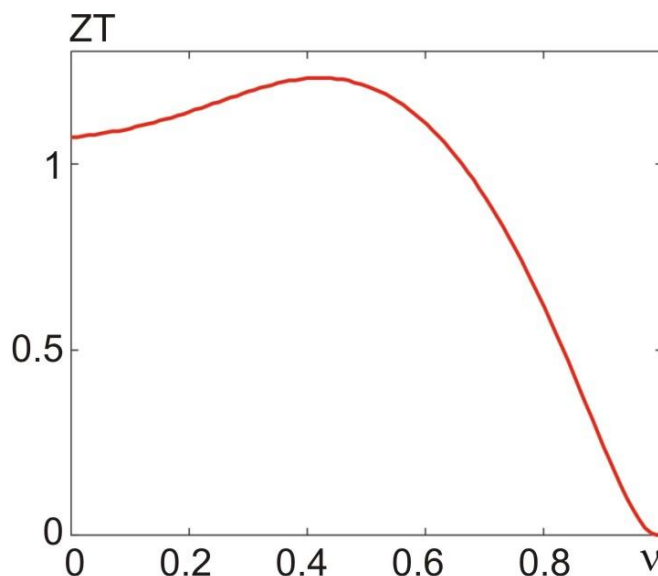


Рис. 4. Залежність безрозмірної термоелектричної ефективності композитів дітелурид нікелю – телурид вісмуту за температури 400 К від об'ємного вмісту дітелуриду нікелю в них

При побудові графіку вважалось, що термоЕРС дітелуриду нікелю дорівнює 10 мкВ/К і не залежить від температури. З графіка видно, що при вмісті дітелуриду нікелю у кількості, яка приблизно дорівнює 50 об.%, термоелектрична ефективність зростає приблизно на 20% порівняно з чистим телуридом вісмуту. Далі вона стрімко спадає до малого значення, притаманного чистому дітелуридові нікелю. Але це вірно лише тоді, коли наш гіпотетичний матеріал справді є композитом і при цьому дітелурид нікелю у ньому має властивості сплаву відповідного складу. Лише в цьому випадку можна розглядати питання про доцільність виготовлення і використання такого матеріалу, враховуючи і інші зазначені вище аспекти.

### Про граничні можливості «металізованих» термоелектричних композитів

Зауважимо, що навіть на перший погляд незначне зростання термоелектричної ефективності описаного вище гіпотетичного композиту у порівнянні з чистим ТЕМ, відображене на рис.4, можливе головним чином тому, що додання високоелектропровідної, а, отже і високотеплопровідної, домішки до вихідного ТЕМ на доволі значному інтервалі об'ємного вмісту домішки порівняно мало впливає на термоЕРС композиту в цілому. Тому, вважаючи термоЕРС домішки малою, або навіть рівною нулеві за абсолютною величиною, має певний зміст дослідити вплив цієї домішки на термоелектричну ефективність композиту при зростанні її електропровідності. Результати цього дослідження наведено на рис. 5.

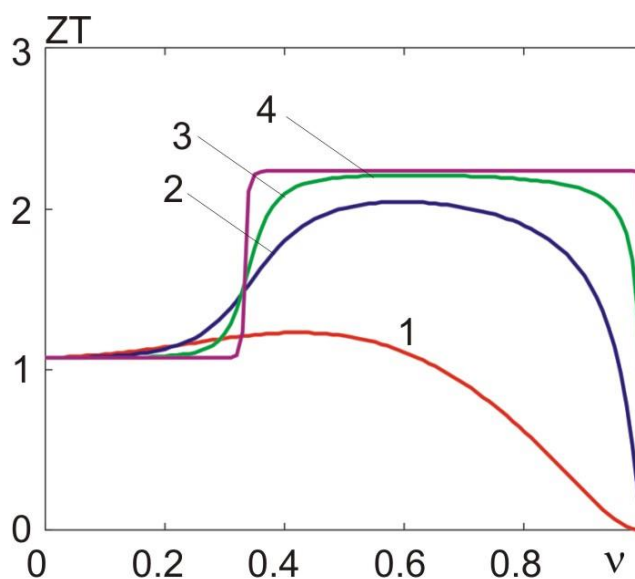


Рис.5. Залежність термоелектричної ефективності композиту металевих домішок – телурид вісмуту від об'ємної частки домішки за температури 400 К та значень електропровідності домішки за 300 К у См/см: 1 – 7500, 2 – 75000, 3 –  $5 \cdot 10^5$ , 4 –  $5 \cdot 10^7$ .

З графіків ми бачимо, що при зростанні електропровідності металевих домішок по перше стає різко вираженим поріг перколяції, по друге максимальна термоелектрична ефективність «металізованого» композиту досить стрімко прямує до максимально досяжного значення. Вочевидь, граничне значення термоелектричної ефективності «металізованого» термоелектричного композиту за деякої температури  $T$  дорівнює:

$$ZT_{\max} = \frac{\alpha_s^2(T)\sigma_m T}{(\pi^2/3)(k/e)^2\sigma_m T} = \frac{3e^2\alpha_s^2(T)}{(\pi k)^2}. \quad (19)$$

Важливим є те, що у цій формулі фігурує термоЕРС *напівпровідникового* ТЕМ за даної температури, але електропровідність, теплопровідність, і, отже, число Лоренца *металу*. Зрозуміло, що такий підхід коректно відображає фізичну ситуацію в тому і лише в тому випадку, коли напівпровідник і метал при входженні до складу композиту за будь якого його складу зберігають притаманні їм макроскопічні значення кінетичних коефіцієнтів включно з їх температурними залежностями. Тоді, підставивши, наприклад,  $\alpha_s(400) = 235$  мкВ/К, отримаємо  $ZT_{\max} = 2.236$ , що більш ніж у два рази перевищує термоелектричну ефективність, характерну для традиційних сплавів на основі системи *Bi(Sb) – Te(Se)*. Ще більш разючий результат можна отримати, якщо взяти у якості ТЕМ, наприклад, антимонід цинку, для якого термоЕРС можна вважати рівною, припустимо, 700 мкВ/К. Тоді максимальне значення термоелектричної ефективності «металізованого» термоелектричного композиту на його основі дорівнюватиме 19.8, в той час, як зазвичай сплави системи *Zn-Cd-Sb* мають більш ніж на 1 – 2 порядки нижчу термоелектричну ефективність. Таким чином постають питання про технологічну можливість виготовлення саме таких *металізованих композитів*, а не просто *легованих металевими домішками матеріалів*, які, на відміну від композитів, вочевидь, не матимуть таких переваг, їх стабільність, ресурсну стійкість та можливість використання при створенні конкретних конструкцій термоелектричних перетворювачів енергії з урахуванням специфіки їх функціонування.

Слід зазначити, що реакції між металом і компонентами ТЕМ з утворенням інтерметалідів з відносно високим питомим електричним опором є істотною перешкодою для суттєвого підвищення термоелектричної добротності та ефективності ТЕМ як шляхом легування їх металевими домішками, так і шляхом створення «металізованих» термоелектричних композитів. Виходячи з результатів дослідження можна сформулювати такий перелік вимог до матеріалів, придатних для отримання високоефективних «металізованих» двофазних термоелектричних композитів:

1)напівпровідниковий ТЕМ повинен мати якомога вищу за абсолютною величиною термоЕРС у робочому інтервалі температур;

2)метал повинен мати якомога менший питомий електричний опір і або не реагувати з компонентами ТЕМ, або утворювати з ними інтерметаліди, електропровідність та теплопровідність яких би якомога істотніше відрізнялись від електропровідності та теплопровідності ТЕМ у бік збільшення;

3)термоЕРС металу або інтерметаліду за цих умов принципової ролі не відіграє і може бути малою за абсолютною величиною.

Однак навіть якщо ці вимоги сумісні між собою і технологічно здійсненні, композит ще повинен мати такі теплові та механічні властивості і таку сумісність з іншими матеріалами, які б дозволяли використовувати його для створення конкретних пристроїв.

У зв'язку з усім сказаним читач, можливо, задасть питання про те, що буде, якщо замість металевих домішок використати спеціально виготовлені гранули на основі високотемпературної надпровідної кераміки. На даному етапі автор статті не готовий давати аргументовану відповідь на таке питання. Для цього є дві причини. Перша полягає в тому, що надпровідності, наприклад, за кімнатної температури поки що не досягнуто. Друга полягає в тому, що самі по собі традиційні поняття термоелектричної добротності та ефективності ТЕМ, яким би «добрим» чи «поганим» він

не був, мають певний зміст не в останню чергу тому, що перенос заряду у ньому описується законом Ома. А у надпровідному стані закон Ома застосовний лише до «нормальної», себто не надпровідної частини матеріалу. Електродинаміка надпровідної частини є принципово іншою. Та й, як це видно з рис. 5, геть немає нагальної необхідності у безмежній електропровідності «металевої» частини композиту. З іншого боку надпровідна кераміка, як компонент ТЕМ, можливо, стала б у пригоді при створенні високоякісних *охолоджувальних* матеріалів і пристроїв, особливо мініатюрних, для криогенних температур, але це питання потребує спеціальних ґрунтовних досліджень, які не є предметом даної статті.

## Висновки

1. Показано, що утворення інтерметалідів у перехідному контактному шарі ТЕМ – метал істотно підвищує відповідні тепловий та електричний контактні опори.
2. Встановлено умови високої добротності двофазних «металізованих» термоелектричних композитів і сформульовано вимоги до матеріалів, з яких їх доцільно виготовляти.
3. У загальному вигляді знайдено граничне значення термоелектричної добротності «металізованих» термоелектричних композитів.

## Література

1. Lan Y.C. Diffusion of nickel and tin in p-type  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$  and n-type  $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$  thermoelectric materials / Y.C. Lan, D.Z. Wang, G. Chen, Z.F. Ren // *Appl. Phys. Let.* – 2008. – Vol.92. – 101910. – P. 1-3.
2. Chen L. Nickel barrier in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based thermoelectric modules for reduced contact resistance and enhanced power generation properties./ Chen L., Mei D., Wang Y., Li Y. // *J. of Alloys and Compounds.* – 2019. – Vol.796. – P.314-320. (<http://www.elsevier.com/locate/jalcom>).
3. Жузе В.П. / В.П. Жузе, А.Р. Регель. Электрические свойства сплавов системы  $\text{NiTe-NiTe}_2$  /ЖТФ. – 1955. – Т.25. – Вып.6. – С.978.
4. Чижигов В.М., Счастливы В.П. Теллур и теллуриды. – М.: Наука, 1966, 280с.
5. Снарский А.А.Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами / А.А. Снарский, А.К. Сарычев, И.В. Безсуднов, В.Н. Лагарьков // ФТП. – 2012. – Т.46. – С. 677-683.
6. Горський П.В. Про температурні залежності термоелектричних характеристик перехідного шару термоелектричний матеріал-метал з урахуванням явища перколяції / Горський П.В., Мицканюк Н.В.// *Термоелектрика.* – 2019,№3 – С.5-22.
7. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  / Б.М. Гольцман, И.А. Кудинов, И.А. Смирнов. – М.: Наука – 1972. – 322с.
8. Лифшиц Е.М. Физическая кинетика. / Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. // М.: Наука – 1979. – 528 с.
9. Горський П.В. Про температурні залежності термоелектричних характеристик перехідного шару термоелектричний матеріал-метал без урахування явища перколяції / Горський П.В., Мицканюк Н.В.// *Термоелектрика.* – 2019,№2 – С.5-23.

Надійшла до редакції 17.10.2019

Горский П.В.<sup>1,2</sup>, док. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинського 2  
Черновцы, 58012, Украина

## О ВЛИЯНИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И ТЕПЛОВОЕ КОНТАКТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ - МЕТАЛЛ

*Показано, что электрическое и тепловое контактные сопротивления термоэлектрический материал (ТЭМ) – металл в структурах с антидиффузионными слоями существенно возрастают, если переходный контактный слой состоит из подслоя интерметаллида и подслоя композита ТЭМ - интерметаллид. В паре теллурид висмута - никель таким доминантным интерметаллидом является NiTe<sub>2</sub>. При общей толщине переходного слоя теллурид висмута-дителлурид никеля равной 40 мкм в температурном интервале 200 – 400 К его электрическое контактное сопротивление изменяется в интервале от  $1.28 \cdot 10^{-6}$  до  $3.46 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловое - в интервале от 0.131 до 0.195 К·см<sup>2</sup>/Вт. Со временем этот слой может расти, и, например, при общей толщине 200 мкм его электрическое контактное сопротивление изменяется в том же температурном интервале от  $6.40 \cdot 10^{-6}$  до  $1.73 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>, а тепловой - в интервале от 0.655 до 0.975 К·см<sup>2</sup>/Вт. Этот рост существенно влияет не только на потребительские характеристики, но и на надежность термоэлектрических преобразователей энергии. Наряду с этим показано, что композит дителлурид никеля - теллурид висмута не является высокоэффективным термоэлектрическим материалом, но безразмерная термоэлектрическая эффективность композита теллурид висмута - высокоэлектропроводные металлические кластеры может стать существенно больше. Найдена предельная безразмерная термоэлектрическая эффективность такого композита. Библ. 9, рис. 5.*

**Ключевые слова:** контактное сопротивление, нестационарная диффузия, интерметаллиды, термоэлектрический материал, легирование, металлизированный композит, порог перколяции, нанокластеры, оптимальный состав композита, предельная безразмерная термоэлектрическая эффективность, высокотемпературная сверхпроводимость.

Gorskyi P.V. *dok. phys.-mat. sciences*<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,  
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

**ON THE EFFECT OF INTERMETALLICS ON THE  
ELECTRICAL AND THERMAL CONTACT RESISTANCES  
THERMOELECTRIC MATERIAL - METAL**

*It is shown that the electrical and thermal contact resistances thermoelectric material (TEM) - metal in structures with anti-diffusion layers increase significantly, if transient contact layer consists of a sublayer of intermetallic and a sublayer of TEM-intermetallic composite. In a couple of bismuth telluride-nickel,  $NiTe_2$  is a dominant intermetallic. With a total thickness of transient layer of bismuth telluride-nickel ditelluride of  $40 \mu m$  its electrical resistance will vary in the range from  $1.28 \cdot 10^{-6}$  to  $3.46 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ , and thermal – in the range from 0.131 to 0.195  $\text{K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$ . Over time, this layer can grow and, for instance, with a total thickness of  $200 \mu m$  its electrical contact resistance will vary in the same temperature range from  $6.40 \cdot 10^{-6}$  to  $1.73 \cdot 10^{-5} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ , and thermal – in the range from 0.655 to 0.975  $\text{K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$ . This growth significantly affects not only the consumer characteristics, but also the reliability, life and durability of thermoelectric energy converters. In addition, it is shown that nickel ditelluride - bismuth telluride composite is not a highly efficient thermoelectric material, but the dimensionless thermoelectric figure of merit of the bismuth telluride - high-conductivity metal clusters can become significantly higher. The boundary thermoelectric figure of merit of such a composite was found. Bibl. 9, Fig. 5.*

**Key words:** contact resistance, nonstationary diffusion, intermetallic, thermoelectric material, doping, metallized composite, percolation threshold, nanoclusters, optimal composition of composite, boundary dimensionless thermoelectric figure of merit, high-temperature superconductivity.

## References

1. Lan Y.C., Wang D.Z., Chen G., Ren Z.F. (2008). Diffusion of nickel and tin in p-type  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$  and n-type  $\text{Bi}_2(\text{Te,Se})_3$  thermoelectric materials. *Appl. Phys. Lett*, 92, 101910, 1-3.
2. Chen L., Mei D., Wang Y., Li Y. (2019). Nickel barrier in  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based thermoelectric modules for reduced contact resistance and enhanced power generation properties. *J. of Alloys and Compounds*, 796, 314-320. (<http://www.elsevier.com/locate/jalcom>).
3. Zhuze V.P., Regel A.R. (1955). Elektricheskiye svoystva sistemy  $\text{NiTe-NiTe}_2$  [Electrical properties of system  $\text{NiTe-NiTe}_2$  alloys]. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki – Technical Physics*, 25(6), 978 [in Russian].
4. Chizikov V.M., Schastlivyi V.P. (1966). Tellur i telluridy [Tellurium and tellurides]. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Snarskii A.A., Sarychev A.K., Bezudnov I.V., Lagar'kov V.N. (2012). Termoelektricheskaya dobrotnost' obiomnykh nanostrukturirovannykh kompozitov s raspredelionnymi parametrami [Thermoelectric figure of merit of bulk nanostructured composites with distributed parameters]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 46, 677-683 [in Russian].



6. Gorskyi P.V., Mytskaniuk N.V. (2019). On the temperature dependences of thermoelectric characteristics of thermoelectric material-metal transient layer with regard to percolation effect. *J. Thermoelectricity*, 3, 5-22.
7. Goltsman B.M., Kudinov I.A., Smirnov I.A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskiye materialy na osnove  $Bi_2Te_3$*  [Semiconductor thermoelectric materials based on  $Bi_2Te_3$ ]. Moscow: Nauka [in Russian].
8. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. (1979). *Fizicheskaya kinetika* [Physical Kinetics]. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Gorskyi P.V., Mytskaniuk N.V. (2019). On the temperature dependences of thermoelectric characteristics of thermoelectric material-metal transient layer without regard to percolation effect. *J. Thermoelectricity*, 2, 5-23.

Submitted 17.10.2019

УДК 62-69

**Анатичук Л.І.** *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Лисько В.В.** *канд. фіз.-мат. Наук*<sup>1,2</sup>  
**Кравцов С.О.**<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

---

## ПРО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕДПУСКОВОГО НАГРІВАЧА ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

---

*Розглянуто фізичну модель автономної системи для передпускового розігріву транспортних засобів, у якій передпусковий нагрівник і термоелектричний генератор, що забезпечує систему електричною енергією, об'єднані одним гідравлічним контуром. Наведено результати оцінки енергетичних характеристик термоелектричних генераторів для таких систем та очікувані значення ККД та загальної теплової потужності систем для різних серійних нагрівників тепловою потужністю понад 15 кВт. Бібл. 29, рис. 1, табл. 1.*

*Ключові слова: передпусковий нагрівник, термоелектричний генератор, фізична модель, ефективність.*

### Вступ

Для подолання труднощів, пов'язаних із експлуатацією транспортних засобів при понижених температурах, все ширше використовуються передпускові нагрівники – полум'яні джерела тепла, що працюють від палива транспортних засобів та здійснюють розігрів охолоджуючої рідини двигунів [1, 2]. При цьому ефективним методом вирішення проблеми розрядки акумуляторної батареї транспортних засобів під час роботи передпускових нагрівників є застосування термоелектричного генератора, який працює від тепла нагрівника та забезпечує автономне живлення його компонент [3 – 8]. Крім того надлишок електричної енергії термогенератора може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї та живлення іншого обладнання.

В Інституті термоелектрики створено експериментальний зразок термоелектричного передпускового нагрівника тепловою потужністю 3.5 кВт і максимальною електричною потужністю 100 Вт для обігріву транспортних засобів з об'ємом двигуна до 4 л [9 – 11]. Експериментальні дослідження нагрівника в умовах понижених температур підтвердили працездатність конструкції і довели його ефективність як передпускового джерела тепла для двигуна та джерела електрики для компонент нагрівника. [12]

Попередній аналіз [13] свідчить про перспективи таких використань для покращення

експлуатаційних можливостей транспортних засобів великої потужності, у тому числі бронетанкової техніки.

Метою даної роботи є оцінка енергетичних характеристик системи «термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник» для транспортних засобів великих потужностей та визначення необхідних параметрів термоелектричних генераторів, які дозволяють зробити таку систему автономною та запобігти розряду акумуляторів транспортних засобів.

### Фізична модель системи «термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник»

Найбільш привабливою з точки зору значення ККД та зручності у експлуатації є система «термоелектричний генератор-передпусковий нагрівник», в якій передпусковий нагрівник і ТЕГ об'єднані одним гідравлічним контуром. У якості термоелектричного генератора для такого випадку може бути використано окремий термоелектричний передпусковий нагрівник меншої теплової потужності, електрична потужність якого є достатньою для живлення основного передпускового нагрівника. Такий нагрівник може бути встановлений окремо, у доступному місці транспортного засобу, що робить простішим його впровадження. На рис. 1 наведено фізичну модель такої системи передпускового розігріву двигунів.

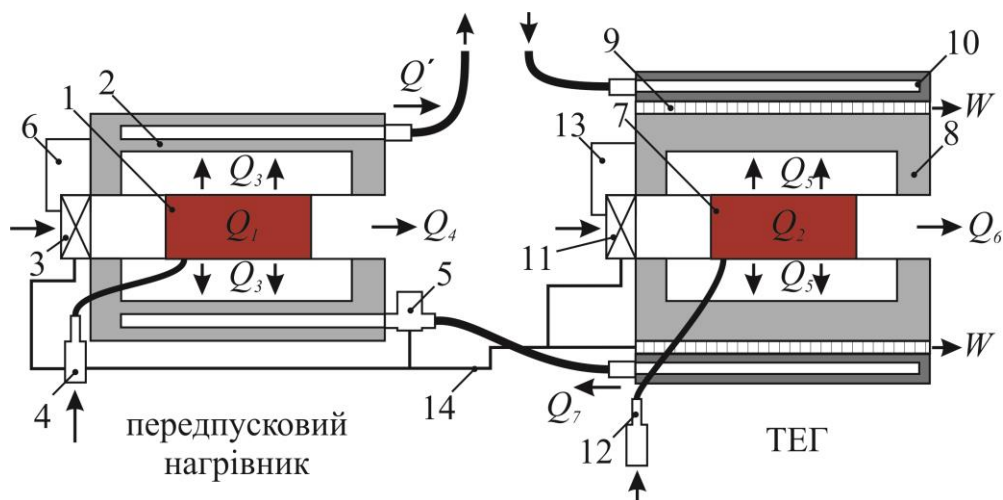


Рис. 1 – Фізична модель системи «передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор»:

- 1 – пальник передпускового нагрівника; 2 – теплообмінник; 3 – повітряний вентилятор передпускового нагрівника; 4 – паливний насос передпускового нагрівника; 5 – циркуляційна помпа;
- 6 – електронний блок передпускового нагрівника; 7 – пальник термогенератора;
- 8 – гарячий теплообмінник; 9 – термоелектрична батарея; 10 – холодний рідинний теплообмінник;
- 11 – повітряний вентилятор термогенератора; 12 – паливний насос термогенератора;
- 13 – електронний блок термогенератора; 14 – засоби електричної комутації.

Рідинний передпусковий нагрівник складається з джерела тепла 1, що знаходиться у внутрішньому об'ємі теплообмінника 2. В якості джерела тепла використано полум'яний пальник, повітря та паливо до якого підводяться вентилятором 3 і насосом 4. В теплообміннику нагрівника виконано канали, в яких теплоносії нагрівається, після чого, шляхом прокачування циркуляційною помпою 5, надходить до двигуна автомобіля. Запуск та керування роботою компонентів передпускового нагрівника (повітряного вентилятора,

паливного насосу, циркуляційної помпи) здійснюється електронним блоком 6.

Термоелектричний генератор містить індивідуальний полум'яний пальник 7, гарячий теплообмінник 8 для підведення тепла до термоелектричної батареї 9, вентилятор 11 та систему відведення тепла, яка складається з рідинних теплообмінників 10, в яких циркулює теплоносії.

Подача палива та повітря до джерела тепла термогенератора здійснюється вентилятором 12 та паливним насосом 13. Для стабілізації вихідної напруги термогенератора і керування його роботою в моделі ТЕГ передбачено електронний блок 13

Термоелектричний генератор у такій системі працює наступним чином. Теплова енергія, отримана внаслідок згоряння палива нагріває гарячий теплообмінник, проходить через термоелектричну батарею і відводиться через рідинні теплообмінники, у яких циркулює теплоносії до загального з передпусковим нагрівником гідравлічного контуру. Внаслідок різниці температур між гарячою і холодною сторонами термобатареї генерується електричний струм, що використовується для живлення передпускового нагрівника, а також і всіх електричних елементів самого генератора.

Таким чином, розглянута система забезпечує передпусковий нагрівник необхідною електричною енергією, незначно використовуючи акумулятор. Разом з тим така система може виконувати і додаткові функції, зокрема термогенератор може застосовуватись як додаткове джерело електричної енергії на транспортному засобі.

### **Результати розрахунків енергетичних характеристик термоелектричного генератора для автономної системи передпускового розігріву великої потужності**

Коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  для системи «передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор» можна ввести як відношення отриманої корисної енергії до затраченої теплової енергії  $Q$ . Корисною енергією будемо вважати отриману теплову енергію  $Q'$ , що безпосередньо використовується для передпускового розігріву двигуна, та електричну енергію  $W$ , яка необхідна для функціонування системи:

$$\eta = \frac{Q' + \sum_i W_i}{Q}, \quad (1)$$

де  $W_i$  – потужності споживачів електричної енергії системи.

Затрачену теплову енергію системи прийемо рівною сумарній тепловій енергії пальників передпускового нагрівника та термоелектричного генератора (ТЕГ):

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (2)$$

де  $Q_1$  і  $Q_2$  – теплові енергії пальників передпускового нагрівника та термогенератора, які можна виразити наступними співвідношеннями:

$$Q_1 = \eta_{A1} \cdot A \cdot m_1 \quad (3)$$

$$Q_2 = \eta_{A2} \cdot A \cdot m_2 \quad (4)$$

де  $\eta_{A1}$ ,  $\eta_{A2}$  – ККД пальників передпускового нагрівника і ТЕГ;  $A$  – теплотворна здатність

палива, яке використовується для роботи системи;  $m_1$ ,  $m_2$  – витрати палива передпускового нагрівника і термогенератора відповідно.

Частина тепла  $Q_1$  використовується для нагріву циркуляційної рідини  $Q_3$ , інша частина  $Q_4$  виноситься продуктами згорання в оточуючий простір. Аналогічний розподіл тепла має місце і в термоелектричному генераторі, а саме, частина тепла  $Q_5$  від пальника 7 через термоелектричні батареї 9 переноситься у рідинні радіатори 10 і відводиться в загальний контур розігріву циркуляційної рідини  $Q_7$ . Інша частина тепла  $Q_6$  відводиться з термогенератора продуктами згорання.

Тому вираз (1) для ККД системи переписеться у наступному вигляді:

$$\eta = \frac{Q_3 + Q_7 + W}{Q_1 + Q_2}, \quad (5)$$

де корисне тепло  $Q_7$  можна знайти з рівняння теплового балансу:

$$Q_2 = W + Q_7 + Q_6 \quad (6)$$

Для оцінки ККД системи, наведеної на рис. 1, були використані характеристики серійних передпускових нагрівників різних компаній, наведені на їх сайтах та в інструкціях з експлуатації [14 – 27].

Наприклад, передпусковий нагрівник DBW 350 компанії Webasto (дизельний варіант,  $A = 43$  МДж/кг) має теплову потужність  $Q_3 = 35$  кВт та витрату палива  $m_1 = 4.4$  л/год [15]

Вихідна електрична потужність термогенератора дорівнює  $W = 394$  Вт: 170 Вт – для живлення компонент передпускового нагрівника, 209 Вт – для живлення циркуляційного насоса та 15 Вт для енергозабезпечення компонент ТЕГ.

Величину теплової енергії  $Q_2$  можна оцінити за наступним співвідношенням:

$$\eta_{TEG} = \frac{W}{Q_2}, \quad (7)$$

де  $\eta_{TEG}$  – коефіцієнт корисної дії термоелектричного генератора.

Оскільки теплова енергія  $Q_2$  йде на розігрів циркуляційної рідини у загальному гідравлічному контурі, то ККД системи не буде залежати від ККД термоелектричного генератора, а, отже, від ККД використаних у генераторі термоелектричних модулів. Це відкриває можливість до здешевлення генератора шляхом використання дешевших модулів з нижчим ККД, що є важливою відмінністю термоелектричного генератора для транспортного передпускового нагрівача від генераторів для інших застосувань.

Для оцінки ККД системи можна врахувати, що ефективність сучасних ТЕГ, де застосовано однокаскадні модулі на основі телуриду вісмуту становить  $\sim 3.5\%$  [28]. Отже, для забезпечення заданої вихідної електричної потужності необхідно затратити приблизно  $Q_2 = 11.3$  кВт тепла. Врахувавши, що кількість тепла  $Q_6$ , яке втрачається з продуктами згорання в конструкціях термоелектричних генераторів, становить в середньому 25 % від теплової потужності  $Q_2$  [29], знаходимо величину теплової енергії  $Q_7$  ( $Q_7 = 8.4$  кВт), що затрачається для нагріву теплоносія та орієнтовний ККД даної системи ( $\eta \sim 80\%$ ). Результати розрахунків для цього та інших варіантів передпускових нагрівників наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків енергетичних характеристик системи  
«термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник»

Технічні характеристики серійних передпускових нагрівників великої потужності [13-26]				Результати розрахунків		
Модель передпускового нагрівника	Вихідна теплова потужність нагрівника, кВт	Споживана електрична потужність нагрівника, Вт	Витрата палива нагрівника, л/год.	Вихідна теплова потужність ТЕГ, кВт	Загальна теплова потужність системи «ТЕГ-нагрівник, кВт	ККД системи «ТЕГ-нагрівник, %
Webasto (Німеччина) DBW 160	16	194*	2.3	4.5	20.5	71.9
Webasto (Німеччина) DBW 230	23.3	214*	3.0	4.9	28.2	78.4
Webasto (Німеччина) DBW 300	30	339**	4.0	7.6	37.6	76.2
Webasto (Німеччина) DBW 350	35	379**	4.4	8.4	43.4	79.9
Eberspächer (Німеччина) Hydronic L 16	16	164***	2	3.8	19.8	80.2
Eberspächer (Німеччина) Hydronic L 24	24	184***	2.9	4.3	28.3	82.7
Eberspächer (Німеччина) Hydronic L 30	30	315****	3.7	7.1	37.1	81.1
Eberspächer (Німеччина) Hydronic L 35	35	330****	4.2	7.4	42.4	83.0
Теплостар (РФ) 14 ТС-10	15	132	2	3.2	18.2	76.1
Теплостар (РФ) 20 ТС-Д38	20	200	2.5	4.6	24.6	80.3
Теплостар (РФ) АПЖ – 30Д-24	30	336	3.7	7.5	37.5	81.1
ШААЗ (РФ) ПЖД24Б	24	170	3.8	4.0	28.0	65.5
ШААЗ (РФ) ПЖД30	30	340	5	7.6	37.6	63.6
ШААЗ (РФ)	30	340	5	7.6	37.6	63.6

Технічні характеристики серійних передпускових нагрівників великої потужності [13-26]				Результати розрахунків		
Модель передпускового нагрівника	Вихідна теплова потужність нагрівника, кВт	Споживана електрична потужність нагрівника, Вт	Витрата палива нагрівника, л/год.	Вихідна теплова потужність ТЕГ, кВт	Загальна теплова потужність системи «ТЕГ-нагрівник, кВт	ККД системи «ТЕГ-нагрівник, %
ПЖД30Г						
ШАА3 (РФ) ПЖД30Е	30	340	5	7.6	37.6	63.6
ШАА3 (РФ) ПЖД30Л	30	340	5	7.6	37.6	63.6
ШАА3 (РФ) ПЖД30М	30	340	5	7.6	37.6	63.6
ШАА3 (РФ) ОЖД30.8106010	30	140	3.8	3.3	33.3	79.5
ШАА3 (РФ) ПЖД44Ш	37	340	8.5	7.6	44.6	47.6
ШАА3 (РФ) ПЖД600	58	490	11.4	10.8	68.8	54.4
PROHEAT (Канада) M50 12V	15	218*	1.8	5.0	20.0	82.5
PROHEAT (Канада) M50 24V	15	229*	1.8	5.2	20.2	82.5
PROHEAT (Канада) M80 12V	23	206*	3	4.7	27.7	77.5
PROHEAT (Канада) M80 24V	23	229 <sup>1</sup>	3	5.2	28.2	77.6
PROHEAT (Канада) M90 24V	26	229*	3.1	5.2	31.2	83.5
PROHEAT (Канада) M105 24V	31	437**	4	9.7	40.7	78.3
PROHEAT (Канада) M125 24V	37	437**	4.2	9.7	46.7	86.4

\* – з врахуванням споживаної електричної потужності (104 Вт) циркуляційного насосу U 4814;

\*\* – з врахуванням споживаної електричної потужності (209 Вт) циркуляційного насосу U 4851;

\*\*\* – з врахуванням споживаної електричної потужності (104 Вт) циркуляційного насосу Flowtronic 5000;

\*\*\*\* – з врахуванням споживаної електричної потужності (210 Вт) циркуляційного насосу Flowtronic 6000 SC.

Як видно з таблиці 1, ККД системи «термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник» для більшості варіантів нагрівників знаходиться на рівні 75-80 %. При цьому, з врахуванням теплової потужності, що виробляється термогенератором, більш потужні модифікації нагрівників можуть бути замінені автономною системою, яка складається з менш потужного нагрівника та термоелектричного генератора, що забезпечує всю систему електричною енергією. Наприклад, замість передпускового нагрівника Hydronic L 35 тепловою потужністю 35 кВт може бути використана автономна система, яка складається з нагрівника Hydronic L 30 тепловою потужністю 30 кВт та термоелектричного генератора тепловою потужністю 7 кВт та електричною – близько 350 Вт, чого достатньо для живлення такої системи. Для найбільш потужного серед наведених у таблиці передпускового нагрівника ПЖД600 тепловою потужністю 58кВт термоелектричний генератор повинен мати корисну теплову потужність 11 кВт та електричну – 0.5 кВт (при ККД термоелектричного генератора ~ 3.5 %). Загальна теплова потужність такої системи буде складати близько 70 кВт, що є достатнім для використання у бронетанковій техніці.

Наведені оцінки енергетичних характеристик термоелектричних генераторів є основою для проектування конструкції такого генератора для конкретного варіанту передпускового нагрівника.

## **Висновки**

1. Проведено оцінку енергетичних характеристик термоелектричних генераторів для автономних систем передпускового розігріву транспортних засобів великої потужності. Визначено очікувані значення ККД та загальної теплової потужності систем «термоелектричних генератор – передпусковий нагрівник» для серійних нагрівників тепловою потужністю понад 15 кВт.
2. Встановлено, що ККД системи «термоелектричний генератор – передпусковий нагрівник» для більшості варіантів нагрівників знаходиться на рівні 75-80 %. При цьому, з врахуванням теплової потужності, що виробляється термогенератором, більш потужні модифікації нагрівників можуть бути замінені автономною системою, яка складається з менш потужного нагрівника та термоелектричного генератора, що забезпечує всю систему електричною енергією.
3. Отримано, що для забезпечення транспортного засобу тепловою енергією потужністю до 70 кВт може бути використаний передпусковий нагрівник тепловою потужністю 58кВт (наприклад, типу ПЖД600), об'єднаний в один гідравлічний контур з термоелектричним генератором тепловою потужністю 11кВт. При цьому, споживана системою електрична енергія (0.5 кВт) буде повністю забезпечуватись термогенератором.

## **Література**

1. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. - М.: Наука, 2001, 535 с.
2. Резник Л.Г., Ромалис Г.М., Чарков С.Т. Эффективность использования автомобилей в различных условиях эксплуатации. М.: Транспорт, 1989. – 128 с.
3. Пат. (UA) на винахід № 102303 МПК F01N 5/00 H01L 35/00. Термоелектричне джерело



- живлення для автомобіля / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 25.06.2013, бюл. №12, Заявка u2011 13957 від 28.11.2011.
4. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. №15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
  5. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Максимук М.В. – Опубл. 25.04.2018, бюл. №8, Заявка u2017 11819 від 04.12.2017.
  6. Pat. US6527548B1. Int.Cl. F24H 1/00. Self powered electric generating space heater / Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen – Date of patent 4.03.2003, App.No 10/176,312, Filed 20.06.2002.
  7. Pat. US2010/0115968A1. Int.Cl. F25B 21/02. Heating apparatus comprising a thermoelectric devise / Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter – Date of patent 13.05.2010, App.No 11/993,608, Filed 23.06.2006.
  8. Пат. (RU) 2268393C1. МПК: F02N 17/04. Устройство для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания / Прилепо Ю.П. – Опубл. 20.01.2006, бюл. №02, Заявка 2005101942/06 от 27.01.2005.
  9. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Рациональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів // Термоелектрика. – №4.– 2015. – С.65-74.
  10. Максимук М.В. Про оптимізацію термоелектричних модулів автомобільного передпускового нагрівника // Термоелектрика. – 2017. – №1. – С.57–67.
  11. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором. Дизельний варіант // Термоелектрика. – 2017. – С.32-43.
  12. Максимук М.В. Стендові дослідження термоелектричного передпускового джерела тепла для автомобілів // Термоелектрика. – 2018. – №1.
  13. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Про можливість використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей // Термоелектрика. – 2019. – №3.
  14. Webasto. Веб-сайт: <https://www.webasto.com>.
  15. Жидкостный подогреватель DBW 160/230/300/350. Инструкция по монтажу.
  16. Eberspächer. Веб-сайт: <https://www.eberspacher.com>.
  17. Автономные отопительные приборы HYDRONIC L-II. Техническое описание, руководство по монтажу, эксплуатации и техобслуживанию.
  18. ООО «Теплостар». Веб-сайт: <https://teplostar.inni.info>.
  19. Подогреватель предпусковой дизельный 14ТС – 10 – М5. Руководство по эксплуатации АДВР.036.00.00.000 РЭ.
  20. Подогреватель предпусковой дизельный 20ТС-Д38. Руководство по эксплуатации АДВР.038.00.00.000 РЭ.
  21. Подогреватель автоматизированный жидкостный АПЖ – 30Д-24. Руководство по эксплуатации АДВР.056.00.00.000 РЭ.
  22. АО "Шадринский автоагрегатный завод". Веб-сайт: <http://shaaz.biz>.
  23. Подогреватели жидкостные дизельные ПЖД24Б. Руководство по эксплуатации ПЖД24Б - 1015006 - 30 РЭ.
  24. Подогреватель жидкостный дизельный ПЖД30. Руководство по эксплуатации ПЖД30-

1015006 РЭ.

25. Отопитель независимый жидкостный ОЖД30.8106010. Руководство по эксплуатации ОЖД30.8106010 РЭ.
26. Подогреватель жидкостный типа ПЖД600, ПЖД44Ш. Руководство по эксплуатации ПЖД600-1015008 РЭ.
27. PROHEAT. Веб-сайт: <http://www.proheat.com>.
28. Анатичук Л.І. Двохсекційний термоелектричний генератор на газовому паливі / Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський // Термоелектрика.-2008.-№1.-С.76-86.
29. Михайловський Віліус Ярославович. Термоелектричні генератори на органічному паливі: дис. д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.01 / НАН України. – Чернівці, 2007. – 320 с.

Надійшла до редакції 09.10.2019

**Анатычук Л.И.** *акад. НАН Украины*<sup>1,2</sup>  
**Лысько В.В.** *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>  
**Кравцов С.А.**<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58012, Украина

#### **О ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕДПУСКОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

*Рассмотрена физическая модель автономной системы для предпускового разогрева транспортных средств, в которой предпусковой отопитель и термоэлектрический генератор, обеспечивающий систему электрической энергией, объединены одним гидравлическим контуром. Приведены результаты оценки энергетических характеристик термоэлектрических генераторов для таких систем и ожидаемые значения КПД и общей тепловой мощности систем для различных серийных нагревателей тепловой мощностью более 15 кВт. Библиография: 29, рис. 1, табл. 1.*

**Ключевые слова:** предпусковой отопитель, термоэлектрический генератор, физическая модель, эффективность.

**Anatychuk L.I.** *acad NAS Ukraine*<sup>1,2</sup>

**Lysko V.V.** *cand.Sc.(Phys.-Math)*<sup>1,2</sup>

**Kravtsov S.O.**<sup>1</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](mailto:anatych@gmail.com);*

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

## DESIGN OF THERMOELECTRIC GENERATOR FOR TRANSPORT HIGH-POWER STARTING PREHEATER

*A physical model of an autonomous system for pre-start heating of vehicles is considered, in which a preheater and a thermoelectric generator providing the system with electric energy are combined by one hydraulic circuit. The results of evaluating the energy characteristics of thermoelectric generators for such systems and the expected values of the efficiency and total thermal power of systems for various serial heaters with a thermal power of more than 15 kW are given. Bibl. 29, Fig. 1, Table 1.*

**Key words:** nstarting preheater, thermoelectric generator, physical model, efficiency.

### References

1. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M., et al. (2001). *Tekhnicheskaiia ekspluatatsiia avtomobilei. Uchebnik dlia vuzov. 4 izdaniie, pererabotannoie i dopolnennoie [Technical operation of cars. College textbook. 4<sup>th</sup> ed., revised and enlarged]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Reznik L.G., Romalis G.M., Charkov S.T. (1989). *Effektivnost ispolzovaniia avtomobilei v razlichnykh usloviakh ekspluatatsii [Efficiency of using cars in various operating conditions]*. Moscow: Transport [in Russian].
3. *Patent of Ukraine № 102303* (2013). Anatychuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Thermoelectric power supply for automobile [in Ukrainian].
4. *Patent of Ukraine №72304* (2012). Anatychuk L.I., Mykhaolovsky V.Ya. Automobile heater with a thermoelectric power supply [in Ukrainian].
5. *Patent of Ukraine №124999* (2018). Maksimuk M.V. Automobile heater with a thermoelectric power supply [in Ukrainian].
6. *Pat. US6527548B1* (2003). Kushch Aleksandr S., Allen Daniel. Self-powered electric generating space heater.
7. *Pat. US2010/0115968A1*. Budde John, Baade Jeans, Stelter Michael. Heating apparatus comprising a thermoelectric device.
8. *Patent (RU) 2268393C1* (2006). Prilepo Yu.P. Device for facilitating internal combustion engine start [in Russian].
9. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of vehicles. *J.Thermoelectricity*, 4, 65-74.

10. Maksimuk M.V. (2017). On the optimization of thermoelectric modules of automobile starting pre-heater. *J.Thermoelectricity*, 1, 57–67.
11. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting pre-heater with a thermoelectric generator. Diesel version. *J.Thermoelectricity*, 2, 32-43.
12. Maksimuk M.V. (2018). Bench tests of thermoelectric starting pre-heater for cars. *J.Thermoelectricity*,
13. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2019). On the possibility of using thermoelectric generators for high-power transport starting pre-heaters. *J.Thermoelectricity*, 3.
14. Webasto. WEB-site: <https://www.webasto.com>.
15. Liquid heater DBW 160/230/300/350. Assembly instruction.
16. Eberspächer. WEB-site: <https://www.eberspacher.com>.
17. Autonomous heating devices HYDRONIC L-II. Technical description, assembly, operation and maintenance instruction.
18. “TEPLOSTAR” Ltd. WEB-site: <https://teplostar.inni.info>.
19. Diesel starting pre-heater 14TC – 10 – M5. Operation instruction АДВР.036.00.00.000 РЭ.
20. Diesel starting pre-heater 20TC-Д38. Operation instruction АДВР.038.00.00.000 РЭ.
21. Automated liquid pre-heater АПЖ – 30Д-24. Operation instruction АДВР.056.00.00.000 РЭ.
22. JSC “Shadrinsk Automotive Components Factory”. WEB-site: <http://shaaz.biz>.
23. Diesel pre-heaters ПЖД24Б. Operation instruction ПЖД24Б - 1015006 - 30 РЭ.
24. Diesel liquid pre-heater ПЖД30. Operation instruction ПЖД30-1015006 РЭ.
25. Autonomous liquid heater ОЖД30.8106010. Operation instruction ОЖД30.8106010 РЭ.
26. Liquid pre-heater of the type ПЖД600, ПЖД44Ш. Operation instruction ПЖД600-1015008 РЭ
27. PROHEAT. WEB-site: <http://www.proheat.com>.
28. Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. (2008). Gas-fueled two-sectional thermoelectric generator. *J.Thermoelectricity*, 1, 76-86.
29. Mykhailovsky V.Ya. (2007). Thermoelektrychni heneratory na orhanichnomy palyvi [Thermoelectric generators on organic fuel]. *DSc' Thesis (Phys-Math)*. Chernivtsi [in Ukrainian].

Submitted 09.10.2019

УДК 536.24



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
Прибила А.В., *канд. фіз.-мат. наук*<sup>1,2</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  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна



Прибила А.В.

### ПРО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ КОНДИЦІОНЕРИ ДЛЯ ТАНКІВ

---

*У роботі наводяться результати досліджень можливостей вдосконалення термоелектричних кондиціонерів для забезпечення умов перебування екіпажу танку, що є важливою передумовою виконання ними бойових завдань. Бібл. 21, рис. 1., табл. 1.*

**Ключові слова:** термоелектричний кондиціонер, танки, ефективність.

#### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* У сучасній бронетехніці, зокрема танках провідних країн світу, активно використовується кондиціонування повітря для забезпечення робочих умов перебування екіпажу. Особливо актуальним є використання таких кондиціонерів при підвищених температурах оточуючого середовища. Аналіз літературних джерел свідчить, що перебування людей в умовах підвищених температур оточуючого середовища протягом тривалого часу значно знижує ефективність їх роботи, а при значному збільшенні температури, виникає навіть ризик втрати свідомості. Це ставить під загрозу можливість виконання поставлених бойових завдань. З другого боку, при різкому зниженні температури повітря всередині танку виникає ризик гострих респіраторних захворювань (ГРЗ), що також знижує ефективність роботи екіпажу танку [1].

У літературі наведено дані про кондиціонування повітря у транспортних засобах, зокрема бронетанковій техніці, різними методами [2 – 8]. Особливу увагу звернено на використання компресійних кондиціонерів. Це зумовлено їх відносно високою ефективністю. Проте вони мають і низку недоліків, зокрема наявність екологічно небезпечних холодоагентів, невисока надійність, чутливість до механічних перевантажень і орієнтації у просторі, що значно знижує привабливість використання компресійних кондиціонерів. Така ситуація є особливо актуальною при використанні зазначених кондиціонерів у військовій техніці, що зумовлено наявністю підвищених вимог до їх надійності. Вказані недоліки усуваються шляхом використання термоелектричних кондиціонерів [8, 19, 20].

Аналіз літератури свідчить, що найбільшого поширення термоелектричні кондиціонери набули в Російській Федерації. Всі серійні моделі російських танків (в тому числі і експортні моделі), починаючи з Т-90М «Прорыв-3» (на озброєнні з 2018 року), обладнані термоелектричними кондиціонерами виробництва АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э. Дзержинского» (Російська Федерація) [9, 10]. Крім того, ЗАО

"Кондиціонер" (Російська Федерація) здійснює серійне виробництво термоелектричних кондиціонерів для танків Т-14 «Армата» [11].

Активні дослідження термоелектричного кондиціонування танків в умовах підвищених температурних умов ведуться в Індії [12, 13]. Термоелектричний кондиціонер був інтегрований у головний індійський бойовий танк Арджун (на озброєнні з 2006 року) і успішно продемонстрований у Головній дослідницькій лабораторії в Аваді (CVRDE), Індія та на Махаджанському польовому стрільбищі в Раджастані (Індо-Пакистанська границя) у червні 2005 [13].

Розробка термоелектричних кондиціонерів для військової техніки (зокрема танків) ведеться також у компаніях провідних країнах світу, зокрема у компаніях EIC Solutions Inc. (США) [14], TECA Corporation (США) [15], Marlow Industries, Inc. (США) [16], Global Thermoelectric, Inc. (Канада) [17].

Параметри термоелектричних кондиціонерів для танків наведені в таблиця.

*Таблиця*

*Порівняння термоелектричних кондиціонерів для танків*

	Холодильний коефіцієнт	Опалювальний коефіцієнт	Холодопродуктивність, Вт	Максимальна температура оточуючого середовища, °С	Споживана потужність, Вт	Вага, кг	Габаритні розміри, мм <sup>3</sup>	Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год
Т-14 (Росія)	0.7		3700	60	5500	50	-	350-600
Т-90 (Росія)	0.7		3000	60	4480	50	240x140x140	420-600
Т-90М (Росія)	1.1		3500	-	3200	98	-	-
ТЕСА (США)	0.36	1	1660	70	4600	70	-	-
ВНИИ - Холод маш (Росія)	0.86		1600	-	1830	-	358x180x220	380
	0.9		4500	-	5000	-	390x160x281	950

З таблиці видно, що характеристики кондиціонерів істотно відрізняються. Наприклад, основні параметри – ефективність, що визначається холодильним коефіцієнтом, знаходиться в межах 0.36 – 1. Звідси виникає питання на скільки якість розроблених термоелектричних кондиціонерів досягає граничних можливостей і отже, які ще є резерви для покращення їх властивостей, що і є метою даної роботи.

## Фізична модель

Фізична модель термоелектричного кондиціонера для танків представлена на рис. 1.

Вона складається із двох частин – внутрішнього блоку, що знаходиться всередині танку і забезпечує відведення теплового потоку із охолоджуваного об'єму 1, і блоку, що знаходиться на зовнішній поверхні танку і слугує для відведення теплового потоку у оточуюче середовище 10. Внутрішній блок кондиціонера складається із системи передачі теплового потоку із охолоджуваного об'єму 1 до термоелектричних модулів 5, яка містить повітряний вентилятор 3 та повітряний теплообмінник 4, та системи відведення теплового потоку від термоелектричних модулів рідинним теплообмінником 6 із використанням рідинного насоса 7. У якості рідинного теплоносія 11 використано рідину із пониженою температурою застигання – антифриз. Зовнішній блок кондиціонера міститься повітряно-рідинний теплообмінник 8 із повітряним вентилятором 9, що забезпечує розсіювання теплового потоку від кондиціонера в оточуюче середовище. Слід зазначити, що джерелом теплових натікань всередині охолоджуваного об'єму 1 є внутрішні джерела тепла 2 (теплові натікання від членів екіпажу та працюючої всередині охолоджуваного об'єму техніки) та натікання із зовнішнього середовища через ізоляцію танка 12, що залежать від якості теплової ізоляції та перепаду температур між внутрішнім об'ємом і оточуючим середовищем.

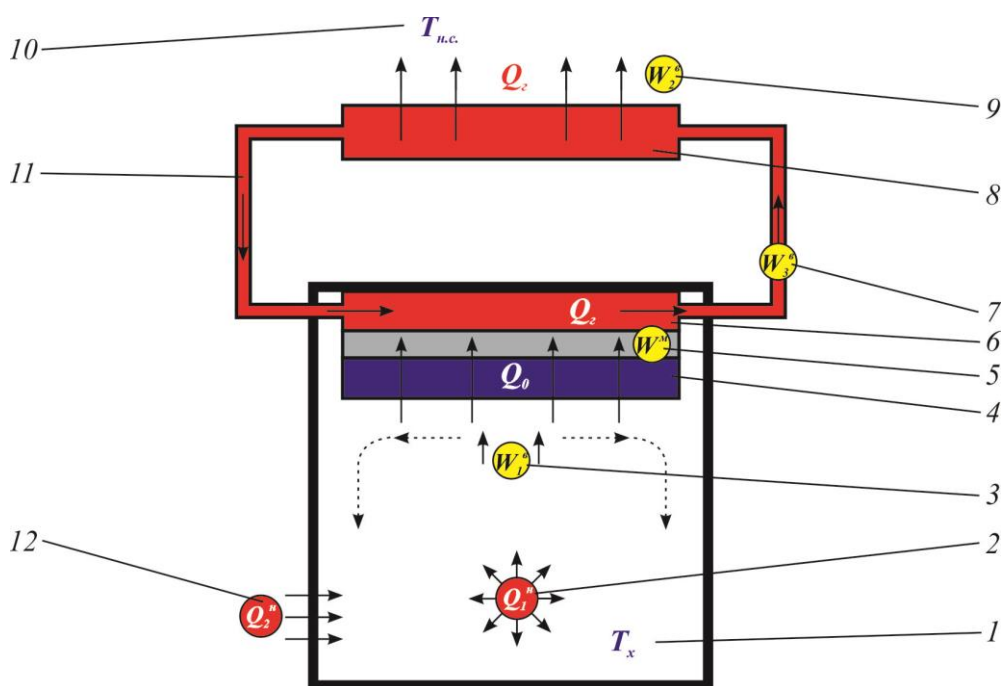


Рис. 1 Фізична модель термоелектричного кондиціонера для танків:

- 1 – охолоджуваний об'єм, 2 – виділення тепла  $Q_1$  всередині охолоджуваного об'єму,
- 3 – повітряний вентилятор, що споживає електричну потужність  $W_1$ ,
- 4 – холодний повітряний теплообмінник внутрішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 5 – термоелектричний перетворювач енергії, що споживає електричну потужність  $W$ , 6 – гарячий рідинний теплообмінник внутрішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 7 – рідинний насос, що споживає електричну потужність  $W_3$ ,
- 8 – рідинно-повітряний теплообмінник зовнішнього блоку термоелектричного кондиціонера, 9 – повітряний вентилятор, що споживає електричну потужність  $W_2$ , 10 – навколишнє середовище, 11 – рідинний теплоносіє, 12 – теплові натікання  $Q_2$  через ізоляцію.

Слід зауважити, що, відповідно до санітарних вимог [1], перепад температур між оточуючим повітрям і об'ємом повітря охолодженим кондиціонером не повинен перевищувати 15 К. При цьому в залежності від значення температури оточуючого повітря цей перепад різний [1]. Ці вимоги також були використані при розрахунках.

### Математичний та комп'ютерний опис моделі

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

й електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

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

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

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

Враховуючи (3) – (5), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тоді закони збереження (1), (2) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

Цими нелінійними диференціальними рівняннями другого порядку в частинних похідних (7) і (8) визначаються розподіли температури  $T$  й потенціалу  $U$  у термоелементах.

Рівняння, що описує процес переносу тепла в стінках теплообмінників у стаціонарному випадку, записується в такий спосіб:

$$\nabla (-k_1 \cdot \nabla T_1) = Q_1. \quad (9)$$



Тут  $k_1$  – коефіцієнт теплопровідності стінок теплообмінника,  $\nabla T_1$  – градієнт температури,  $Q_1$  – тепловий потік.

Процеси тепло- і масообміну теплоносіїв у каналах теплообмінників у стаціонарному випадку описуються рівняннями [18]

$$-\Delta p - f_D \frac{\rho}{2d_h} v |\vec{v}| + \vec{F} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla(A\rho\vec{v}) = 0, \quad (11)$$

$$\rho A C_p \vec{v} \cdot \nabla T_2 = \nabla \cdot A k_2 \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{d_h} |\vec{v}|^3 + Q_2 + Q_{wall}, \quad (12)$$

де  $p$  – тиск,  $\rho$  – щільність теплоносія,  $A$  – поперечний переріз труби,  $\vec{F}$  – сума всіх сил, що діють в системі,  $C_p$  – теплоємність теплоносія,  $T_2$  – температура,  $\vec{v}$  – вектор швидкості,  $k_2$  – теплопровідність теплоносія,  $f_D$  – коефіцієнт Дарсі,  $d = \frac{4A}{Z}$  – ефективний діаметр,  $Z$  – периметр стінки труби,  $Q_2$  – тепло, яке виділяється за рахунок в'язкого тертя [Вт/м] (з одиниці довжини теплообмінника),  $Q_{wall}$  – тепловий потік, що надходить від теплоносія до стінкам труби [Вт/м]

$$Q_{wall} = h \cdot Z \cdot (T_1 - T_2), \quad (13)$$

де  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з рівняння

$$h = \frac{Nu \cdot k_2}{d}. \quad (14)$$

Для визначення числа Нуссельта використовується рівняння Gnielinski ( $3000 < Re < 6 \cdot 10^6$ ,  $0.5 < Pr < 2000$ )

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_d}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}, \quad (15)$$

де  $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$  – число Прандтля,  $\mu$  – динамічна в'язкість,  $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$  – число Рейнольдса.

Для визначення коефіцієнта Дарсі  $f_D$  використовуємо рівняння Churchill для всього спектра числа Рейнольдса й усіх значень  $e/d$  ( $e$  – шорсткість поверхні стінки)

$$f_D = 8 \left[ \frac{8^{12}}{Re} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12}, \quad (16)$$

$$\text{де } A = \left[ -2.457 \cdot \ln \left( \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27(e/d) \right) \right]^{16}, \quad B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16}.$$

З розв'язку рівняння (7) – (12) ми одержимо розподіли температур, електричного потенціалу (для термоелементів), швидкостей і тиску ( для теплоносія).

Для розв'язку розглянутих вище диференціальних рівнянь із відповідними граничними умовами був використаний пакет прикладних програм Comsol Multiphysics.

### Результати проектування

Аналіз існуючих типів кондиціонерів для танків [2 – 7] свідчить, що величина теплового потоку, який необхідно відвести із внутрішнього об'єму танку у оточуюче середовище, знаходиться на рівні 3 кВт. При цьому максимально високі регламентовані температури оточуючого середовища можуть досягати 50 °С. Як уже зазначалося раніше, відповідно до санітарних вимог [1], перепад температур між оточуючим повітрям і об'ємом повітря охолодженим кондиціонером не повинен перевищувати 10 - 15 К в залежності від температури оточуючого середовища.

Відповідно до зазначених вимог і запропонованої фізичної моделі термоелектричного кондиціонера, були проведені розрахунки енергетичних характеристик кондиціонера з метою визначення його граничних можливостей.

Таким чином, для забезпечення необхідної холодопродуктивності на рівні 3 кВт за температури оточуючого середовища до 50 °С і перепаду температур ~15 К необхідна електрична потужність складає ~2 кВт, що відповідає значенню холодильного коефіцієнта  $\varepsilon \approx 1.47$ .

Порівняння результатів проектування із параметрами відомих термоелектричних кондиціонерів для танків [2 – 7] свідчить про можливості їх покращення по енергетичній ефективності до ~30 %, що відкриває можливості для подальших досліджень у даному напрямку.

Слід зауважити, що вимоги до можливості роботи в умовах підвищених температур оточуючого середовища легко реалізується із використання термоелектричних кондиціонерів (на відміну від використання компресійних охолоджувачів), оскільки із збільшенням температури оточуючого середовища при збереженні перепаду температур ефективність термоелектричних кондиціонерів навіть зростає [20].

Крім того, важливою перевагою термоелектричних кондиціонерів є можливість їх використання в режимі нагріву, при цьому їх енергетична ефективність навіть зростає [21].

### Висновки

1. Проведено дослідження граничних можливостей термоелектричного кондиціонеру для танків із використанням реальних вимог до їх експлуатації.
2. Встановлено, що для забезпечення необхідної холодопродуктивності на рівні 3 кВт за температури оточуючого середовища до 50 °С і перепаду температур ~15 К необхідною є електрична потужність ~2 кВт, що відповідає значенню холодильного коефіцієнта  $\varepsilon \approx 1.47$ .
3. Порівняння результатів проектування із параметрами відомих термоелектричних

кондиціонерів для танків свідчить про можливості їх покращення по енергетичній ефективності на ~30 %, що відкриває можливості для подальших покращень кондиціонерів.

4. Визначено, що енергетична ефективність термоелектричних кондиціонерів є вищою ніж у компресійних в умовах підвищених температур оточуючого середовища і при їх використанні в режимі нагріву.

## Література

1. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1182400-74>.
2. Lee, M.Y.; Lee, D.Y. Review on Conventional Air Conditioning, Alternative Refrigerants and CO<sub>2</sub> Heat Pumps for Vehicles. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 5, 713924
3. Lee, H.S.; Lee, M.-Y. Cooling Performance Characteristics on Mobile Air-Conditioning System for Hybrid Electric Vehicles. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 5, 282313.
4. Ma, G.Y. Study on thermoelectric air conditioning for electric vehicles. *Refrig. Air Cond.* 1998, 14, 5–10.
5. Lee, D. Experimental study on the heat pump system using R134a refrigerant for zero-emission vehicles. *Int. J. Automot. Technol.* 2015, 16, 923–928.
6. Qi, Z.G. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 38, 754–764.
7. Qinghong Peng and Qungui Du. Progress in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles – A Review. – *Open Access Energies* 2016, 9(4), 240; doi: 10.3390/en9040240.
8. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // *Термоелектрика*. – № 2. – 2003. – С. 52 – 56.
9. <http://евробизнес.рф/2018/04/06/18/>
10. <http://tass.ru/armiya-i-opk/5099575>
11. [http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post\\_85.html](http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post_85.html)
12. Chatterjee & et. al. Solid State Cooling / Heating Micro Climate Conditioning Device & a Garment Connected Therewith, Patent Sealing.
13. Sh. Chatterjee, Thermoelectrics in Indian scenario, *J. Of Thermoelectricity*, 6, 5 – 20 (2016).
14. <https://www.eicsolutions.com>
15. <http://www.thermoelectric.com>
16. <https://www.marlow.com>
17. <https://www.sedar.com>
18. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.
19. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів // *Термоелектрика*. – 2016. №2. – С 33 – 42.
20. Анатичук Л.І., Прибила А.В., Короп М.М. Порівняльний аналіз термоелектричних та компресійних теплових насосів для індивідуальних кондиціонерів в умовах підвищених температур навколишнього середовища // *Термоелектрика*. – 2016. №5. – С 95 – 98.
21. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про ефективність термоелектричних кондиціонерів для транспортних засобів // *Термоелектрика* №1 . 2019

Надійшла до редакції 25.10.2019

**Анатичук Л.І.**, *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Прибыла А.В.**, *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,  
Черновці, 58029, Україна, *e-mail: anatych@gmail.com*;  
<sup>2</sup>Черновицький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,  
Черновці, 58012, Україна

## О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДИЦИОНЕРАХ ДЛЯ ТАНКОВ

*В работе приводятся результаты исследования возможностей применения термоэлектрических кондиционеров для обеспечения надлежащих условий пребывания экипажа танка, что является важной предпосылкой выполнения им боевых задач. Библ. 21, рис. 1., табл. 1.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический кондиционер, танки, эффективность.

**L.I. Anatyhuk**<sup>1,2</sup> *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*  
**A.V. Prybyla**<sup>1,2</sup> *cand. Phys. - math. Sciences*

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

## THERMOELECTRIC AIR CONDITIONERS FOR TANKS

*The paper presents the results of studies on the possibility of using thermoelectric air conditioners to provide conditions for the tank crew, which is an important prerequisite for their combat missions. Bibl. 21, Fig. 1.*

**Key words:** thermoelectric air conditioner, tanks, efficiency.

### References

1. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1182400-74>.
2. Lee, M.Y., Lee, D.Y. (2013). Review on conventional air conditioning, alternative refrigerants and CO<sub>2</sub> heat pumps for vehicles. *Adv. Mech. Eng.*, 5, 713924
3. Lee, H.S., Lee, M.-Y. (2013). Cooling performance characteristics on mobile air conditioning system for hybrid electric vehicles. *Adv. Mech. Eng.*, 5, 282313.
4. Ma, G.Y. (1998). Study on thermoelectric air conditioning for electric vehicles. *Refrigeration and Air Conditioning*.

- 14, 5–10.
5. Lee, D. (2015). Experimental study on the heat pump system using R134a refrigerant for zero-emission vehicles. *Int. J. Automot. Technol*, 16, 923–928.
  6. Qi, Z.G. (2014). Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 38, 754–764.
  7. Qinghong Peng and Qungui Du (2016). Progress in heat pump air conditioning systems for electric vehicles. A review. *Open Access Energies*, 9(4), 240; doi: 10.3390/en9040240.
  8. Rozver Yu.Yu. (2003). Thermoelectric air conditioner for transport means. *J.Thermoelectricity*, 2, 52 – 56.
  9. <http://eurobusiness.rf/2018/04/06/18/>
  10. <http://tass.ru/armiya-i-opk/5099575>
  11. [http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post\\_85.html](http://gurkhan.blogspot.com/2017/09/blog-post_85.html)
  12. Chatterjee & et. al. Solid state cooling / heating micro climate conditioning device & a garment connected therewith, Patent Sealing.
  13. Sh. Chatterjee. (2016). Thermoelectrics in Indian scenario, *J. Thermoelectricity*, 6, 5 – 20.
  14. <https://www.eicsolutions.com>
  15. <http://www.thermoelectric.com>
  16. <https://www.marlow.com>
  17. <https://www.sedar.com>
  18. Lurie Michael V. (2008). *Modeling of oil product and gas pipeline transportation*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
  19. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners. *J.Thermoelectricity*, 2, 33 – 42.
  20. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air conditioners at elevated ambient temperatures. *J.Thermoelectricity*, 5, 95 – 98.
  21. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2019). On the efficiency of thermoelectric air conditioners for vehicles. *J.Thermoelectricity*, 1.

Submitted 25.10.2019



Прибила А.В.

Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

## ПРО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У роботі наведено результати проектування термоелектричного багатокаскадного термоелектричного модуля охолодження рентгенівських детекторів. Розроблено конструкцію термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання та проаналізовано можливості його практичного використання. Бібл. 11, рис. 2.

**Ключові слова:** комп'ютерне проектування, термоелектричне охолодження, рентгенівський детектор.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Термоелектричні охолоджувачі широко використовуються для забезпечення оптимальних режимів роботи різноманітних детекторів випромінювання [1, 2]. Особливо актуальним є їх використання із напівпровідниковими детекторами рентгенівського випромінювання, що значно підвищує їх роздільну здатність [3-9].

У роботі [3] наводяться результати комп'ютерного проектування термоелектричного багатокаскадного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання. Були визначені оптимальні геометричні розміри та режими роботи охолоджувача, що забезпечують найкращі умови роботи рентгенівського детектора. Проте аналіз теплової схеми термоелектричного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання засвідчив наявність теплових втрат, що призводять до зниження його енергетичної ефективності.

Тому метою роботи є аналіз можливостей підвищення ефективності термоелектричного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання.

### Фізична модель

Для розрахунків використано фізичну модель термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання представлену на рис. 1. Вона складається із корпусу 2 з берилієвим вікном 1, через яке випромінювання потрапляє на рентгенівський детектор 3. Необхідні температурні і теплові умови на поверхні детектора рентгенівського випромінювання забезпечуються багатокаскадним термоелектричним охолоджувачем електричною потужністю  $W$ , що складається із віток термоелектричного матеріалу  $n$ - і  $p$ -типу провідності 9, електропровідних

комутуючих пластин 10, керамічних електроізоляційних пластин 11 та електричних виводів 8. Для зменшення теплових втрат всередині корпусу детектора 5 створюється вакуум. Відвід теплового потоку від термоелектричного охолоджувача здійснюється через основу корпусу детектора 6 та його кріплення 7.

Аналіз теплової схеми детектора рентгенівського випромінювання показав, що джерелом найбільших втрат ефективності термоелектричного модуля охолодження (що також призводять до зниження максимального перепаду температур) є теплові натікання на термоелектричні вітки каскадів модуля через випромінювання. З метою зниження цих втрат було запропоновано удосконалення конструкції термоелектричного модуля шляхом введення додаткових радіаційних екранів 4 на рис. 1.

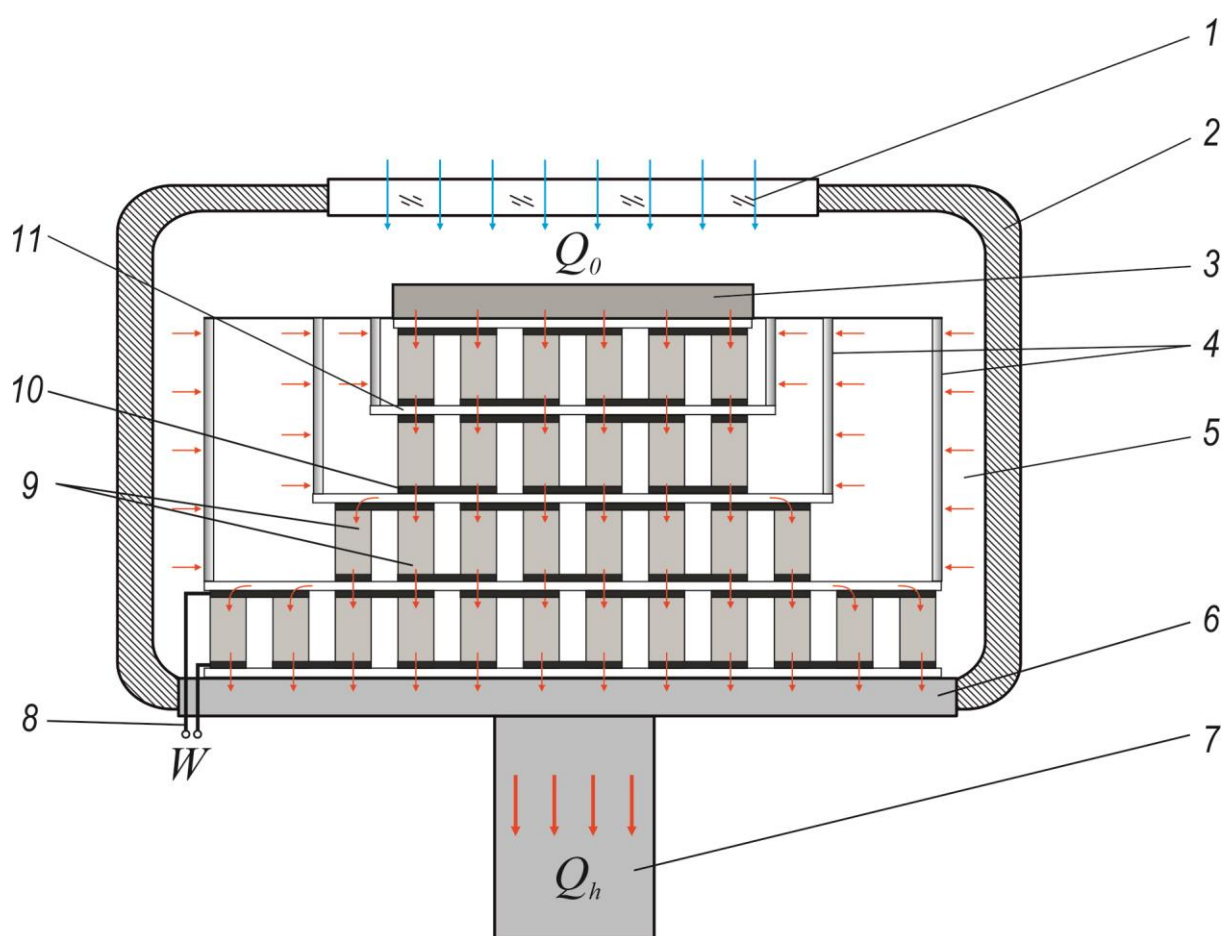


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного багатокаскадного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання: 1 – берилієве вікно; 2 – корпус приладу; 3 – детектор рентгенівського випромінювання; 4 – радіаційні екрани; 5 – внутрішній простір приладу в якому створюється вакуум; 6 – основа корпусу приладу; 7 – кріплення приладу; 8 – електричні виводи; 9 – вітки термоелектричного матеріалу n- і p- типу провідності, 10 – електричні комутаційні пластини, 11 – керамічні електроізоляційні пластини .

## Математичний і комп'ютерний описи моделі

Система рівнянь для опису холодильного коефіцієнту термоелектричного охолоджувача в

залежності від параметрів елементів фізичної моделі визначається із рівнянь теплового балансу:

$$Q_c = \chi_1(T_c^{(1)} - T_c), \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_h = \chi_3(T_h^{(2)} - T_h^{(1)}) \\ Q_h = \chi_4(T_h^{(1)} - T_h) \end{cases}, \quad (2)$$

$$Q_h = Q_c + W_{TE}. \quad (3)$$

Тут  $T_c^{(1)}$  – температура поверхні детектора,  $T_c$  – температура холодної сторони термоелектричного модуля,  $\chi_1$  – тепловий контактний опір,  $T_h^{(2)}$  – температура гарячої сторони термоелектричного модуля,  $T_h^{(1)}$  – температура основи корпусу детектора,  $T_h$  – температура поверхні на яку відбувається відведення тепла,  $\chi_2$  – тепловий контактний опір,  $\chi_3$  – тепловий опір теплообмінника з «гарячого боку» термоелектричного перетворювача,  $Q_0$  – холодопродуктивність,  $Q_h$  – теплопродуктивність.

Із врахуванням (1)–(3), вираз для холодильного коефіцієнта термоелектричного термоелектричного охолоджувача запишеться у вигляді:

$$\varepsilon_r = \frac{Q_0}{W + W_1} = \frac{\alpha I(T_c + Q_0 N_1) - 0.5 I^2 R - \lambda(T_h - T_c - (Q_h N_2 + Q_0 N_1))}{W + W_1}, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – диференціальний коефіцієнт Зеебека матеріалу,  $I$  – сила струму,  $R$  – електричний опір термоелектричного модуля,  $\lambda$  – середній питомий коефіцієнт теплопровідності віток термоелектричного модуля,  $W_1$  – потужність, що витрачається на забезпечення теплообміну,

$$N_1 = \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{\chi_1 \chi_2}, \quad N_2 = \frac{(\chi_3 + \chi_4)}{\chi_3 \chi_4}. \quad (5)$$

Для проектування конструкції термоелектричного охолоджувача використано пакет прикладних програм COMSOL Multiphysics [11]. Для цього рівняння фізичної моделі необхідно представити у певному вигляді, як буде показано нижче.

Для опису потоків тепла й електрики скористаємося законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (6)$$

та електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (7)$$



де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (8)$$

$$\vec{q} = \kappa\nabla T + \alpha T\vec{j}, \quad (9)$$

$$\vec{j} = -\sigma\nabla U - \sigma\alpha\nabla T. \quad (10)$$

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

Враховуючи (8) – (10), можна одержати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T - (\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U. \quad (11)$$

Тоді закони збереження (5), (6) набувають вигляду:

$$-\nabla[(\kappa + \alpha^2\sigma T + \alpha U\sigma)\nabla T] - \nabla[(\alpha\sigma T + U\sigma)\nabla U] = 0, \quad (12)$$

$$-\nabla(\sigma\alpha\nabla T) - \nabla(\sigma\nabla U) = 0. \quad (13)$$

Нелінійні диференціальні рівняння другого порядку в частинних похідних (12) і (13) визначають розподіл температури  $T$  та потенціалу  $U$  у термоелектричному охолоджувачі.

Розв'язок цих рівнянь із використанням технології об'єктно-орієнтовано комп'ютерного моделювання [10] та теорії оптимального керування [11] дозволяє знайти оптимальну конструкцію термоелектричного перетворювача та залежності його характеристик.

## Результати комп'ютерного проектування

В результаті комп'ютерного моделювання розраховано конструкцію термоелектричного багатокаскадного модуля (рис.2), що забезпечує можливість його використання для забезпечення температурних умов детектора рентгенівського випромінювання (табл. 1).

Таким чином, термоелектричний охолоджувач містить 4 каскади – по 6, 12, 27 і 65 пар віток термоелектричного матеріалу, його габаритні розміри – 12 x 16 x 12 мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4 x 8 мм. Розміри віток термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту ( $Bi_2Te_3$ ) n- і p- типів провідності – 0.6 x 0.6 x 1.8 мм. Електроізоляційні пластини з оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) товщиною 0.5 мм, електрична комутація з міді ( $Cu$ ) із антидифузійним прошарком нікелю ( $Ni$ ) товщиною 0.1 мм.

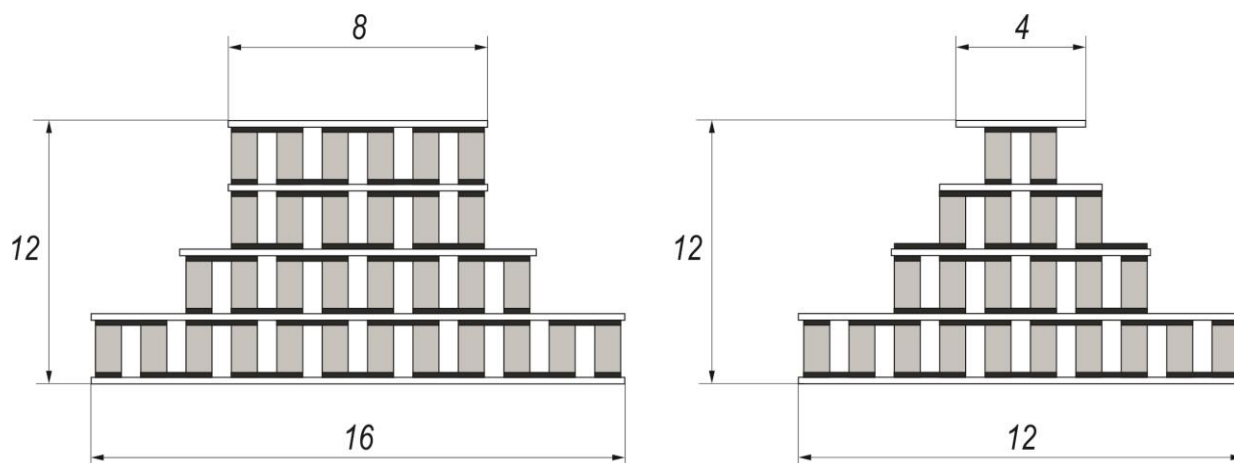


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції термоелектричного охолоджувача для детектора рентгенівського випромінювання.

Розрахункова холодопродуктивність термоелектричного перетворювача складає  $Q_0 = 57$  мВт (3 мВт – теплове навантаження від детектора плюс 54 мВт – натікання через випромінювання). При забезпеченні температури на детекторі  $T_c^{(1)} = -70$  °С та за температури тепловідводу  $T_h = +20$  °С холодильний коефіцієнт термоелектричного охолоджувача становить  $\varepsilon = 0.02$ . Отже, електрична потужність, що буде споживатися таким перетворювачем становить  $W = 2.85$  Вт.

Отримані результати підтверджують можливості використання термоелектричних охолоджувачів для забезпечення температурних і теплових умов детекторів рентгенівського випромінювання і за своїми характеристиками переважають відомі світові аналоги [10].

## Висновки

1. Проведено комп'ютерне проектування термоелектричного охолоджувача для рентгенівських детекторів.
2. Розраховано конструкцію та характеристики термоелектричного охолоджувача у складі детектора рентгенівського випромінювання. Таким чином, термоелектричний охолоджувач містить 4 каскади з термоелектричного матеріалу на основі  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  габаритними розмірами –  $12 \times 16 \times 12$  мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки  $4 \times 8$  мм.
3. Визначено електричну потужність термоелектричного перетворювача  $W = 2.85$  Вт, що при холодильному коефіцієнті  $\varepsilon = 0.02$  забезпечує температуру основи детектора  $T_c^{(1)} = -70$  °С та  $\Delta T = 90$  К.

## Література

1. Anatyчук L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013, №5, p. 54-58.
2. Прибила А.В. Проектування термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання // Термоелектрика №2, С. 87-92. 2019.
3. R.E. Stone, V.A. Barkley, and J.A Fleming, "Performance of a GammaRay and X-ray Spectrometer using Germanium and Si (Li) Detectors Cooled by a Closed-Cycle Cryogenic Mechanical Refrigerator," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-33(1), 299 (1986).

4. E.C. Broerman, R.M. Keyser, T.R. Twomey, D.L. Upp. A new cooler for HPGe detector systems.– ORTEC, PerkinElmer Instruments, Inc Oak Ridge TN 37831-0895 USA.
5. Schlesinger TE, James RB. Semiconductors and Semimetals. Vol. 43. Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications. Academic Press: New York, 1995.
6. Semiconductors for Room-temperature Detectors. Applications II, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA, 1998.
7. Sokolov, A., Loupilov, A., & Gostilo, V. (2004). Semiconductor Peltier-cooled detectors for x-ray fluorescence analysis. X-Ray Spectrometry, 33(6), 462–465. doi:10.1002/xrs.744.
8. <http://www.rmtltd.ru/applications/photodetectors/xray.php>.
9. <http://www.amptek.com/wp-content/uploads/2014/04/XR-100T-CdTe-X-ray-and-Gamma-Ray-Detector-Specifications.pdf>.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.
11. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. – Черновцы: Прут, 1992. – 263 p.

Надійшла до редакції 20.11.2019

**Прибыла А.В.**, канд. физ.-мат. наук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: [anatyck@gmail.com](mailto:anatyck@gmail.com);

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58012, Украина

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,  
Черновцы, 58000, Украина

## **О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*В работе приведены результаты проектирования термоэлектрического многокаскадного термоэлектрического модуля охлаждения рентгеновских детекторов. Разработана конструкция термоэлектрического охладителя в составе детектора рентгеновского излучения и предложена методика повышения его энергетической эффективности. Библ. 11, рис. 2.*

**Ключевые слова:** компьютерное проектирование, термоэлектрическое охлаждение, рентгеновский детектор.

**A.V. Prybyla** <sup>1,2</sup>  *cand. Phys. - math. Sciences*

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

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,

2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

*e-mail: anatykh@gmail.com*

### **EFFICIENCY INCREASE OF THERMOELECTRIC COOLING MODULE FOR X-RAY DETECTOR**

*The paper presents the results of designing a multi-stage thermoelectric cooling module for X-ray detectors. The design of a thermoelectric cooler as a part of X-ray detector is developed and the technique of increase of its energy efficiency is offered. Bibl. 11, Fig. 2.*

**Key words:** computer design, thermoelectric cooling, X-ray detector.

#### **References**

1. Anatykhuk L.I., Vikhor L.N. (2013). The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 54-58.
2. Prybyla A.V. (2019). Design of thermoelectric cooling module for X-ray radiation detector. *J. Thermoelectricity*, 2, 87-92.
3. Stone R.E., Barkley V.A., and Fleming J.A. (1986). Performance of a GammaRay and X-ray spectrometer using germanium and Si (Li) detectors cooled by a closed-cycle cryogenic mechanical refrigerator. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-33(1), 299.
4. Broerman E.C., Keyser R.M., Twomey T.R., Upp D.L. *A new cooler for HPGe detector systems.*—ORTEC, PerkinElmer Instruments, Inc Oak Ridge TN 37831-0895 USA.
5. Schlesinger T.E., James R.B. (1995). *Semiconductors and Semimetals. Vol. 43. Semiconductors for room temperature nuclear detector applications.* New York: Academic Press.
6. Semiconductors for room-temperature detectors. Applications II, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 487. Materials Research Society: Warrendale, PA, 1998.
7. Sokolov A., Loupilov A., Gostilo, V. (2004). Semiconductor Peltier-cooled detectors for x-ray fluorescence analysis. *X-Ray Spectrometry*, 33(6), 462–465. doi:10.1002/xrs.744.
8. <http://www.rmtltd.ru/applications/photodetectors/xray.php>.
9. <http://www.amptek.com/wp-content/uploads/2014/04/XR-100T-CdTe-X-ray-and-Gamma-Ray-Detector-Specifications.pdf>.
10. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010). COMSOLAB.
11. Anatykhuk L.I., Semeniuk V.A. (1992). *Optimal'noie upravleniie svoistvami termoelektricheskikh materialsov i priborov [Optimal control of the properties of thermoelectric materials and devices]*. Chernivtsi: Prut [in Russian].

Submitted 20.11.2019

УДК 536.24



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна



Кузь Р.В.

## ПРО ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ РОБІТ ПО СТВОРЕННЮ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ РЕКУПЕРАТОРІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У роботі проведено аналіз публікацій, патентів, доповідей на наукових конференціях, що стосуються створення термоелектричних рекуператорів для утилізації відходів тепла від транспортних засобів. Зроблено висновки про перспективи подальшого розвитку таких досліджень. Бібл. 143, рис. 5.

**Ключові слова:** термоелектричний генератор, вихлопний газ, утилізація тепла.

### Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Використання термоелектрики для утилізації відходів тепла з метою отримання електричної енергії було і залишається предметом інтересу спеціалістів, що займаються термоелектрикою, протягом останніх майже трьох десятиріч. Серед джерел відходів тепла значне місце займають двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) транспортних засобів. Тому така зацікавленість є зрозумілою, оскільки, зважаючи на ККД двигунів внутрішнього згорання, біля 2/3 теплової енергії (рис. 1), що отримується від спалювання бензину чи дизельного палива, віддається оточуючому середовищу, сприяючи термальному забрудненню нашої планети.

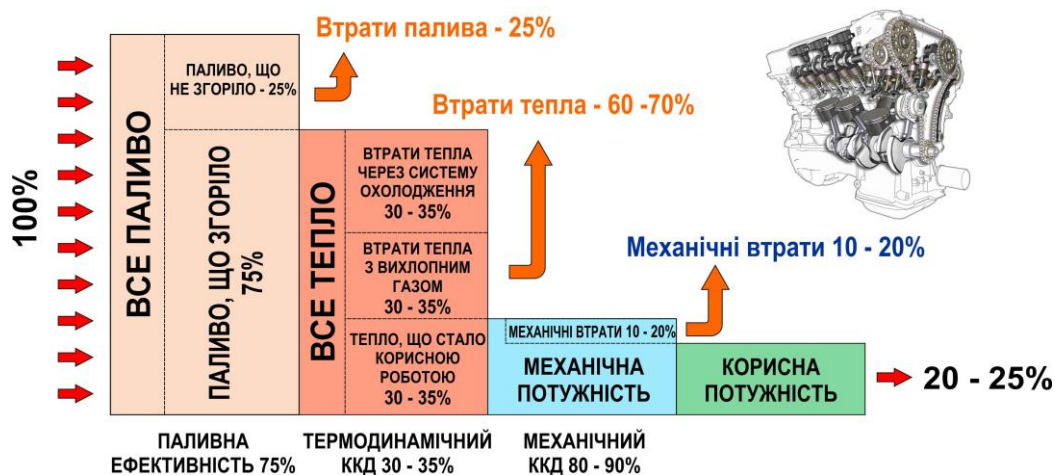


Рис. 1. Баланс енергії в двигуні внутрішнього згорання.

Метою даної роботи є аналіз досягнень і перспектив у галузі створення термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів.

### Розвиток робіт по створенню термоелектричних генераторів (ТЕГ) для транспортних засобів

Географія наукових досліджень і розробок ТЕГ для транспортних засобів охоплює більшість країн, де ведуться дослідження з термоелектрики. Результатам таких робіт було присвячено більше сотні доповідей на багатьох конференціях (рис. 2).

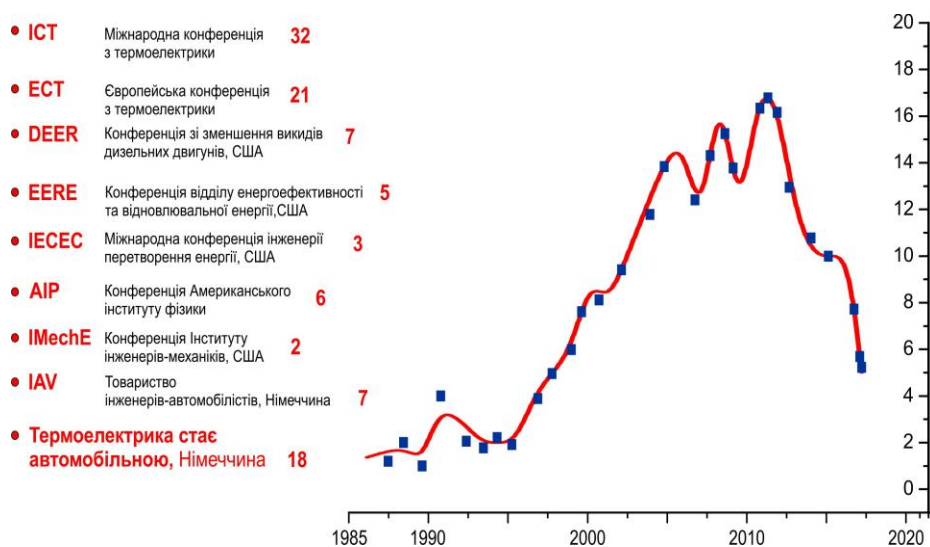


Рис. 2. Динаміка росту кількості доповідей на міжнародних конференціях, що присвячені ТЕГ для транспортних засобів [1 - 52].

Слід при цьому відмітити, що пік досліджень таких термоелектричних генераторів припадає на 2010 роки. Після цього спостерігається зменшення кількості таких робіт. Аналогічні залежності спостерігаються і у кількості публікацій. Їх максимум також припадає на 2010 роки зі згортанням активності у подальші роки (Рис. 3).

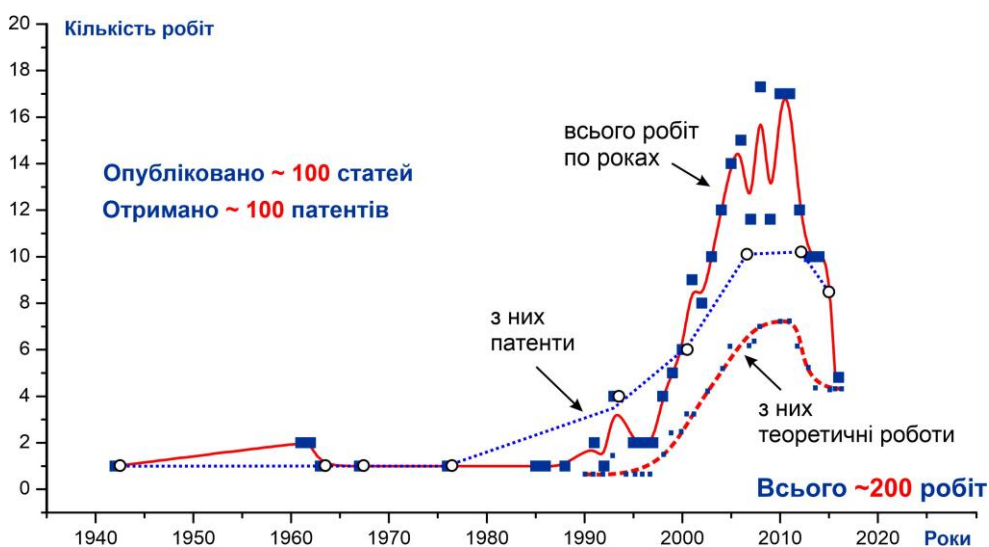


Рис. 3. Динаміка активності досліджень ТЕГ для транспортних засобів [53 - 148].

Стрімке зростання кількості робіт, починаючи у 1990-х роках і закінчуючи 2010-ми, були результатом сподівань на впровадження автомобільних термоелектричних генераторів. Однак, у цей період у більшості випадків зразки генераторів розроблялися без належного теоретичного обґрунтування, просто виходячи з досвіду створення термогенераторів для інших цілей – космічних, автономних наземних, підводних та інше. Було опубліковано біля сотні статей і отримано приблизно таку ж кількість патентів. Результатом таких зусиль було зростання потужності генераторів для транспортних засобів до 1 кВт (рис. 4). Зростав і ККД (рис. 5), але у величинах, що у 8 - 10 разів були меншими, ніж очікувані.

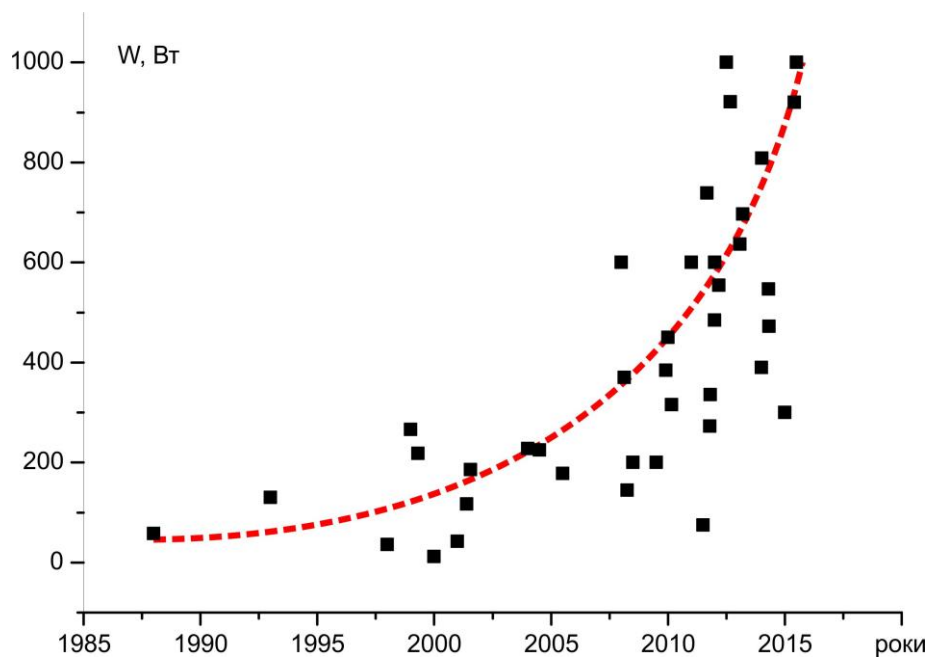


Рис. 4. Зростання потужності ТЕГ для транспортних засобів.

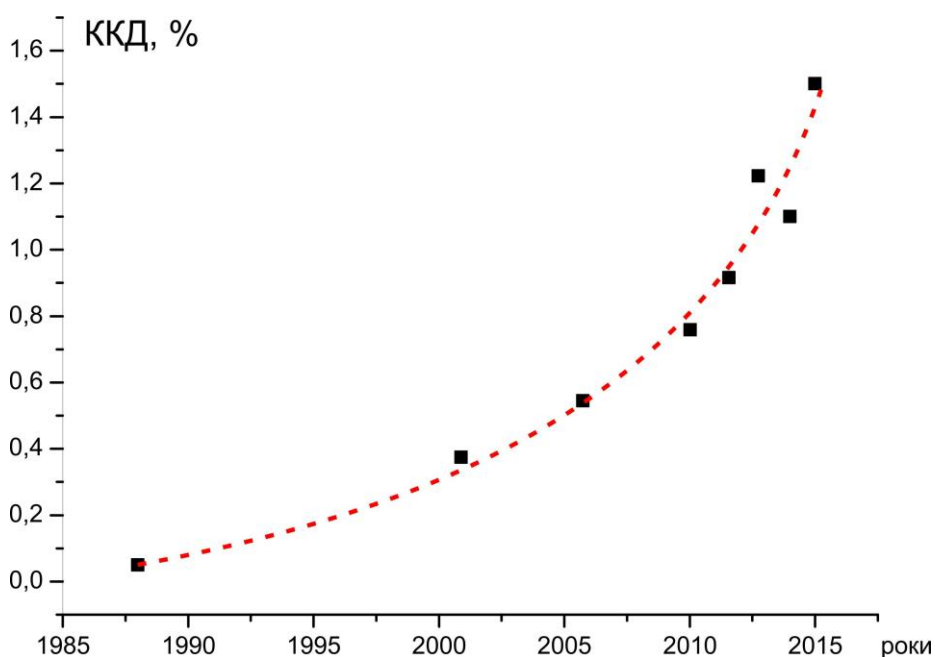


Рис. 5. Зростання ККД ТЕГ для транспортних засобів.

І все ж отримані результати дали важливу інформації про можливості використання термогенераторів для утилізації відходів тепла від транспортних засобів. Розглянемо основні з них.

1. Слід визнати, що розробка генераторів для автомобілів є однією з найбільш складних, виходячи з вимог до них і їх властивостей:

- обмеження по вазі і об'єму у зв'язку з їх дефіцитом, особливо на легкових автомобілях;
- підвищені вимоги до транспортної тряски;
- значна залежність теплової потужності від часу, що приводить до підвищених вимог до циклічної теплової стійкості генераторів;
- відсутність стабільності у електричних напругах та потужностях, що вимагає використання спеціальних електронних засобів для подолання цих недоліків;
- не ефективне використання можливостей генераторів у зв'язку з їх переважною роботою у режимах, далеких від максимальної потужності і ККД;
- низькі значення ККД, що обумовлюють високу вартість електричної енергії, отриманої від генераторів;
- обмеження у масштабних використаннях генераторів, обумовлених недостатньою кількістю телуру;
- проблеми відводу тепла від генераторів та інші проблеми.

2. Більш перспективними виглядають використання термогенераторів у інших не автомобільних транспортних засобах – тепловозах, літаках, та особливо у водному транспорті, де наведені вище проблеми та обмеження є менш значними.

3. В цілому прогрес у термоелектриці залишає мрію про створення термогенераторів для транспортних засобів не безнадійною. Ентузіасти цієї справи сподіваються, що при здешевленні вартості генераторів у 3 -5 разів та забезпеченні інших специфічних їх властивостей виникнуть умови, перспективні для їх промислового використання.

Такі результати роблять ідею створення термоелектричних генераторів для серійного виробництва мало привабливою, тому багато з розробників відмовилися від подальших їх розробок. До того ж теоретичні роботи привели до розуміння складності у реалізації ідеї термоелектричних генераторів для автомобілів, що і стало причиною згорання робіт у цьому напрямку.

Виходячи з таких результатів є важливим в цілому розглянути, на скільки все ж перспективними є подальші дослідження у цьому напрямку і які реальні результати слід при цьому очікувати.

## Висновки

1. Неоптимальне проведення досліджень і розробок, при якому чисельні експериментальні спроби здійснювалися без належних теоретичних обґрунтувань привели до надмірних витрат ресурсів і часу.
2. Використання ТЕГ на автомобілях є одним з найбільш складних застосувань термоелектрики. В першу чергу завдяки нестаціонарному джерелу тепла, ударним та вібраційним навантаженням, обмеженням у габаритах та вазі.
3. Необхідний новий підхід до розгляду термоелектричних генераторів для транспортних засобів, де термоелектричний генератор і двигун внутрішнього згорання розглядаються у сукупності.



## Література

1. Birkholz U., Crob E., U. Stohrer, Voss K. Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi<sub>2</sub>-thermoelements // Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. - Arlington (USA). - 1988. - P. 124-128.
2. Fairbanks J. Vehicular Thermoelectric Applications. // Energy Efficiency Renewable Energy (EERE). - Rockville, Maryland (USA). - 2008.
3. Farmer JC White Paper for US Army Rapid Equipping Force: Waste Heat Recovery with Thermoelectric and Lithium-Ion Hybrid Power System. // UCRL-TR-236780. - 2007.
4. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. Predicted Performance of Quantum Well Thermoelectrics for Power Generation. // 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). - San Diego, CA (USA). - 2006. - P. 1-8.
5. Bass J., Campana R., Elsner N. Thermoelectric Generator for Diesel Trucks. // In Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics, DM Rowe, ed., P. 127, UK, . 1991.
6. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Wells thermoelectric Devices for Diesel Engines. // 22th International Conference on Thermoelectrics ICT 2003. - Vol. 17 № 21 - 2003 P. 563 - 566.
7. Bass J., Elsner N., Leavitt F. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. // 13th International Conference on Thermoelectrics. - Vol. 316. - P. 295-298.
8. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Thermoelectric Devices for Diesel Engines. //
9. Kush Aleksandr S., John S. Bass, Saeid Ghamaty, Norbert B. Elsner Thermoelectric development at Hi-Z technology // Proc. of 20th International Conference on Thermoelectrics, 2001, pp. 422 - 430.
10. JC Bass, Norbert B. Elsner, and FA Leavitt, "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," AIP Conference Precedings, vol. 316, pp. 295-298, 1995.
11. Morelli, DT, Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. In Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics, J.-P. Fleurial, ed., 1996, - P.383-386.
12. JC Bass, Norbert B. Elsner. Current Thermoelectric Programs at Hi-Z Technology Inc. // Proc. of the 11th International Conference on Thermoelectrics, USA, 1992.
13. JC Bass, Norbert B. Elsner, S. Ghamaty. Application of Advanced Thermoelectric Technology to the Diesel Generator // DEER 1997, California, July, 1997 P. 157-161.
14. Ghamaty S., Elsner B. Si / SiGe Quantum Well Thermoelectric Materials and Devices for Waste Heat Recovery From Vehicles and Industrial Plants. // International Symposium on Nano-Thermoelectrics. - Osaka (Japan). - 2007. - P. 1-5.
15. Bass J., Kusch A., Elsner N. Thermoelectric Generator (TEG) for Heavy Diesel Trucks. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. - Beijing (China). - 2001, P. 1-6.
16. Ikoma K. at al. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles. Proc. of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1988.
17. Kushch A., Karri MA, Helenbrook BF, Richter C., The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck. Proc. of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference, California, USA, 2004.
18. Thacher EF, BT Helenbrook, MA Karri, CJ Richter "Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck" // Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile engineering,

- pp. 95 - 107. 2007.
19. D. Crane. Potential thermoelectric application in diesel vehicles // Proc. DEER Conference, August 24-28, 2003. P. 1 - 6.
  20. LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A., "Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery", DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA, 2005.
  21. LaGrandeur, J., Crane, D., Hung, S., Mazar, B. and Eder, A., "Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe", International conference on thermoelectric, p. 343-48, 2006.
  22. Crane, D., Lagrandeur, J., Jovovic, V., Ranalli, M., Addinger, M., Poliquin, E., Dean, J., Kossakovski, D., Mazar, B., Maranville, C . TEG on-vehicle performance model validation. In Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012: October 16 - 19 2012, Dearborn, USA.
  23. Crane D., Bell L. Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator. // Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics. - Vienna (Austria). - P. 11-16.
  24. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. // Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics. - 2006. - P. 343-348.
  25. Bell L. Prospects for Broadened Use of Thermoelectrics in the Automotive Vehicles. // Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference. - Irving, Texas (USA). - 2002.
  26. LaGrandeur J. BSST Waste Heat Recovery Program // 2008 DOE FCVT Merit Review. - 2008.
  27. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. DEER Conference. - Newport, RI (USA). - 2003.
  28. Bell L. High Power Density Thermoelectric Systems. // Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics. - 2004. - Adelaide, AU.
  29. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery // Proc. of Diesel Engine Emissions Reduction Conference. - Chicago (USA). - P. 1-7. - 2005.
  30. Bell L. Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles. // Proc. 1th Thermoelectrics IAV Conference. - Berlin (Germany). - 2008. - P. 1-14.
  31. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference. - Newport, Rhode Island (USA). - 2003. - P. 1-6.
  32. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of a Thermoelectric Power Generator with Dynamic Thermal Power Source. // Proc. of ES2007 Energy Sustainability 2007. - Long Beach, CA (USA). - P. 1-9.
  33. Fairbanks JW Thermoelectric applications in vehicles status 2008. // Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics. - Paris (France). - 2008. - P. PL-01.
  34. Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles // Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics. - Nagoya (Japan) 1998 - 464-467.
  35. Takanose E., Tamakoshi H. The Development of thermoelectric generator for passenger car // Proc. 12th International Conference on Thermoelectrics. - Yokohama (Japan). - 1993. - P. 467-470.
  36. Matsubara K. "Development of high efficient thermoelectric stack for a waste exhaust heat

- recovery of vehicles" // in Proc. of 21st International conference on thermoelectrics, 2002, pp. 418-423.
37. Mikami M. Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. Development of high-strength Fe<sub>2</sub>VAl thermoelectric module designed for motorcycle // Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics. - Jeju (Korea). - 2007. - P. 345-348.
  38. Hatzikraniotis E., Zorbas K. Triandafyllis I., Paraskevopoulos KM Study of Thermoelectric Power Generators and Applications in a Small Sized Cars // ECT2008 is the 6th European Conference on Thermoelectrics. - Paris (France). - 2008. - P. P2-18.
  39. Zorbas KT, Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos KM Power and Efficiency Calculation in Commercial TEG and Application in Wasted Heat Recovery in Automobile // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. - Odessa (Ukraine). - 2007.
  40. «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie», Берлин 2008.
  41. Wojciechowski K., Merksiz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automobile Engine // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. - Odessa (Ukraine). - 2007.
  42. Gao Min. Improving the conversion efficiency of thermoelectric generators through "pulse mode" operation. // AIP Conference Proceedings 1449, 447 (2012); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4731592>
  43. Gao Min, DM Rowe. Recent concepts in thermoelectric power generation //, 2002. Proceedings ICT '02. Twenty-First International Conference on Thermoelectrics.
  44. DM Rowe. The NEDO / Cardiff thermoelectric project to economically recover low temperature waste heat // 1998. Proceedings ICT 98. XVII International Conference on Thermoelectrics.
  45. O. Glavatskaya, C. Goupil, A. El Bakkali, O. Shonda. Exergetic Analysis of a Thermo-Generator for Automotive Application: a Dynamic Numerical Approach // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 475-481 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731599.
  46. D. Magnetto., G. Vidiella. Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks // 9th European Conference on Thermoelectrics. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731598
  47. Jamil I. Ghogel. Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application // Proceedings ICED 05 the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15-18.08.2005.
  48. JG Haidar; JI Ghogel. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators // Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.01TH8589).
  49. Vázquez J., Sanz-Bobi MA, Palacios R., Arenas A. State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles // Proc. 7th European Workshop on Thermoelectrics. - Pampelona (Spain). - 2002.
  50. Olle Hugblom, Ronnie Andersson. CFD Modeling of Thermoelectric Generators in Automotive EGR-coolers. // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 497-500 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731602.
  51. Andrea Montecucco, Jonathan Siviter, Andrew R. Knox. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators // The 7th International Conference on Applied Energy - ICAE2015. Energy Procedia 75 (2015) 597 - 602.
  52. Christian Häfele, Michael Schier, Steffen Hahn, Tobias Weiler, Horst Friedrich. Experimentelle Fahrzeug-Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und

- Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren / Thermoelectrics goes automotive. Jänsch, Daniel (Hrsg.) Renningen: expert-Verl. 2011.
53. Doug Crane, John Lagrandeur, Vladimir Jovovic, Marco Ranalli, Martin Adldinger, Eric Poliquin, Joe Dean, Dmitri Kossakovski, Boris Mazar, Clay Maranville. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007 / s11664-012-2327-8. 2012.
54. F. Frobenius, G. Gaiser, U. Rusche, B. Weller. Thermoelectric Generators for the Integration into Automotive Exhaust Systems for Passenger Cars and Commercial Vehicles. Journal of Electronic Materials DOI: 10.1007 / s11664-015-4059-z. 2015.
55. Yanliang Zhanga, Martin Clearyb, Xiaowei Wangb, Nicholas Kempfa, Luke Schoenseea, Jian Yangb, Giri Joshib, Lakshmikanth Medac. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. Energy Conversion and Management Volume 105, 15 November 2015, Pages 946-950.
56. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A - 15/02289-SE. Jonas Coyet Fredrik Borgstrum. Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University, Sweden Linköping, June 2015.
57. Terry J. Hendricks, Shannon Yee, Saniya Leblanc. Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive. Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007 / s11664-015-4201-y
58. Christopher M. Jaworski. Opportunitites for Thermoelectric Energy Conversion in Hybrid Vehicles: Thesis: May 18, 2007 The Ohio State University. Department of Mechanical Engineering.
59. Kevin D. Smith. An Investigation into the Viability of Heat Sources for Thermoelectric Power Generation Systems: Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering: February 2009. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
60. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрических генерирования энергии в Японии // Термоэлектричество. - 2007. - № 2. - С. 21-31.
61. Кадзикава Т. Современное состояние исследований и разработок в сфере технологии термоэлектрических генерирования в Японии // Термоэлектричество. - 2009. - № 1. - С. 18-30.
62. Matsubara K., Matsuura M. A Thermoelectric Application to Vehicles // Thermoelectric Handbook: macro to nano. - Boca Raton: Taylor & Francis. - 2006. - P. 52-1-52-11.
63. DM Rowe, J. Smith, G. Thomas, G. Min. Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat // Journal of Elec Materi (2011) 40: 784. doi: 10.1007 / s11664-011-1571-7
64. DM Rowe. Review. Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006).
65. Saniya LeBlanc. Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications // Sustainable Materials and Technologies 1-2 (2014) 26-35.
66. Jing-Hui Meng, Xiao-Dong Wang, Wei-Hsin Chen. Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery // Energy Conversion and Management 120 (2016) 71-80.
67. Saqr KM, Mansour MK, Musa MN Thermal Design of Automobile Exhaust Based Thermoelectric Generators: Objectives and Challenges // International Journal of Automotive Technology. - 2008. - Vol. 9, № 9. - P. 155-160.
68. Сакр Х.М., Мансур М.Х., Мусса М.Н. Тепловой расчёт термоэлектрических генераторов

- работающих на выхлопных газах автомобиля: цели и задачи // Термоэлектричество. - 2008. - № 1. - С. 64-73.
69. Yanliang Zhang, Martin Cleary, Xiaowei Wang, Nicholas Kempf, Luke Schoensee, Jian Yang, Giri Joshi, Lakshmi Kanth Meda. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery // Energy Conversion and Management 105 (2015) 946-950.
70. Sun-kook kim, Byeong-Cheol Won, Seok-Ho Rhi, Shi-Ho Kim, Jeong-Ho Yoo, Ju-Chan Jang. Thermoelectric Power Generation System for Future Hybrid Vehicles Using Hot Exhaust Gas // Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 40, No. 5, 2011 DOI: 10.1007 / s11664-011-1569-1.
71. Nyambayar Baatar, Shiho Kim. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles // TELKOMNIKA, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523 ~ 530.
72. X. Liu, YD Deng, S. Chen, WS Wang, Y. Xu, CQ Su. A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler // Case Studies in Thermal Engineering 2 (2014) 62-66.
73. X. Liu Y. D. Deng W. S. Wang C. Q. Su. Experimental Investigation of Exhaust Thermoelectric System and Application for Vehicle // Journal of Electronic Materials, June 2015, Volume 44, Issue 6, pp 2203-2210.
74. V. Pandiyarajana, M. Chinnappandianb, V. Raghavana, R. Velraja. Second law analysis of a diesel engine waste heat recovery with a combined sensible and latent heat storage system // Energy Policy. Volume 39, Issue 10 October 2011, Pages 6011-6020.
75. C. Ramesh Kumar, Ankit Sonthalia, Rahul Goel. Experimental study on waste heat recovery from an internal combustion engine using thermoelectric technology // Thermal Science, Year 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 1011-1022.
76. Zhang X., Chau KT, Chan CC Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles. - 2008. - Vol. 6, № 2. - P. 1119-1124.
77. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator // Journal of Electronic Materials, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007 / s11664-015-4129-2.
78. A. Heghmanns, S. Wilbrecht, M. Beitel Schmidt, K. Geradts. Parameter Optimization and Operating Strategy of a TEG System for Railway Vehicles // Journal of Electronic Materials. DOI: 10.1007 / s11664-015-4145-2
79. Wei He, Shixue Wang, Xing Zhang, Yanzhe Li, Chi Lu. Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat // Energy, Volume 91, November 2015, Pages 1-9.
80. Shuhai Yu, Qing Du., Hai Diao, Gequn Shu, Kui Jiao. Start-up modes of thermoelectric generator based on vehicle exhaust waste heat recovery // Applied Energy, Volume 138, 15 January 2015, Pages 276-290.
81. Gequn Shu, Youcai Liang, Haiqiao Wei, Hua Tian, Jian Zhao and Lina Liu. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships // Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013, vol. 19 issue C, pages 385-401.
82. MA Korzhuev, TE Svechnikova. Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport // Journal of Thermoelectricity №3 – 2013.
83. Neild Jr. AB "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.

84. Gruen D., Singh D., Routhbort J. Development of High-ZT Bulk Thermoelectric (New Program) // VT Merit Review. - 2008.
85. Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - PP. 296-300.
86. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. Diesel Truck Thermoelectric Generator. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - P. 301-305.
87. Thacher E. Wagner J. Thermoelectric Generator. // Clarkson University.
88. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2006 Progress Report. - P. 232-236.
89. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of Thermoelectric Power Generator with a dynamic Thermal power Source. // J. Energy Resour. Technol. - 2009. - Vol. 131, № 1. - 8 p.
90. Bell L., LaGrandeur J. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - PP. 287-290.
91. Лусте О.Я., Кузь Р.В., Струтинский М.Н. Компьютерные технологии в термоэлектричестве (Обзор) // Научное специализированное издание. Геометрическое и компьютерное моделирование. - 2009. - Вип.25. - С. 78-89. 2008
92. Кузь Р.В., Струтинский М.М. Компьютерное моделирование термоэлектрического однокаскадного генераторного модуля // Термоэлектричество, – 2010. – №3. – С. 21 - 27.
93. Anatychuk LI, Luste OJ, Kuz RV Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, 2011.
94. LI Anatychuk and RV Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
95. LI Anatychuk and RVKuz, Materials for vehicular thermoelectric generators. Journal of Electronic Materials, Volume 41, Number 6 (2012).
96. Л.И. Анатычук, Р. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Эффективность термоэлектрических рекуператоров тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания // Термоэлектричество, – 2011 – №4. – С. 78-83.
97. Л.И. Анатычук, Р. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя // Термоэлектричество, – 2012. – №2. – С. 93 - 100.
98. Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Хванг Дж.Д. Энергетические и экономические показатели термоэлектрических генераторных модулей на основе Bi-Te для рекуперация отходов тепла // Термоэлектричество, – 2012. – №4. – С. 75 - 82.
99. Кузь Р.В. Система мониторинга параметров движущегося автомобиля // Термоэлектричество, – 2012. – №4. – С. 89 - 94.
100. Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В. О влиянии системы теплообмена на эффективность термоэлектрического кондиционера // Термоэлектричество, – 2013 – №1. – С. 75 - 81.
101. Анатычук Л.И., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля // Термоэлектричество, – 2014. – №2. – С. 60 - 67.
102. Анатычук Л.И., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора автомобиля с бензиновым двигателем // Термоэлектричество, – 2014. – №3. – С. 87 - 91.
103. Анатычук Л.И., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного

- термоелектрического генератора автомобиля с дизельным двигателем // Термоэлектричество, – 2014. – №4. – С. 81 - 87.
104. Анатичук Л.И., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного термоэлектрического генератора автомобиля с бензиновым двигателем // Термоэлектричество, – 2014. – №5. – С. 49 - 54.
105. Анатичук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В. Повышение эффективности секционных термоэлектрических рекуператоров тепла // Термоэлектричество. – 2014. – №6. – С. 77-88.
106. LI Anatyshuk, RV Kuz. / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876 / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876. (ECT-2014), Madrid.
107. Дудаль В.А. Кузь Р.В. Распределения температур в почве и возможности подземных термоэлектрических генераторов // Термоэлектричество, – 2016. – №2. – С. 63 - 69.
108. Анатичук Л.И., Кузь Р.В. Термоэлектрический генератор для грузовиков // Термоэлектричество, – 2016. – №3. – С. 5 - 10.
109. Пат. 71722 Украина, МКИ H01L 35/02. Термоэлектрический генератор, использующий тепло выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания. Анатичук Л.И., Кузь Р.В., 25.07.2012, Бюл. №14.
110. Патент Украины №71651. Термоэлектрический автомобильный генератор. Анатичук Л.И., Кузь Р.В., 25.07.2012, Бюл. №14.
111. Патент Украины №71613. Термоэлектрический автомобильный генератор. Анатичук Л.И., Кузь Р.В., 25.07.2012, Бюл. №14.
112. Патент Украины №73671. Система электропитания автомобиля. Анатичук Л.И., Кузь Р.В., 10.10.2012, Бюл. №19.
113. US3197342. AB Neild Jr. Заявл. 26.09.1961. Оpubл. 27.07.1965.
114. Pat. US 3 297 492, USA, Int. Cl. H01L35/00. Internal combustion engine exhaust with thermoelectric generator / Pepper Vernon D (US); Publication date 1967-01-10, 3стр.
115. US 3 217 696 (A), USA, Int. Cl. F02B61/04; F02B63/04; F02B75/20; Thermoelectric generator for internal combustion engine / Carl Kiekhaefer Elmer; Publication date 1965-11-16, Priority date. 1962-09-28, 8стр.
116. US 4 673 863, USA, Int. Cl. F01N5/02; H01L35/30; Thermoelectric generator for engine exhaust / Alan Shwabric; Оpubл. 16.06.1987, Заявл. 22.05.1985, 4стр.
117. US 5 397 922, USA, Int. Cl. H02K33/00; H02K35/00; Integrated thermo-electro engine / Marius A. Paul, Ana Paul; Оpubл. 14.04.1995, Заявл. 02.07.1993, 9стр.
118. US 5 625 245, USA, Int. Cl. H02N3/00; Thermoelectric generator for motor vehicle / J. C. Bass; Оpubл. 29.04.1997, Заявл. 19.10.1993, 11стр.
119. US 2002 /0 117 198 A1, USA, Int. Cl. H02K33/00; H02K35/00; Thermoelectric generator for a vehicle / D.B. Kok, R. Bush; Оpubл. 29.08.2002, Заявл. 18.01.2002, 5стр.
120. 2005 /0 172 993, USA, Int. Cl. H01L35/28; H01L35/30; Thermoelectric generator for internal combustion engine / K. Shimoji, K. Suzuki, S. Matsubara; Оpubл. 11.08.2005, Заявл. 4.02.2005, 13 с.
121. US 6 986 247 B1, USA, Int. Cl. F01N35/00; Thermoelectric catalytic power generator with preheat / R. J. Parise; Оpubл. 17.01.2006, Заявл. 28.03.2002, 20стр.
122. 2007 /0 095 379 A1, USA, Int. Cl. H01L35/30; Thermoelectric generator / M. A. Taher, R. Dupree, Dong Fei, S.G. Garner; Оpubл. 3.05.2007, Заявл. 31.10.2005, 13 с.
123. DE102006057662 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; F28D9/02; H01L35/32; H02N11/00; F28D9/00; H01L35/32; Vehicle, has combustion engine and thermoelectric generator and heat

- exchanger has heating elements, which are arranged in exhaust gas channel of combustion engine and is pass or flow through exhaust gas / R. Rainer; Опубл. 12.06.2008, Заявл. 19.08.2006, 9 с.
124. DE4208358 (A1), Germany, Int. Cl. F01P9/00; H01L35/00; F01P9/00; H01L35/00; Thermoelectric cooling system for vehicle IC engine - has thermoelectric generator between hot and cold sides of cooler, and formed from series-connected semiconductor elements / Henatsch Alfred Prof Dr Ing [De]; Senst Juergen Dr Ing [De]; Опубл. 23.09.1993, 4 с.
125. DE4118979 (A1), Germany, Int. Cl. B60S1/48; B60S1/50; B60S1/52; F02G5/02; H01L35/00; B60S1/46; F02G5/00; H01L35/00; Thermoelectric generator for windscreen washer of motor vehicle - recovers waste heat from exhaust manifold for electric heating of elements in water reservoir and tubes / Sieber Roland [De]; Опубл. 10.12.1992, 6 с.
126. DE102006057662 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; H02N11/00; Thermoelectric generator arrangement for internal combustion engine of vehicle, has base plates positively connected with hot and cold upper surfaces respectively, where one plate has dimension that is three millimeter longer than matrix / Richter Rainer [De]; Schroeter Gunter [De]; Hiebl Alois [De]; Опубл. 05.02.2009, Заявл. 31.07.2007, 6 с.
127. DE102008030758 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; H01L35/00; H02N11/00; H01L35/00; Vehicle, has combustion engine and thermoelectric generator and heat exchanger has heating elements, which are arranged in exhaust gas channel of combustion engine and is pass or flow through exhaust gas / Schaab Alexander [De]; Опубл. 22.01.2009, Заявл. 28.06.2008, 7 с.
128. 15. Pat. DE102007005520 (A1), Germany, Int. Cl. H01L35/00; Vehicle having a thermoelectric generator / Richter Rainer [De]; Eder Andreas [De]; Опубл. 07.08.2008, Заявл. 03.02.2007, 7стр.
129. DE102006039024 (A1), Germany, Int. Cl. H01L35/32; F01N5/02; F02G5/02; H01L35/34; H01L35/32; F01N5/00; F02G5/00; H01L35/00; Thermo-generator for use in e.g. motor vehicle, for generating current from heat, has thermoelectric units arranged behind each other in axial direction of delivery pipe and insulated against each other at front sides by insulation layers; Weber Klaus [De]; Muchilo Dimitry [De]; Platzek Dieter [De]; Borath Roland [De]; Опубл. 21.02.2008;
130. DE102006009081 (A1), Germany, Int. Cl. F17C13/00; F17C13/00; Cryo fuel tank's boil-off gas dissipating device for motor vehicle, has thermoelectric generator for obtaining electrical energy, where warm side of generator is supplied with heat and other side with cold boil-off gas / Richter Rainer [De]; Schwarz Carsten [De]; Schreiner Michael [De]; Tonhauser Johann [De]; Опубл. 30.08.2007, Заявл. 28.02.2006, 3 с.
131. JP2008177301 (A), Japan, Int. Cl. H01L35/30; F01N5/02; F01P1/06; H02N11/00; H01L35/28; F01N5/00; F01P1/00; H02N11/00; Thermoelectric generator / Iwamoto Shoichi; Опубл. 31.07.2008, 19 с.
132. JP2007211748 (A), Japan, Int. Cl. F02G5/04; F01N5/02; F28D9/02; H02N11/00; F02G5/00; F01N5/00; F28D9/00; H02N11/00; Heat exchanger and thermoelectric generator / Matsushita Akihisa; Опубл. 23.08.2007, 14 с.
133. JP2007014161 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; F01N5/02; H01L35/28; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; H01L35/28; Thermoelectric generator for vehicle / Tsuchiya Jiro; Опубл. 18.01.2007, 13 с.
134. JP2006220005 (A), Japan, Int. Cl. F01N5/02; F01N5/04; F02B37/00; F02B41/10; F02G5/02; F02G5/04; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; F02B37/00; F02B41/00; F02G5/00; H01L35/28; H02N11/00; Thermoelectric generator for vehicle / Odawara Tomoyuki; Kubo Masahiko; Shii Kentaro; Опубл. 24.08.2006, 8 с.



135. JP2007006619 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; F01N5/02; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; H01L35/28; Thermoelectric generator / Hayashi Takashi; Iwamoto Shoichi; Опубл. 11.01.2007, 18 с.
136. JP2007014084 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; H01L35/28; H02N11/00; H01L35/28; Thermoelectric generator / Tsuchiya Jiro; Опубл. 18.01.2007, 14 с.
137. JP2006207428 (A), Japan, Int. Cl. F01N5/02; F02G5/04; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; F02G5/00; H01L35/28; H02N11/00; Thermoelectric generator / Hayashi Takashi; Опубл. 10.08.2006, 19 с.
138. 25. Pat. RU2191447 (C2), Russia, Int. Cl. H01L35/02; H01L35/00; (IPC1-7): H01L35/02; Thermoelectric generator / Baukin V E; Vjalov A P; Gorbach V D; Muranov G K; Sokolov O G; Опубл. 20.10.2002, Заявл. Pat. UA19090 (U), Ukraine, Int. Cl. H01L35/28; H01L35/28; Thermoelectric generator for a motor car / Anatyshuk L.I., Mikhaylovskiy V. Ya., Strutynska L.T.; Опубл. 15.12.2006, Заявл. 30.06.2006, 8стр.
139. CN101277082 (A), China, Int. Cl. B60K13/04; H02N11/00; B60R16/02; H01L35/28; H01L35/30; H01L35/32; H02N10/00; B60K13/00; H02N11/00; B60R16/02; H01L35/28; H01L35/32; H02N10/00; Thermoelectric generator for internal combustion engine / Shimoji Kouji [Jp]; Suzuki Kouichi [Jp]; Matsubara Shinya [Jp]; Опубл. 01.10.2008, Заявл. 04.02.2005, 13 с.
140. CN101313420 (A), China, Int. Cl. H01L35/30; F02G5/04; H01L35/28; F02G5/00; Thermoelectric power generator for variable thermal power source / Todd Crane Douglas [Us]; Опубл. 26.11.2008, Заявл. 28.06.2005.
141. CN1667937 (A), China, Int. Cl. H01L35/00; H02N11/00; H01L35/00; H02N11/00; Built-in type high-density thermoelectric generator / Zhang Zheng [Cn]; Опубл. 14.09.2005, Заявл. 25.02.2005; 16 с.
142. KR20030057985 (A), Korea, Int. Cl. H02N11/00; H02N11/00; (IPC1-7): H02N11/00; Thermoelectric semiconductor generator apparatus using exhaust gas waste heat / Yoo Won Ju [Kr]; Опубл. 07.07.2003, Заявл. 29.12.2001; 6 с.
143. EP1475532 (A2), Int. Cl. F01N5/02; F01P3/20; F01P7/16; F02B29/04; F02G5/02; H01L35/00; H01L35/30; F01N5/00; F01P3/20; F01P7/14; F02B29/00; F02G5/00; H01L35/00; H01L35/28; Thermoelectric generating device / Yamaguchi Hiroo [Jp]; Yamanaka Yasutoshi [Jp]; Опубл. 10.11.2004, Заявл. 03.05.2004; 21 с.
144. EP1897153 (A2), Int. Cl. H01L35/30; F02G5/04; H01L35/28; F02G5/00; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Опубл. 12.03.2008, Заявл. 28.06.2005; 24 с.
145. WO2008095582 (A1), Int. Cl. H01L35/00; Vehicle having a thermoelectric generator / Richter Rainer [De]; Eder Andreas [De]; Опубл. 14.08.2008, Заявл. 15.01.2008; 17стр.
146. WO2007/048392, Int. Cl. F28F32/12, F28F3/04, H01L35/30; Exhaust gas heat exchanger for a thermoelectric generator and thermoelectric generator / Stelter Michael [De]; Budde Joern [De]; Опубл. 03.05.2007, Заявл. 26.10.2005; 30 с.
147. WO2007002891 (A2), Int. Cl. H01L35/30; H01L35/28; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Опубл. 04.01.2007, Заявл. 28.06.2005; 24 с.
148. Pat. WO9850686 (A1), Int. Cl. H01L35/30; H01L35/28; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Опубл. 12.11.1998, Заявл. 9.05.1997; 46 с.

Надійшла до редакції 14.11.2019

**Анатичук Л.І.,** *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>2</sup>Черновицкий національний університет  
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,  
Чернівці, 58012, Україна

## **О ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*В работе проведен анализ публикаций, патентов, докладов на научных конференциях, касающихся создания термоэлектрических рекуператоров для утилизации отходов тепла от транспортных средств. Сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития таких исследований. Библиография 143, рис. 5.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, выхлопной газ, утилизация тепла.

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

**R.V. Kuz** *cand. phys. - math. Sciences*<sup>1,2</sup>

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

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

## **ABOUT THE PECULIARITIES OF PROGRESS IN THE WORKS TO CREATE THERMOELECTRIC RECUPERATORS FOR VEHICLES**

*The analysis of publications, patents, reports at scientific conferences related to the creation of thermoelectric recuperators for the utilization of heat from vehicles is carried out. Conclusions are made on the prospects for further development of such studies. Bibl. 143, Fig. 5.*

**Key words:** thermoelectric generator, exhaust gas, heat recovery.

## References

1. Birkholz U., Crob E., U. Stohrer, Voss K. Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi<sub>2</sub>-thermoelements // Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. - Arlington (USA). - 1988. - P. 124-128.
2. Fairbanks J. Vehicular Thermoelectric Applications. // Energy Efficiency Renewable Energy (EERE). - Rockville, Maryland (USA). - 2008.
3. Farmer JC White Paper for US Army Rapid Equipping Force: Waste Heat Recovery with Thermoelectric and Lithium-Ion Hybrid Power System. // UCRL-TR-236780. - 2007.
4. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. Predicted Performance of Quantum Well Thermoelectrics for Power Generation. // 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). - San Diego, CA (USA). - 2006. - P. 1-8.
5. Bass J., Campana R., Elsner N. Thermoelectric Generator for Diesel Trucks. // In Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics, DM Rowe, ed., P. 127, UK, 1991.
6. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Wells thermoelectric Devices for Diesel Engines. // 22th International Conference on Thermoelectrics ICT 2003. - Vol. 17 № 21 - 2003 P. 563 - 566.
7. Bass J., Elsner N., Leavitt F. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. // 13th International Conference on Thermoelectrics. - Vol. 316. - P. 295-298.
8. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Thermoelectric Devices for Diesel Engines. //
9. Kush Aleksandr S., John S. Bass, Saeid Ghamaty, Norbert B. Elsner Thermoelectric development at Hi-Z technology // Proc. of 20th International Conference on Thermoelectrics, 2001, pp. 422 - 430.
10. JC Bass, Norbert B. Elsner, and FA Leavitt, "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," AIP Conference Proceedings, vol. 316, pp. 295-298, 1995.
11. Morelli, DT, Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. In Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics, J.-P. Fleurial, ed., 1996, - P.383-386.
12. JC Bass, Norbert B. Elsner. Current Thermoelectric Programs at Hi-Z Technology Inc. // Proc. of the 11th International Conference on Thermoelectrics, USA, 1992.
13. JC Bass, Norbert B. Elsner, S. Ghamaty. Application of Advanced Thermoelectric Technology to the Diesel Generator // DEER 1997, California, July, 1997 P. 157-161.
14. Ghamaty S., Elsner B. Si / SiGe Quantum Well Thermoelectric Materials and Devices for Waste Heat Recovery From Vehicles and Industrial Plants. // International Symposium on Nano-Thermoelectrics. - Osaka (Japan). - 2007. - P. 1-5.
15. Bass J., Kusch A., Elsner N. Thermoelectric Generator (TEG) for Heavy Diesel Trucks. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. - Beijing (China). - 2001, P. 1-6.
16. Ikoma K. et al. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles. Proc. of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1988.
17. Kushch A., Karri MA, Helenbrook BF, Richter p., The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck. Proc. of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference, California, USA, 2004.
18. Thacher EF, BT Helenbrook, MA Karri, CJ Richter "Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck" // Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile engineering, pp. 95 - 107. 2007.

19. D. Crane. Potential thermoelectric application in diesel vehicles // Proc. DEER Conference, August 24-28, 2003. P. 1 - 6.
20. LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A., "Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery", DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA, 2005.
21. LaGrandeur, J., Crane, D., Hung, S., Mazar, B. and Eder, A., "Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe", International conference on thermoelectric, p. 343-48, 2006.
22. Crane, D., Lagrandeur, J., Jovovic, V., Ranalli, M., Adldinger, M., Poliquin, E., Dean, J., Kossakovski, D., Mazar, B., Maranville, C . TEG on-vehicle performance model validation. In Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012: October 16 - 19 2012, Dearborn, USA.
23. Crane D., Bell L. Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator. // Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics. - Vienna (Austria). - P. 11-16.
24. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. // Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics. - 2006. - P. 343-348.
25. Bell L. Prospects for Broadened Use of Thermoelectrics in the Automotive Vehicles. // Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference. - Irving, Texas (USA). - 2002.
26. LaGrandeur J. BSST Waste Heat Recovery Program // 2008 DOE FCVT Merit Review. - 2008.
27. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. DEER Conference. - Newport, RI (USA). - 2003.
28. Bell L. High Power Density Thermoelectric Systems. // Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics. - 2004. - Adelaide, AU.
29. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery // Proc. of Diesel Engine Emissions Reduction Conference. - Chicago (USA). - P. 1-7. - 2005.
30. Bell L. Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles. // Proc. 1th Thermoelectrics IAV Conference. - Berlin (Germany). - 2008. - P. 1-14.
31. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference. - Newport, Rhode Island (USA). - 2003. - P. 1-6.
32. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of a Thermoelectric Power Generator with Dynamic Thermal Power Source. // Proc. of ES2007 Energy Sustainability 2007. - Long Beach, CA (USA). - P. 1-9.
33. Fairbanks JW Thermoelectric applications in vehicles status 2008. // Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics. - Paris (France). - 2008. - P. PL-01.
34. Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles // Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics. - Nagoya (Japan) 1998 - 464-467.
35. Takanose E., Tamakoshi H. The Development of thermoelectric generator for passenger car // Proc. 12th International Conference on Thermoelectrics. - Yokohama (Japan). - 1993. - P. 467-470.
36. Matsubara K. "Development of high efficient thermoelectric stack for a waste exhaust heat recovery of vehicles" // in Proc. of 21st International conference on thermoelectrics, 2002,

- p. 418-423.
37. Mikami M, Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. Development of high-strength Fe<sub>2</sub>VAl thermoelectric module designed for motorcycle // Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics. - Jeju (Korea). - 2007. - P. 345-348.
  38. Hatzikraniotis E., Zorbas K, Triandafyllis I., Paraskevopoulos KM Study of Thermoelectric Power Generators and Applications in a Small Sized Cars // ECT2008 is the 6th European Conference on Thermoelectrics. - Paris (France). - 2008. - P. P2-18.
  39. Zorbas KT, Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos KM Power and Efficiency Calculation in Commercial TEG and Application in Wasted Heat Recovery in Automobile // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. - Odessa (Ukraine). - 2007.
  40. «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie», Берлін 2008.
  41. Wojciechowski K., Merkisz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automobile Engine // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. - Odessa (Ukraine). - 2007.
  42. Gao Min. Improving the conversion efficiency of thermoelectric generators through "pulse mode" operation. // AIP Conference Proceedings 1449, 447 (2012); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4731592>
  43. Gao Min, DM Rowe. Recent concepts in thermoelectric power generation //, 2002. Proceedings ICT '02. Twenty-First International Conference on Thermoelectrics.
  44. DM Rowe. The NEDO / Cardiff thermoelectric project to economically recover low temperature waste heat // 1998. Proceedings ICT 98. XVII International Conference on Thermoelectrics.
  45. O. Glavatskaya, p. Goupil, A. El Bakkali, O. Shonda. Exergetic Analysis of a Thermo-Generator for Automotive Application: a Dynamic Numerical Approach // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 475-481 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731599.
  46. D. Manno., G. Vidiella. Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks // 9th European Conference on Thermoelectrics. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731598
  47. Jamil I. Ghogel. Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application // Proceedings ICED 05 the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15-18.08.2005.
  48. JG Haidar; JI Ghogel. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators // Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.01TH8589).
  49. Vázquez J., Sanz-Bobi MA, Palacios R., Arenas A. State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles // Proc. 7th European Workshop on Thermoelectrics. - Pampelona (Spain). - 2002.
  50. Olle Hugblom, Ronnie Andersson. CFD Modeling of Thermoelectric Generators in Automotive EGR-coolers. // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 497-500 (2012); doi: 10.1063 / 1.4731602.
  51. Andrea Montecucco, Jonathan Siviter, Andrew R. Knox. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators // The 7th International Conference on Applied Energy - ICAE2015. Energy Procedia 75 (2015) 597 - 602.
  52. Christian Häfele, Michael Schier, Steffen Hahn, Tobias Weiler, Horst Friedrich. Experimentelle Fahrzeug-Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren /

- Thermoelectrics goes automotive. Jänsch, Daniel (Hrsg.) Renningen: expert-Verl. 2011.
53. Doug Crane, John Lagrandeur, Vladimir Jovovic, Marco Ranalli, Martin Adldinger, Eric Poliquin, Joe Dean, Dmitri Kossakovski, Boris Mazar, Clay Maranville. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007 / s11664-012-2327-8. 2012.
54. F. Frobenius, G. Gaiser, U. Rusche, B. Weller. Thermoelectric Generators for the Integration into Automotive Exhaust Systems for Passenger Cars and Commercial Vehicles. Journal of Electronic Materials DOI: 10.1007 / s11664-015-4059-z. 2015.
55. Yanliang Zhanga, Martin Clearyb, Xiaowei Wangb, Nicholas Kempfa, Luke Schoenseea, Jian Yangb, Giri Joshib, Lakshmikanth Medac. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. Energy Conversion and Management Volume 105, 15 November 2015, Pages 946-950.
56. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A - 15/02289-SE. Jonas Coyet Fredrik Borgström. Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University, Sweden Linköping, June 2015.
57. Terry J. Hendricks, Shannon Yee, Saniya Leblanc. Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive. Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007 / s11664-015-4201-y
58. Christopher M. Jaworski. Opportunitites for Thermoelectric Energy Conversion in Hybrid Vehicles: Thesis: May 18, 2007 The Ohio State University. Department of Mechanical Engineering.
59. Kevin D. Smith. An Investigation into the Viability of Heat Sources for Thermoelectric Power Generation Systems: Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering: February 2009. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
60. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрических генерирования энергии в Японии // Термоэлектричество. - 2007. - № 2. - С. 21-31.
61. Кадзикава Т. Современное состояние исследований и разработок в сфере технологии термоэлектрических генерирования в Японии // Термоэлектричество. - 2009. - № 1. - С. 18-30.
62. Matsubara K., Matsuura M. A Thermoelectric Application to Vehicles // Thermoelectric Handbook: macro to nano. - Boca Raton: Taylor & Francis. - 2006. - P. 52-1-52-11.
63. DM Rowe, J. Smith, G. Thomas, G. Min. Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat // Journal of Elec Materi (2011) 40: 784. doi: 10.1007 / s11664-011-1571-7
64. DM Rowe. Review. Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 1, no. 1 (November 2006).
65. Saniya LeBlanc. Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications // Sustainable Materials and Technologies 1-2 (2014) 26-35.
66. Jing-Hui Meng, Xiao-Dong Wang, Wei-Hsin Chen. Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery // Energy Conversion and Management 120 (2016) 71-80.
67. Saqr KM, Mansour MK, Musa MN Thermal Design of Automobile Exhaust Based Thermoelectric Generators: Objectives and Challenges // International Journal of Automotive Technology. - 2008. - Vol. 9, № 9. - P. 155-160.
68. Сакр Х.М., Мансур М.Х., Мусса М.Н. Тепловой расчёт термоэлектрических генераторов работающих на выхлопных газах автомобиля: цели и задачи // Термоэлектричество. - 2008. -

№ 1. - С. 64-73.

69. Yanliang Zhang, Martin Cleary, Xiaowei Wang, Nicholas Kempf, Luke Schoensee, Jian Yang, Giri Joshi, Lakshmikanth Meda. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery // *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 946-950.
70. Sun-kook kim, Byeong-Cheol Won, Seok-Ho Rhi, Shi-Ho Kim, Jeong-Ho Yoo, Ju-Chan Jang. Thermoelectric Power Generation System for Future Hybrid Vehicles Using Hot Exhaust Gas // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 40, No. 5, 2011 DOI: 10.1007 / s11664-011-1569-1.
71. Nyambayar Baatar, Shiho Kim. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles // *TELKOMNIKA*, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523 ~ 530.
72. X. Liu, YD Deng, S. Chen, WS Wang, Y. Xu, CQ Su. A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler // *Case Studies in Thermal Engineering* 2 (2014) 62-66.
73. X. Liu Y. D. Deng W. S. Wang C. Q. Su. Experimental Investigation of Exhaust Thermoelectric System and Application for Vehicle // *Journal of Electronic Materials*, June 2015, Volume 44, Issue 6, pp 2203-2210.
74. V. Pandiyarajana, M. Chinnappandianb, V. Raghavana, R. Velraja. Second law analysis of a diesel engine waste heat recovery with a combined sensible and latent heat storage system // *Energy Policy*. Volume 39, Issue 10 October 2011, Pages 6011-6020.
75. C. Ramesh Kumar, Ankit Sonthalia, Rahul Goel. Experimental study on waste heat recovery from an internal combustion engine using thermoelectric technology // *Thermal Science*, Year 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 1011-1022.
76. Zhang X., Chau KT, Chan CC Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // *Journal of Asian Electric Vehicles*. - 2008. - Vol. 6, № 2. - P. 1119-1124.
77. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator // *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007 / s11664-015-4129-2.
78. A. Heghmanns, S. Wilbrecht, M. Beitelschmidt, K. Geradts. Parameter Optimization and Operating Strategy of a TEG System for Railway Vehicles // *Journal of Electronic Materials*. DOI: 10.1007 / s11664-015-4145-2
79. Wei He, Shixue Wang, Xing Zhang, Yanzhe Li, Chi Lu. Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat // *Energy*, Volume 91, November 2015, Pages 1-9.
80. Shuhai Yu, Qing Du., Hai Diao, Gequn Shu, Kui Jiao. Start-up modes of thermoelectric generator based on vehicle exhaust waste heat recovery // *Applied Energy*, Volume 138, 15 January 2015, Pages 276-290.
81. Gequn Shu, Youcai Liang, Haiqiao Wei, Hua Tian, Jian Zhao and Lina Liu. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, vol. 19 issue C, pages 385-401.
82. MA Korzhuev, TE Svechnikova. Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport // *Journal of Thermoelectricity* №3 – 2013.
83. Neild Jr. AB "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.

84. Gruen D., Singh D., Routhbort J. Development of High-ZT Bulk Thermoelectric (New Program) // VT Merit Review. - 2008.
85. Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - PP. 296-300.
86. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. Diesel Truck Thermoelectric Generator. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - P. 301-305.
87. Thacher E. Wagner J. Thermoelectric Generator. // Clarkson University.
88. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2006 Progress Report. - P. 232-236.
89. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of Thermoelectric Power Generator with a dynamic Thermal power Source. // J. Energy Resour. Technol. - 2009. - Vol. 131, № 1. - 8 p.
90. Bell L., LaGrandeur J. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. - FY 2005 Progress Report. - PP. 287-290.
91. Luste O.J., Kuz R.V., Strutynskiy M.N. (2009). Computer technologies in thermoelectricity (Review). *Geometric and Computer Modeling*, 25, 78-89.
92. Kuz R.V., Strutynskiy M.M. (2010). Computer simulation of thermoelectric single-stage generator module. *J. Thermoelectricity*, 3, 21-27.
93. Anatyshuk LI, Luste OJ, Kuz RV Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // *Journal of Electronic Materials*, Vol. 40, Issue 5, 2011.
94. LI Anatyshuk and RV Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. *Thermoelectrics goes automotive*. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
95. LI Anatyshuk and RVKuz, Materials for vehicular thermoelectric generators. *Journal of Electronic Materials*, Volume 41, Number 6 (2012).
96. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2011). Efficiency of thermoelectric recuperators of exhaust gas heat of internal combustion engines. *J. Thermoelectricity*, 4, 78-83.
97. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 93-100.
98. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of Bi-Te based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *J. Thermoelectricity*, 4, 75-82.
99. Kuz R.V. (2012). Moving vehicle parameters monitoring system. *J. Thermoelectricity*, 4, 89-94.
100. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Prybyla A.V. (2013). The effect of heat exchange system on the efficiency of thermoelectric air conditioner. *J. Thermoelectricity*, 1, 75-81.
101. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric generator in a diesel engine car. *J. Thermoelectricity*, 2, 60-67.
102. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric generator in a petrol engine car. *J. Thermoelectricity*, 3, 87-91.
103. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator in a car with a diesel engine. *J. Thermoelectricity*, 4, 81-87.
104. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator in a car with a petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 5, 49-54.
105. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Prybyla A.V. (2014). Efficiency improvement of sectional thermoelectric heat recuperators. *J. Thermoelectricity*, 6, 77-88.
106. LI Anatyshuk, RV Kuz. / *Materials Today: Proceedings 2* (2015) 871 - 876 / *Materials Today:*



- Proceedings 2 (2015) 871 - 876. (ECT-2014), Madrid.
107. Dudal V.O., Kuz R.V. (2016). Temperature distributions in soil and possibilities of underground thermoelectric generators. *J.Thermoelectricity*, 2, 63-69.
108. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2016). Thermoelectric generator for trucks. *J.Thermoelectricity*, 3, 5-10.
109. Pat. 71722 Ukraine, MKI H01L 35/02. Thermoelectric generator that uses the heat of the exhaust gases of an internal combustion engine. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., 25.07.2012, Publ. №14. (in Ukraine)
110. Pat. №71613 Ukraine. Thermoelectric car generator. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., 25.07.2012, Publ. №14. (in Ukraine)
111. Pat. №73671 Ukraine. Car power supply system. Anatyshuk L.I., Kuz R. V., 10.10.2012, Publ. №19. (in Ukraine)
112. US3197342. AB Neild Jr. Applic. 26.09.1961. Publ. 27.07.1965.
113. Pat. US 3 297 492, USA, Int. Cl. H01L35/00. Internal combustion engine exhaust with thermoelectric generator / Pepper Vernon D (US); Publication date 1967-01-10, 3p.
114. US 3 217 696 (A), USA, Int. Cl. F02B61/04; F02B63/04; F02B75/20; Thermoelectric generator for internal combustion engine / Carl Kiekhaefer Elmer; Publication date 1965-11-16, Priority date. 1962-09-28, 8p.
115. US 4 673 863, USA, Int. Cl. F01N5/02; H01L35/30; Thermoelectric generator for engine exhaust / Alan Shwabric; Publ. 16.06.1987, Applic. 22.05.1985, 4p.
116. US 5 397 922, USA, Int. Cl. H02K33/00; H02K35/00; Integrated thermo-electro engine / Marius A. Paul, Ana Paul; Publ. 14.04.1995, Applic. 02.07.1993, 9p.
117. US 5 625 245, USA, Int. Cl. H02N3/00; Thermoelectric generator for motor vehicle / J. p. Bass; Publ. 29.04.1997, Applic. 19.10.1993, 11p.
118. US 2002 /0 117 198 A1, USA, Int. Cl. H02K33/00; H02K35/00; Thermoelectric generator for a vehicle / D.B. Kok, R. Bush; Publ. 29.08.2002, Applic. 18.01.2002, 5p.
119. 2005 /0 172 993, USA, Int. Cl. H01L35/28; H01L35/30; Thermoelectric generator for internal combustion engine / K. Shimoji, K. Suzuki, S. Matsubara; Publ. 11.08.2005, Applic. 4.02.2005, 13p.
120. US 6 986 247 B1, USA, Int. Cl. F01N35/00; Thermoelectric catalytic power generator with preheat / R. J. Parise; Publ. 17.01.2006, Applic. 28.03.2002, 20p.
121. 2007 /0 095 379 A1, USA, Int. Cl. H01L35/30; Thermoelectric generator / M. A. Taher, R. Dupree. Dong Fei, S.G. Garner; Publ. 3.05.2007, Applic. 31.10.2005, 13p.
122. DE102006057662 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; F28D9/02; H01L35/32; H02N11/00; F28D9/00; H01L35/32; Vehicle, has combustion engine and thermoelectric generator and heat exchanger has heating elements, which are arranged in exhaust gas channel of combustion engine and is pass or flow through exhaust gas / R. Rainer; Publ. 12.06.2008, Applic. 19.08.2006, 9p.
124. DE4208358 (A1), Germany, Int. Cl. F01P9/00; H01L35/00; F01P9/00; H01L35/00; Thermoelectric cooling system for vehicle IC engine - has thermoelectric generator between hot and cold sides of cooler, and formed from series-connected semiconductor elements / Henatsch Alfred Prof Dr Ing [De]; Sens Juergen Dr Ing [De]; Publ. 23.09.1993, 4p.
125. DE4118979 (A1), Germany, Int. Cl. B60S1/48; B60S1/50; B60S1/52; F02G5/02; H01L35/00; B60S1/46; F02G5/00; H01L35/00; Thermoelectric generator for windscreen

- washer of motor vehicle - recovers waste heat from exhaust manifold for electric heating of elements in water reservoir and tubes / Sieber Roland [De]; Publ. 10.12.1992, 6p.
126. DE102006057662 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; H02N11/00; Thermoelectric generator arrangement for internal combustion engine of vehicle, has base plates positively connected with hot and cold upper surfaces respectively, where one plate has dimension that is three millimeter longer than matrix / Richter Rainer [De]; Schroeter Gunter [De]; Hiebl Alois [De]; Publ. 05.02.2009, Applic. 31.07.2007, 6p.
127. DE102008030758 (A1), Germany, Int. Cl. H02N11/00; H01L35/00; H02N11/00; H01L35/00; Vehicle, has combustion engine and thermoelectric generator and heat exchanger has heating elements, which are arranged in exhaust gas channel of combustion engine and is pass or flow through exhaust gas / Schaab Alexander [De]; Publ. 22.01.2009, Applic. 28.06.2008, 7p.
128. 15. Pat. DE102007005520 (A1), Germany, Int. Cl. H01L35/00; Vehicle having a thermoelectric generator / Richter Rainer [De]; Eder Andreas [De]; Publ. 07.08.2008, Applic. 03.02.2007, 7p.
129. DE102006039024 (A1), Germany, Int. Cl. H01L35/32; F01N5/02; F02G5/02; H01L35/34; H01L35/32; F01N5/00; F02G5/00; H01L35/00; Thermo-generator for use in e.g. motor vehicle, for generating current from heat, has thermoelectric units arranged behind each other in axial direction of delivery pipe and insulated against each other at front sides by insulation layers; Weber Klaus [De]; Muchilo Dimitry [De]; Platzek Dieter [De]; Borath Roland [De]; Publ. 21.02.2008;
130. DE102006009081 (A1), Germany, Int. Cl. F17C13/00; F17C13/00; Cryo fuel tank's boil-off gas dissipating device for motor vehicle, has thermoelectric generator for obtaining electrical energy, where warm side of generator is supplied with heat and other side with cold boil-off gas / Richter Rainer [De]; Schwarz Carsten [De]; Schreiner Michael [De]; Tonhauser Johann [De]; Publ. 30.08.2007, Applic. 28.02.2006, 3 p.
131. JP2008177301 (A), Japan, Int. Cl. H01L35/30; F01N5/02; F01P1/06; H02N11/00; H01L35/28; F01N5/00; F01P1/00; H02N11/00; Thermoelectric generator / Iwamoto Shoichi; Publ. 31.07.2008, 19 p.
132. JP2007211748 (A), Japan, Int. Cl. F02G5/04; F01N5/02; F28D9/02; H02N11/00; F02G5/00; F01N5/00; F28D9/00; H02N11/00; Heat exchanger and thermoelectric generator / Matsushita Akihisa; Publ. 23.08.2007, 14 p.
133. JP2007014161 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; F01N5/02; H01L35/28; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; H01L35/28; Thermoelectric generator for vehicle / Tsuchiya Jiro; Publ. 18.01.2007, 13 c.
134. JP2006220005 (A), Japan, Int. Cl. F01N5/02; F01N5/04; F02B37/00; F02B41/10; F02G5/02; F02G5/04; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; F02B37/00; F02B41/00; F02G5/00; H01L35/28; H02N11/00; Thermoelectric generator for vehicle / Odawara Tomoyuki; Kubo Masahiko; Shii Kentaro; Publ. 24.08.2006, 8 p.
135. JP2007006619 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; F01N5/02; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; H01L35/28; Thermoelectric generator / Hayashi Takashi; Iwamoto Shoichi; Publ. 11.01.2007, 18 c.
136. JP2007014084 (A), Japan, Int. Cl. H02N11/00; H01L35/28; H02N11/00; H01L35/28; Thermoelectric generator / Tsuchiya Jiro; Publ. 18.01.2007, 14 p.
137. JP2006207428 (A), Japan, Int. Cl. F01N5/02; F02G5/04; H01L35/30; H02N11/00; F01N5/00; F02G5/00; H01L35/28; H02N11/00; Thermoelectric generator / Hayashi Takashi; Publ. 10.08.2006, 19 p.

138. 25. Pat. RU2191447 (C2), Russia, Int. Cl. H01L35/02; H01L35/00; (IPC1-7): H01L35/02; Thermoelectric generator / Baukin V E; Vjalov A P; Gorbach V D; Muranov G K; Sokolov O G; Publ. 20.10.2002, Applic. Pat. UA19090 (U), Ukraine, Int. Cl. H01L35/28; H01L35/28; Thermoelectric generator for a motor car / Anatyshuk L.I., Mikhaylovskiy V. Ya., Strutynska L.T.; Publ. 15.12.2006, Applic. 30.06.2006, 8p.
139. CN101277082 (A), China, Int. Cl. B60K13/04; H02N11/00; B60R16/02; H01L35/28; H01L35/30; H01L35/32; H02N10/00; B60K13/00; H02N11/00; B60R16/02; H01L35/28; H01L35/32; H02N10/00; Thermoelectric generator for internal combustion engine / Shimoji Kouji [Jp]; Suzuki Kouichi [Jp]; Matsubara Shinya [Jp]; Publ. 01.10.2008, Applic. 04.02.2005, 13 c.
140. CN101313420 (A), China, Int. Cl. H01L35/30; F02G5/04; H01L35/28; F02G5/00; Thermoelectric power generator for variable thermal power source / Todd Crane Douglas [Us]; Publ. 26.11.2008, Applic. 28.06.2005.
141. CN1667937 (A), China, Int. Cl. H01L35/00; H02N11/00; H01L35/00; H02N11/00; Built-in type high-density thermoelectric generator / Zhang Zheng [Cn]; Publ. 14.09.2005, Applic. 25.02.2005; 16
142. KR20030057985 (A), Korea, Int. Cl. H02N11/00; H02N11/00; (IPC1-7): H02N11/00; Thermoelectric semiconductor generator apparatus using exhaust gas waste heat / Yoo Won Ju [Kr]; Publ. 07.07.2003, Applic. 29.12.2001; 6 p.
143. EP1475532 (A2), Int. Cl. F01N5/02; F01P3/20; F01P7/16; F02B29/04; F02G5/02; H01L35/00; H01L35/30; F01N5/00; F01P3/20; F01P7/14; F02B29/00; F02G5/00; H01L35/00; H01L35/28; Thermoelectric generating device / Yamaguchi Hiroo [Jp]; Yamanaka Yasutoshi [Jp]; Publ. 10.11.2004, Applic. 03.05.2004; 21 p.
144. EP1897153 (A2), Int. Cl. H01L35/30; F02G5/04; H01L35/28; F02G5/00; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Publ. 12.03.2008, Applic. 28.06.2005; 24 p.
145. WO2008095582 (A1), Int. Cl. H01L35/00; Vehicle having a thermoelectric generator / Richter Rainer [De]; Eder Andreas [De]; Publ. 14.08.2008, Applic. 15.01.2008; 17p.
146. WO2007/048392, Int. Cl. F28F32/12, F28F3/04, H01L35/30; Exhaust gas heat exchanger for a thermoelectric generator and thermoelectric generator / Stelter Michael [De]; Budde Joern [De]; Publ. 03.05.2007, Applic. 26.10.2005; 30 p.
147. WO2007002891 (A2), Int. Cl. H01L35/30; H01L35/28; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Publ. 04.01.2007, Applic. 28.06.2005; 24 p.
148. Pat. WO9850686 (A1), Int. Cl. H01L35/30; H01L35/28; Thermoelectric power generator with intermediate loop / Bell Lon E [Us]; Crane Douglas Todd [Us]; Publ. 12.11.1998, Applic. 9.05.1997; 46 p.

Submitted 14.11.2019

УДК 537.32

Анатичук Л.І., акад. НАН України<sup>1,2</sup>  
Тодуров Б.М., док. мед. наук, професор<sup>3</sup>  
Кобилянський Р.Р. канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>,  
Джал С.А.<sup>1,2</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  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна,

<sup>3</sup>ГУ "Інститут серця МОЗ України",  
вул. Братиславська, 5А, Київ, 02660, Україна

## ПРО ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МІКРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОСТИМУЛЯТОРІВ

---

*У роботі наведено конструкцію та принцип роботи сучасних електрокардіостимуляторів, а також їх класифікацію за механізмом роботи та джерелами живлення. Наведено порівняльний аналіз джерел живлення та визначено перспективи застосування термоелектричних мікрогенераторів для живлення електрокардіостимуляторів. Бібл. 66, рис. 15, табл. 8.*

**Ключові слова:** електрокардіостимулятор, джерело живлення, термоелектричний мікрогенератор, серцево-судинні захворювання.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) серцево-судинні захворювання (гіпертонія, ішемічна хвороба серця, порушення мозкового кровообігу, серцева недостатність ті інші вади серця) є причиною третини смертей у всьому світі. Повідомляється, що в 2017 році у світі налічувалося понад 400 млн. осіб, які страждають серцево-судинними захворюваннями. Щороку вони забирають понад 17 млн. людських життів, а за прогнозами експертів до 2030 року ця кількість зросте до 23 млн. осіб [1].

В Європейському регіоні серцево-судинні захворювання є причиною половини всіх смертей. 80 % серцево-судинних захворювань реєструють у країнах з низьким і середнім рівнем доходів. Як повідомляє УНІАН, серцево-судинні захворювання є основною причиною смертності в Україні, особливо серед чоловіків. До серцево-судинних захворювань належать – ішемічна хвороба серця (серцеві напади), інсульт, підвищений артеріальний тиск (гіпертонія), захворювання периферичної артерії, ревматична хвороба серця, вроджені захворювання серця і серцева недостатність [2].

Україна займає перше місце в Європі за смертністю від серцево-судинних захворювань. За даними ВООЗ, у 2015 році від серцево-судинних захворювань померло 440 тис. українців і

ця цифра щороку збільшується. Смертність від серцево-судинної патології в Україні становить 66,3% загального показника. Серед захворювань дорослого населення на серцево-судинні захворювання лідирують гіпертонічна хвороба – 41 %, ішемічна хвороба серця – 28 %, цереброваскулярні хвороби – 16 % та ін. [3, 4].

Однак, знизити рівень смертності від серцево-судинних захворювань дає можливість імплантація електрокардіостимуляторів (ЕКС) – штучних водіїв ритму серця. Щороку у всьому світі імплантується близько 600 000 ЕКС[11], що дозволяє продовжити життя пацієнтів, хворих на тяжкі порушення серцевої діяльності. У даний час існують різні типи ЕКС (однокамерні, двокамерні, трикамерні та швидко-чутливі та ін.), споживана електрична потужність яких значно відрізняється і знаходиться в межах від 10 мкВт до 300 мВт. Для живлення таких ЕКС можуть використовуватись електрохімічні гальванічні батареї, радіоізотопні термоелектричні генератори, а також термоелектричні і п'єзоелектричні мікрогенератори. Слід зазначити, що найбільш поширеними джерелами живлення ЕКС є електрохімічні гальванічні батареї, строк служби яких складає близько 10 років, після чого необхідна заміна електрохімічної батареї, тобто повторна операція. Тому актуальною є проблема заміни гальванічних батарей альтернативними джерелами живлення з тривалим ресурсом роботи [5].

*Метою даної роботи* є проведення порівняльного аналізу джерел живлення для ЕКС та визначення доцільності застосування термоелектричних мікрогенераторів.

## **Будова та принцип роботи ЕКС**

Електрокардіостимулятор (ЕКС) – це електронний пристрій, що виконує функцію штучного водія ритму серця, який встановлюється людині з метою відновлення і нормалізації порушень ритму серця. ЕКС оснащений спеціальною схемою для генерації електричних імпульсів. Найчастіше ЕКС встановлюють при брадикардії, атріовентрикулярних блокадах, синдромі слабкості синусового вузла [12].

У даний час в медичній практиці існують такі основні типи ЕКС: тимчасові, зовнішні та імплантовані. Сучасний тимчасовий ЕКС (рис. 1, 2) – це прилад, який встановлюється при необхідності швидкого коригування серцевого ритму (наприклад, при гострому інфаркті міокарда, а також деяких видах брадикардії та тахіаритмії). Також такий ЕКС застосовується в передопераційному періоді з подальшою імплантацією приладу постійної дії, який замінює встановлений ззовні тимчасовий ЕКС.

Кожен зовнішній ЕКС відноситься до групи тимчасових ЕКС і широко використовується для корекції серцевого ритму за різними показниками. Конструкція зовнішнього ЕКС передбачає наявність достатньо великих розмірів електродів, які накладаються в області серця на грудну клітку і на ділянку, розташовану між хребтом і лівою лопаткою(серцева проекція). Сучасні зовнішні ЕКС затребувані у діагностиці, профілактиці та терміновому відновленні нормального ритму серцевих скорочень без операційного втручання [20].

Однак, предметом даної роботи є саме імплантовані ЕКС, тому розглянемо їх більш детально.

У свою чергу, імплантовані ЕКС поділяються на однокамерні, двокамерні, трикамерні та швидко-чутливі ЕКС(внутрішньосердечні). Тип необхідного приладу для кожного клінічного випадку визначаються лікарем індивідуально, виходячи з результатів діагностичних досліджень [19 – 29].

Однокамерний ЕКС має тільки один активний електрод та стимулює лише одну камеру серця (шлуночок або передсердя). Такий ЕКС є простим та дешевим приладом, який не має можливості імітувати фізіологічне (природне) скорочення серцевого м'язу (рис. 3). На сьогоднішній день такі ЕКС прийнято використовувати лише при постійній формі плевральної аритмії, причому електрод встановлюється у правому шлуночку.



Рис.1. Тимчасовий ЕКС [12]



Рис.2. Зовнішній ЕКС [12]

Двокамерний ЕКС з'єднується через електроди з передсердям і шлуночком одночасно (рис.4). У разі виникнення потреби у стимуляції генерований імпульс послідовно подається спочатку на передсердя, а потім на шлуночок. Такий режим відповідає фізіологічному скороченню міокарда, нормалізує серцевий викид крові, забезпечує узгоджену роботу передсердя і шлуночка, а також покращує адаптацію пацієнта до фізичних навантажень. Додаткові функції сучасних двокамерних ЕКС дозволяють підібрати оптимальний режим для кожного пацієнта.

Трикамерний ЕКС (кардіосинхронізуючий) здатний стимулювати у певній послідовності три камери серця: правий і лівий шлуночок, а також праве передсердя (рис.5). Такі ЕКС забезпечують нормальну роботу серця і фізіологічну внутрішньосерцеву гемодинаміку. Ці кардіосинхронізуючі прилади можуть застосовуватися для усунення десинхронії камер серця при важких формах брадиаритмії або брадикардії. Такі прилади імплантують пацієнтам з найнебезпечнішою формою аритмії – шлуночкова тахікардія і фібриляція шлуночків або для профілактики раптової серцевої смерті.

Швидкісно-чутливий ЕКС – це мініатюрний прилад, що імплантується всередину серця повністю (рис.6). Такий ЕКС оснащений сенсорними датчиками, що мають можливість фіксувати зміни в активності нервової системи, частоту дихання і температуру тіла. ЕКС такого типу застосовуються для кардіостимуляції при ригідному синусовому ритмі, який провокується значним виснаженням серця. Такі ЕКС значно точніше можуть визначати зміни фізичної активності та серцевого ритму пацієнта, ніж вищевказані дво- та трикамерні.



Рис. 3. Імплантований однокамерний ЕКС [31]



Рис. 4. Імплантований двокамерний ЕКС [31]



Рис. 5. Імплантований трикамерний ЕКС [31]



Рис. 6. Імплантований швидкісно-чутливий  
(внутрішньосердечний) ЕКС [31]



Імплантований ЕКС складається з комплексу ендокардіальних електродів, конекторного блоку, мікропроцесора, корпусу та батареї живлення (рис.7). Електроди представляють собою гнучкі і міцні спіральні провідники, що закріплюються в камерах серця та передають до серця випромінювані приладом імпульси і також передають до мікропроцесора інформацію про активність серця. Кількість ендокардіальних електродів залежить від стану захворювання і необхідності стимуляції різних відділів серця. Конекторний блок призначений для з'єднання корпусу ЕКС з ендокардіальними електродами. Корпус пристрою виготовляється з титану чи інших сплавів, які не взаємодіють з тілом людини. Всередині корпусу знаходиться мікропроцесор, що працює в автономному режимі та представляє собою спеціальний пристрій для контролю і регулювання налаштувань ЕКС. Мікропроцесор також за допомогою високочутливих датчиків проводить Холтерівський моніторинг та спостерігає за серцебиттям людини, втручаючись у роботу серця у разі виявлення порушень.

Основними елементами ЕКС є ендокардіальні електроди, що використовуються для стимулювання, ресинхронізації або дефібриляції серця. Вони складаються з кількох загальних компонентів, включаючи електроди, провідники, ізолятори, механізми фіксації та штифти з'єднувачів (рис.8). Дефібриляційні отвори також містять ударні котушки для доставки високовольтних електричних розрядів для зупинки фібриляції шлуночків. Кількість електродів залежить від стану захворювання і необхідності стимуляції відділів серця [15].

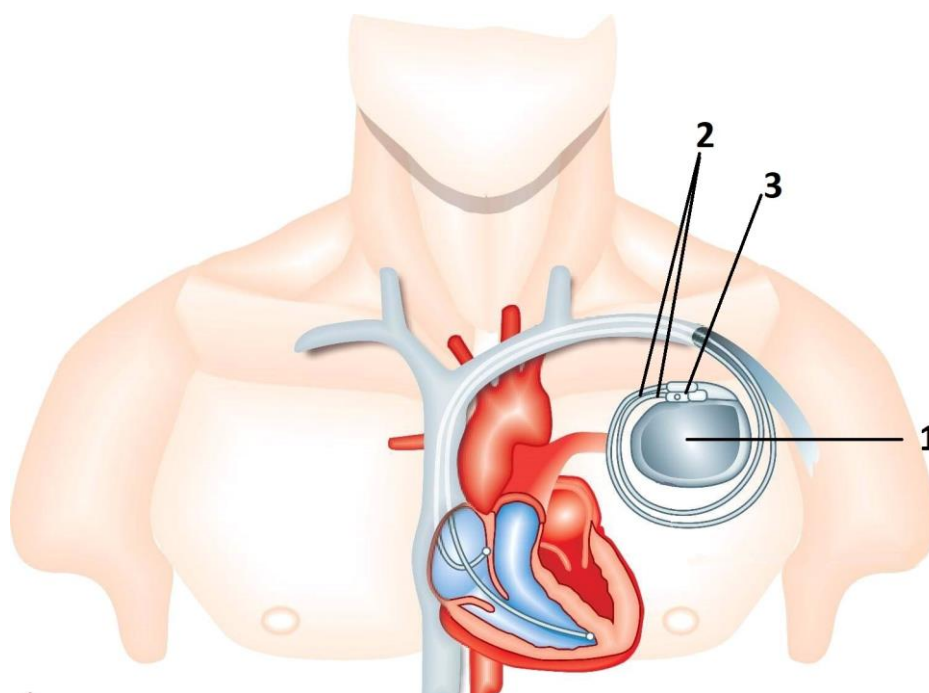


Рис. 7. Конструкція імплантованого ЕКС: 1 – ЕКС, 2 – ендокардіальні електроди, 3 – конекторний блок

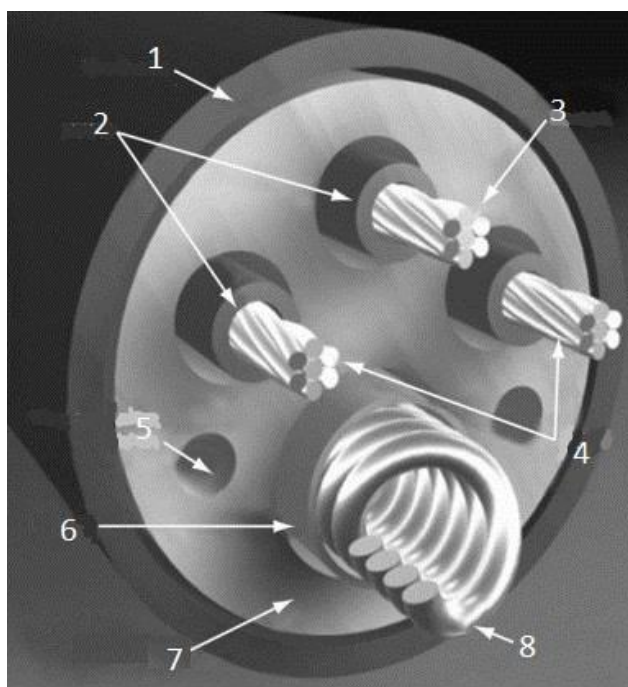


Рис. 8. Конструкція ендокардіального електрода [15]:  
1 – уританове захисне покриття, 2 – ETFE (покриття),  
3 – сенсор, 4 – дефібрилятор, 5 – стиснутий промінь,  
6 – PTFE(покриття), 7 – НР силікон, 8 – електрод

Принцип роботи ЕКС полягає у контролі частоти серцевих скорочень(стимуляції або інгібіції) та дефібриляції серця у разі його зупинки, шляхом штучного скорочення м'язів серця за допомогою електричних імпульсів. Стимуляція серця людини здійснюється ЕКС шляхом передачі електричних імпульсів від мікропроцесора через ендокардіальні електроди до м'язів серця [16, 17].

Мікропроцесор ЕКС постійно виконує аналіз генерованих серцем імпульсів, проводить імпульси до стінки серця і контролює їх синхронізацію. Ендокардіальні електроди передають генерований ЕКС імпульс до камери серця і передають назад в мікропроцесор інформацію про активність серця. На кінці кожного ендокардіального електрода розміщена металева насадка, що забезпечує контакт електрода з відповідним відділом серця, а також «зчитує» інформацію про електричну активність серця і при необхідності передає електричні імпульси.

При малій кількості скорочень серця або повній її відсутності ЕКС переходить у режим постійної стимуляції і передає імпульси до серця з частотою, що була задана при імплантації приладу. При нормальній роботі серця ЕКС починає працювати у режимі очікування і функціонує лише за відсутності самостійних серцевих скорочень. У сучасних моделях ЕКС контроль налаштувань роботи здійснюється мікропроцесором, програмується під час імплантації та може бути змінений дистанційно і без операційного втручання [18].

### Загальні вимоги до джерел живлення ЕКС

За останні 50 років відбулась стрімка еволюція технології виготовлення ЕКС (рис. 9). Габаритні розміри та енергоспоживання сучасних ЕКС значно зменшились з одночасним

збільшенням їх функціональних можливостей. Станом на сьогодні найбільш поширеними є одно-, дво- та трикамерні ЕКС, що імплантуються у підшкірний карман поблизу серця з подальшим введенням електродів у камери серця, та швидко-чутливі ЕКС, що імплантуються безпосередньо всередину серця. Електричне живлення вказаних вище типів ЕКС здійснюється за рахунок електрохімічних гальванічних батарей. Вимоги до джерел живлення таких типів ЕКС є різними. Порівняльний аналіз технічних вимог до джерел живлення для ЕКС наведено у таблиці 1.



Рис. 9. Еволюція технології виготовлення ЕКС

Таблиця 1

Технічні вимоги до джерел живлення для ЕКС [34,43-46,]

Параметр	Одно-, дво- та трикамерні ЕКС	Швидко-чутливий (внутрішньосердечний) ЕКС
Габарити	49 мм x 46 мм x 6 мм	довжина 42 мм, діаметр 5.99 мм
Маса	20-30 г	2-5 г
Робоча напруга	1.5-4.7 В	1.5-2 В
Електрична потужність	0.1-370 мВт	0.070 мВт
Ємність акумулятора	2000 мА	120-248 мА (novel)
Термін експлуатації	9-10 років	4.7-14.7 років

Із табл. 1 видно, що габаритні розміри електрохімічних гальванічних джерел живлення для імплантованих одно-, дво- та трикамерних ЕКС знаходяться в межах 49 мм × 46 мм × 6 мм, а для імплантованих швидко-чутливих ЕКС – довжина 42 мм, максимальний діаметр 5.99 мм. Маса таких джерел живлення не перевищує 20-30 г та 2-5 г відповідно. Мінімальна робоча напруга живлення складає 1.5 В для обох типів ЕКС. Споживана електрична потужність одно-, дво- та трикамерних ЕКС складає 0.1-370 мВт, що значно перевищує споживану потужність швидко-чутливих ЕКС, що складає 0.070 мВт. Вказані джерела живлення забезпечують

необхідні електричну потужність та напругу протягом 9-10 років для різних типів ЕКС. Однак основними недоліком таких джерел живлення для ЕКС є необхідність їх періодичної заміни після закінчення терміну експлуатації (повторної операції) та їх токсичність. Проте розробниками передбачено, що у разі виснаження джерела живлення ЕКС переходить у режим енергозбереження, обмежуючи більшість додаткових функцій для збереження життєво необхідних опцій. У такому режимі ЕКС може працювати до 3 місяців [10 – 14].

### Принцип роботи та технічні характеристики джерел живлення для ЕКС

Імплантовані ЕКС можуть мати наступні джерела живлення: електрохімічна гальванічна батарея, радіоізотопний термоелектричний генератор, п'єзоелектричний та термоелектричний мікрогенератори, а також діючі механічно від маятника [40, 49, 39].

### ЕКС із електрохімічною гальванічною батареєю

Літій-іонні батареї для ЕКС – це мініатюрні джерела живлення (вага ЕКС без електродів, але з акумулятором становить 26-28 грам), заряду яких вистачає, близько на 10 років безперервної роботи [34 – 42]. На практиці існують різні типи ЕКС з вагою від 20 до 50 грам, і терміном експлуатації – до 10 років [21, 22]. Зовнішній вигляд та технічні характеристики ЕКС із електрохімічною гальванічною батареєю наведені на рис.10 та в табл 2.



а)



б)

Рис. 10. ЕКС із електрохімічною гальванічною батареєю [44]:  
а) ЕКС Boston Scientific Accolade на літій-іонних батареях,  
б) літій-іонна батарея діаметром 30 мм.

Таблиця 2

Технічні характеристики ЕКС із електрохімічною гальванічною батареєю

Джерело живлення	Робоча напруга	Потужність	Середні габарити	Виробники
Літій-іонна батарея	2.2÷2.8 В	25-30 мВт	49 мм × 46 мм × 6 мм	Saint Jude medical, Boston Scientific, Medtronic, Vitatron

Зазвичай під час регулярних візитів до лікаря проводиться оцінка стану джерела живлення, щоб визначити час, протягом якого воно ще буде працювати. Якщо заряд батареї виснажується, лікар рекомендує процедуру по заміні ЕКС. Під час цієї процедури здійснюється заміна не тільки батареї живлення, але й всього ЕКС. Тому операція дуже схожа на ту, що проводиться при першій імплантації пристрою.

Термін служби батареї залежить від виробника. Сучасні ЕКС часто використовують більше енергії, оскільки батарея не тільки посилає імпульси до серця, але і регулює ЕКС, зберігає інформацію про серцевий ритм і виконує інші функції. Якщо ЕКС активується рідко, то батарея може працювати протягом тривалого часу. Батареї в ЕКС виснажуються швидко, якщо пристрою доводиться регулярно активуватися для підтримки роботи серця. Це одна з причин, через яку лікарі не можуть точно передбачити термін служби пристрою. У кожному випадку заряд батареї буде виснажуватися з різною швидкістю, тому випадок кожного пацієнта є індивідуальним [28,39 – 40, 43].

Трапляється також, рідкісні випадки імплантації пристрою з батареєю, котра має певні дефекти. Джерело живлення ЕКС уважно тестується перед імплантацією пристрою, однак іноді тестування не виявляє існуючу проблему, і заряд батареї знижується аномально швидко. Іншою причиною швидкого виснаження батареї можуть стати дефекти мікропроцесора чи інших складових ЕКС. Це одна з причин через які пацієнту необхідно неодноразово відвідати лікаря протягом декількох тижнів безпосередньо після імплантації пристрою, і переконатися, що пристрій працює належним чином.

Літій-іонна батарея є найдешевшим і найкомпактнішим джерелом живлення для ЕКС, однак її основним недоліком є недовговічність.

Слід зазначити, що у 2013 році американським стартапом Nanostim Micra був реалізований принципово новий тип ЕКС без ендокардильних електродів, що відрізнявся крихітними розмірами і особливістю імплантації (хоча патент на корисну модель датується 1976 роком [51], серійна вдосконалена модель була випущена лише у 2013 році [48]). Такий ЕКС встановлюється без хірургічного втручання – через трансвенозний доступ (через стегнову вену) до камер серця. Експерти стверджують, що ця технологічна новинка є грандіозним кроком

вперед, і хоча є досить новою, проте активно розвивається. [43 – 49]. Зовнішній вигляд та технічні характеристики швидко-чутливого ЕКС наведені на рис.11 та в табл. 3.



Рис. 11. Швидко-чутливий (внутрішньосердечний) ЕКС [43-49,52]

Таблиця 3

Технічні характеристики швидко-чутливого ЕКС

Джерело живлення	Робоча напруга	Потужність	Габарити	Виробники
Електрохімічна гальванічна батарея на основі: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Літій-карбон монофторид</li> <li>• Літій-аргентум-ванадій оксид</li> </ul>	1.5-2 В	70 мкВт	Довжина: 13.5-42 мм, діаметр: 2.6-5.99 мм	Medtronic, Sant Jude Medical (Nanostim), EBR Systems (CambridgeConsultants)

Для установки стандартного ЕКС на шкірі пацієнта робиться розріз, а потім лікар проводить ендокардіальні електроди через латеральну вену в серце. Сам же пристрій

поміщається в спеціальний підшкірний карман біля грудної клітини. Подібна система далека від досконалості через великі ризики інфікування підшкірного карману, до того ж наявність звичайного ЕКС обмежує рухливість та життя пацієнта. На противагу цьому, ЕКС Nanostim Місга встановлюються за допомогою введення у стегнову вену через невеликий надріз в області паху, після чого за допомогою катетера транспортується в серце пацієнта. Бездротовий пристрій оснащений мініатюрною батарейкою і здатний працювати від 8 до 10 років. Відсутність ендокардіальних електродів і необхідного підшкірного карману знижує можливість інфікування, крім того, пацієнти не обмежені в своїй активності.

Позитивне сприйняття внутрішньосердечного ЕКС організмом людини і повноцінне життя спостерігалось у 280 з 300 пацієнтів (93,3%). Через 6 місяців серйозні побічні ефекти, пов'язані з пристроєм, спостерігались у 6,7% пацієнтів, випадки включали перевантаження пристрою при хірургічному видаленні (1,7%), перфорацію серця (1,3%), що потребувало вилучення та заміни пристрою (1,3%)[47].

Найновіші моделі ЕКС такого типу вже оснащуються індуктивною системою заряджання акумулятора. Випробування на тваринах пройшли успішно, що дало поштовх до подальшого вдосконалення та імплантації ЕКС такого типу. До того ж заряджання проходить досить швидко. Наприклад батарею з ємністю 1050 мА від 50 до 100% можна зарядити за 56 хвилин розмістивши трансмітер на відстані 10 мм від грудей пацієнта при частоті 13.56 МГц. На ринку штучних водіїв ритму серця немає подібних аналогів, що і робить даний тип пристроїв «флагманом» кардіостимуляції [37,38].

### ЕКС із радіоізотопним термоелектричним генератором

Вказаний ЕКС в якості джерела живлення використовує термоелектричний генератор з радіоактивним ізотопним джерелом тепла. ЕКС складається з корпусу, в якому розміщені термоелектричний генератор та свинцева капсула з радіоактивним ураном або плутонієм, а також мікропроцесор, що за допомогою коннекторного блоку з'єднаний з комплектом ендокардіальних електродів. Принцип роботи РІТЕГ полягає у перетворенні тепла, що виділяється від радіоактивного розпаду урану, в електричну енергію за допомогою термоелектричного генератора. На відміну від літій-іонної батареї РІТЕГ більш довговічний (термін служби – до 30 років), проте більш габаритний [41 – 42]. Зовнішній вигляд та технічні характеристики ЕКС із радіоізотопним термоелектричним генератором наведені на рис.12 та в табл. 4.

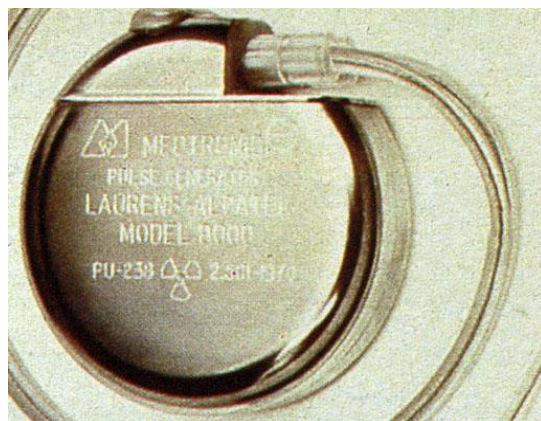


Рис.12. ЕКС із радіоізотопним термоелектричним генератором [53]

Таблиця 4

Технічні характеристики ЕКС із радіоізотопним  
термоелектричним генератором

Джерело живлення	Робоча напруга	Потужність	Габарити	Виробники
Радіоізотопний термоелектричний генератор (РІТЕГ)	4-4.7 В	300-370 мВт	30 × 60 × 40 мм	Medtronic CCC ArcoMedical American Opticals

РІТЕГ вперше почали застосовувати у 1970-х роках для того, щоб продовжити термін служби ЕКС. У той час такий ЕКС був хорошою заміною ртутно-цинковим батареям, що крім своєї ненадійності мали дуже невеликий термін служби – менше трьох років. З цієї позиції РІТЕГ, що надавав пацієнтам можливість мати всього один ЕКС на все життя, був хорошою альтернативою. Перша імплантація такого ЕКС, виготовленого компанією Medtronic спільно з Alcatel, відбулась у 1970 році в Парижі [41].

Проте на початку 1980-х такі батареї поволі почали витіснятися літій-іонними. Термін служби тодішніх літій-іонних складав приблизно 5-10 років. Тож лікарі вирішили, що краще робити операцію з інтервалом в одну декаду і міняти сам пристрій на більш новий, аніж все життя ходити із застарілим габаритним апаратом. Тому імплантацію ЕКС із РІТЕГ припинили у період з 1985 до 1990 року. Станом на 2003 рік в США проживало близько 100 осіб, котрим імплантували ЕКС із РІТЕГ [42]. Інформації про стан пацієнтів станом на 2019 рік не знайдено.

Слід зазначити, що попри габарити, основним недоліком РІТЕГ все ж є токсичність. Пацієнт та його оточуючі, незважаючи на ізоляцію та захисний корпус ЕКС, зазнають негативного впливу радіоактивного випромінювання [48].

### ЕКС із п'єзоелектричним генератором

Джерелом живлення такого ЕКС є п'єзоелектричний елемент, що складається з корпусу, всередині якого знаходиться мембрана, кварцові пластини та електричні виводи, через які генерована електрична енергія передається на електронний підсилювач, розмішений всередині ЕКС [59 – 62]. Кварцеві кристалічні елементи Z-зрізу (вздовж осі симетрії) п'єзоелектричного елементу представляють собою обрізані кварцові пластини, що покриті кількома захисними шарами – шаром хрому та золота Cr-Au, фоторезистивним шаром та шаром гальванічної міді.

Стимуляція серця людини таким ЕКС здійснюється шляхом передачі електричних імпульсів від мікропроцесора через ендокардіальні електроди до м'язів серця [60]. Електричне живлення такого ЕКС забезпечується п'єзоелектричним елементом. Принцип його роботи полягає у перетворенні механічної енергії деформації, яка створюється диханням людини, в електричну енергію. Внаслідок стиснення кварцових пластин п'єзоелектричного елементу вздовж однієї з трьох осей симетрії одна сторона пластини заряджається позитивно, інша – негативно. Під час повернення пластини у стан рівноваги спостерігається явище оберненого



п'єзоэффекту: позитивно заряджена сторона починає заряджатися негативно, негативно заряджена – навпаки. Величина електричного заряду прямо пропорційна величині тиску на кварцові пластини. У даному випадку використовується повздовжнє стиснення, внаслідок якого стиснення кварцової пластини з одного боку призводить до зарядження цієї пластини з протилежної сторони. Отже, електричне живлення ЕКС відбувається наступним чином: стиснення корпусу перетворюється мембраною у зусилля, що викликає стиснення кварцових пластин (наприклад діаметром 5 мм і товщиною 1 мм). Електричний заряд, що генерується на електричних виводах передається на електронний підсилювач та стабілізується за допомогою стабілізатора напруги до рівня  $1.5 \pm 2$  В. Зовнішній вигляд та технічні характеристики ЕКС із кінетичним (п'єзоелектричним) генератором наведені на рис. 13 та в табл. 5.

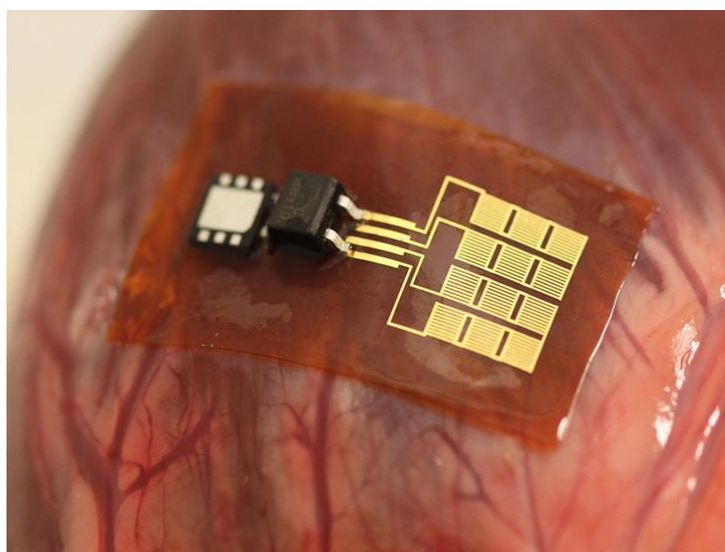
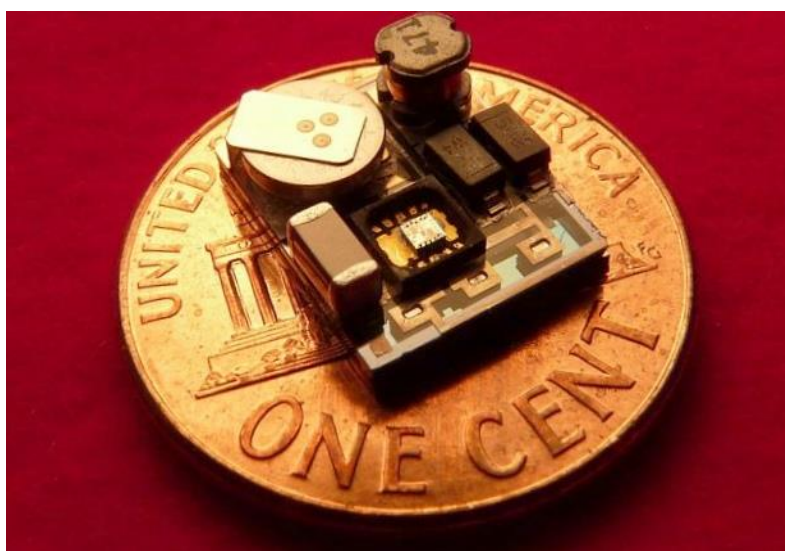


Рис. 13. П'єзоелектричний генератор для ЕКС [62]

Таблиця 5

Технічні характеристики ЕКС із кінетичним  
 (п'єзоелектричним) генератором

Джерело живлення	Робоча напруга	Густина потужності та сили струму	Габарити
П'єзоелектричний генератор з кристалами (нановітками) на основі: <ul style="list-style-type: none"> <li>• цинк оксиду (<math>ZnO</math>);</li> <li>• барій титанату (<math>BaTiO_3</math>);</li> <li>• свинець цирконіттитанату (<math>PZT</math>).</li> </ul>	1.5-2 В	7 мВт/см <sup>3</sup> 0.19 мкА/см <sup>2</sup>	0.1-20 × 0.1-20 × 0.0001 мм

Розроблені також ЕКС з п'єзоелектричними генераторами, які здатні перетворювати в електричну енергію навіть енергію стиснення, що утворюється внаслідок руху легень, кровотоку, серцебиття та скорочення кровоносних судин. Такі п'єзоелектричні генератори складаються з нановіток оксиду цинку ( $ZnO$ ) або барій титанату ( $BaTiO_3$ ). У генераторі розміром близько 2 мм<sup>2</sup> є понад 1 мільйон нановіток. Масив нановіток покритий кремнієвим електродом із зигзагоподібним покриттям з платини, яка використовується для підвищення електропровідності електрода. Коли хімічно вирощені вітки, розташовані на кінці електродного згину зазнають вібрації, іони в них зміщуються. Цей дисбаланс створює електричне поле, яке виробляє електричний струм і може бути використане, як потенційне джерело енергії. Коефіцієнт корисної дії такого п'єзоелектричного генератора складає 17-30 %.

У 2010 році в США вчені університету Арізони розробили мініатюрні п'єзоелектричні генератори, які можуть перетворити енергію скорочення м'язів серця в електричну енергію. Дослідницька група змогла успішно імплантувати створені на основі полімерів п'єзоелектричні генератори. Струму, який виробляють генератори цілком достатньо для живлення медичних пристроїв низької потужності, а також заряджання батареї встановленого ЕКС. Були проведені експерименти, котрі показали, що при періодичному деформуванні пристрою напруга на виходах складає від 1 до 2 В, а струм – близько 100 нА [60]. Початкові випробування на серцях кроликів показали напруги та струми близько 1 мВ та 0.2 мА відповідно. Вихідна потужність значно менша, ніж необхідна для роботи існуючих ЕКС. Однак, новітні тонкоплівкові генератори на основі титанату барію і титанату свинцевого циркону мають значно вищу ефективність [60]. Тверді плівки сегнетоелектрика  $BaTiO_3$  осаджувались радіочастотним магнетронним розпиленням на підкладці  $Pt/Ti/SiO_2/(100)Si$  і піддавались електричному полю 100 кВ/см. Металеві ізолятори ( $BaTiO_3$ )-метал-структуровані стрічки були перенесені на гнучкий субстрат і з'єднані електродами. Під час періодичної стадії деформації гнучкий

наногенератор на основі  $BaTiO_3$  генерує вихідну напругу до 1.0 В. Даний наногенератор дає густину вихідного електричного струму  $0.19 \text{ мкА/см}^2$  та потужності  $\sim 7 \text{ мВт/см}^3$ . За словами вчених, використаний в цьому дослідженні п'єзоелектричний генератор в змозі продукувати достатньо електричної енергії для задоволення усіх потреб ЕКС [60].

Ще одним варіантом є п'єзоелектричний наногенератор на основі нановіток з свинець цирконіттитанату ( $PZT$ ), в якому використовується м'який полімер на кремнієвій підкладці. Такий п'єзоелектричний наногенератор, діаметром приблизно 60 нм, здатний генерувати вихідну напругу 1.63 В та електричну потужність 0.03 мкВт під час періодичного стискання м'якого полімеру [61]. Використання таких п'єзоелектричних наногенераторів із збільшеним терміном експлуатації або повна відмова від акумуляторів у імплантованих медичних пристроях (ЕКС) захистить пацієнтів від повторних операцій та від ризику післяопераційних ускладнень (інфікування, відторгнення імплантата організмом та ін.).

Як показали експерименти, п'єзоелектричний генератор виробляє потужність вдесятеро більшу, ніж потрібно ЕКС, а за розмірами він приблизно вдвічі менше, ніж батареї таких імплантатів. Крім того, такий п'єзоелектричний генератор працює незалежно від серцевого ритму – він виробляє достатню електричну потужність при пульсі від 20 до 600 ударів за хвилину. Розробники також запевняють, що на його роботу не впливатимуть мобільні телефони, мікрохвильові печі та інші подібні апарати [61]. Слід зазначити, що п'єзоелектричні генератори є перспективними для живлення ЕКС, однак вони ще не мають широкого практичного застосування, оскільки потребують проведення великої кількості подальших медичних та клінічних випробувань. Термін служби п'єзоелектричного генератора важко оцінити, оскільки це залежить від розміщення, напруги тощо; хоча існує генератор, який працює з 1982 року [63].

### **ЕКС без електродів, без батареї та керований серцем механічно**

Шведські вчені д-р. Адріан Цюрбухен, Андреас Хеберлін та Лукас Беройтер з університету Берна в Швейцарії 2016 року розробили принципово новий підхід в технології кардіостимуляції. Джерелом живлення такого ЕКС механізм автозаводу, який працює за принципом наручного годинника. Даний пристрій не має джерела живлення яке необхідно періодично міняти, а також ендокардіальних електродів, тобто розміщується безпосередньо на серці що не обмежує рух пацієнта, та краще сприймається організмом через невеликі габарити.

Джерело живлення являє собою механізм на основі автозаводу ETA 204\ETA SA, Grenchen Switzerland. Вага 12 г була досягнута скелетонуванням корпусу.

Основними структурними елементами є осциляційна вага (маятник), який зроблений зі сплаву платини (7,5 г), що перетворює биття серця в колове обертання маятника, механічний випрямляч, який дозволяє перетворювати енергію від коливань маятника у обох напрямках, спіральна пружина, яка тимчасово зберігає енергію в механічній формі і електро мікрогенератор (MG205, Kinetron B.V., Netherlands), який перетворює енергію обертального руху в електричний сигнал. Коли крутний момент спіральною пружини зрівнюється з крутним моментом необхідним для роботи генератора, спіраль вивільнюється і живить електричний мікрогенератор. Результируючий імпульс включає близько 80  $\mu\text{Дж}$  при опорі навантаження 1 кОм [64].

Джерело живлення та електроніка ЕКС комбіновані в спеціальному корпусі з полімеру. Два електроди діаметром 0,5 мм та довжиною 3 мм розміщені в нижній частині корпусу і прокалюють міокард. Діаметр корпусу складає 27 мм та має товщину 8.3 мм.

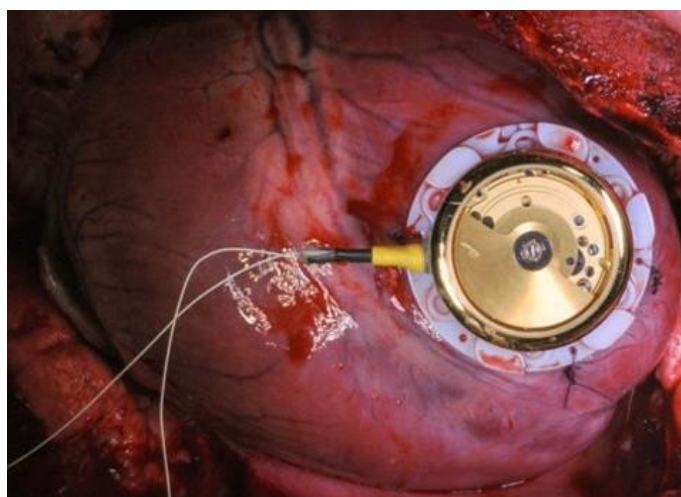


Рис. 14. ЕКС керований серцем механічно [66]

Таблиця 6

Технічні характеристики ЕКС без електродів, без батареї та керований серцем механічно

Джерело живлення	Робоча напруга	Потужність	Габарити
Механізм автозаводу (аналогічний наручним годинникам)	~3 В	82-90 мкВт	Діаметр 27мм Висота 8.3мм

Результати експериментів показали високі показники вихідної потужності, особливо при розміщенні з лівого боку серця. При розміщенні пристрою в цій позиції знімались постійні показники потужності  $82 \pm 4 \mu\text{Вт}$  та  $90.1 \pm 0.7 \mu\text{Вт}$ , що є досить хорошими показниками для

живлення. Також кардіостимулятор оснащений конденсатором на  $47\mu\text{Ф}$ , який поглинає надлишки енергії та в разі нестачі енергії може живити ЕКС на протязі хвилини [64]. Дана розробка є концептуальною та потребує подальших вдосконалень, як збільшення ємності конденсатора, зменшення ваги маятника та збільшення потужності. Та не зважаючи на це розробка є перспективною.

### ЕКС із термоелектричним мікрогенератором

Такий ЕКС містить комплект ендокардіальних електродів, коннекторний блок, термоелектричний мікрогенератор (ТЕГ), мікропроцесор, конденсатор, стабілізатор напруги та корпус (рис.15) [6, 8, 55 – 58]. Термоелектричний мікрогенератор представляє собою багатоеlementний термопарний термоелектричний мікромодуль з двома керамічними пластинами та електричними виводами. Термоелектричний мікромодуль складається із сукупності з'єднаних в послідовне електричне коло напівпровідникових термопарних елементів, проміжки між якими заповнені електроізоляційним епоксидним компаундом, та двох керамічних пластин, що щільно контактують з верхньою і нижньою гранями термопарних елементів, а також двох електричних виводів. Такий термоелектричний мікромодуль виготовлений на базі сучасних високоефективних термоелектричних матеріалів на основі Ві-Те. Технологія виготовлення таких мікромодулів забезпечує щільність упаковки на рівні до 5000 віток термоелектричного матеріалу n- та p-типів провідності на  $1\text{ см}^2$  площі мікромодуля [8]. Наприклад, типова термоелектрична батарея загальною площею поверхні  $1.5\text{ см}^2$  генерує напругу  $1.5\text{ В}$  і забезпечує потужність  $100\text{ мкВт}$  при перепаді температур  $1^\circ\text{C}$ . Технічні характеристики ЕКС із термоелектричним мікрогенератором наведені у табл. 7.



Рис. 15. Схематичне зображення імплантованого ЕКС з ТЕГ [49, 55]

Таблиця 7

*Технічні характеристики ЕКС із термоелектричним мікрогенератором*

Джерело живлення	Робоча напруга	Потужність	Габарити
Термоелектричний мікрогенератор	1.5-2 В (при перепаді температур 1°C)	100 мкВт	10 × 15 × 2 мм

Для того, щоб отримати необхідні напругу та потужність за допомогою термоелектричного мікромодуля для живлення ЕКС слід організувати перепад температури між його гранями. Для забезпечення теплового потоку через термоелектричний мікромодуль необхідно термоелектричний перетворювач розмістити всередині тіла людини між внутрішніми органами, що мають різну температуру, наприклад поблизу судини, через яку циркулює кров з температурою +37°C. Слід зазначити, що температурні відмінності між внутрішніми органами людини досягають 0.5-1°C, чого цілком достатньо для генерування необхідної електричної потужності для живлення ЕКС. У конструкції пристрою може використовуватись також конденсатор для накопичення електричного заряду, необхідного для роботи ЕКС, та стабілізатор напруги термоелектричного мікромодуля до рівня 1.5-2 В.

Основною перевагою ЕКС із термоелектричними мікрогенераторами є можливість працювати протягом 30-50 років, що значно зменшує кількість медичних процедур, необхідних для заміни імплантатів протягом життя пацієнта, а це, у свою чергу, приводить до зменшення ймовірності можливих ускладнень та витрат. Термін експлуатації таких ЕКС у 5 разів більший, ніж у найбільш поширених ЕКС із електрохімічною гальванічною батареєю. При цьому цілком відсутній негативний вплив радіоактивного випромінювання, що притаманний ЕКС із радіоізотопним термоелектричним генератором.

**Порівняльний аналіз джерел живлення для ЕКС**

Таблиця 8

*Порівняльний аналіз джерел живлення для ЕКС*

Параметр	Електро-хімічна гальванічна батарея для одно-, дво- та трикамерних ЕКС	Електро-хімічна гальванічна батарея для внутрішньо-серцевого ЕКС	РІТЕГ	П'єзо-електричний генератор	Механізм автозаводу для ЕКС	Термоелектричний мікрогенератор
Маса	20-30 г	2-5 г	20-50 г	10-14 г	12 г	2-5 г

*Продовження таблиці 8*

Робоча напруга	1.5-2.8 В	1.5-2.0 В	4-4.7 В	1.5-2 В	~3 В	1.5-2 В
Електрична потужність	25 мВт	0.070 мВт	370 мВт	7 мВт	0.082-0.09 мВт	0.1 мВт
Ємність батареї	2000 мА	140 мА	–	–	–	–
Термін експлуатації	8-10 років	15 років	≥30 років	≥30 років	≥30 років	≥30-50 років
Габарити	49 × 46 × 6 мм	Ø6 × 42 мм	30 × 60 × 40 мм	20×20×10 <sup>-4</sup> мм	27 мм - 8.3 мм	5-20 мм
Токсичність	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Ступінь готовності до використання	Серійне виробництво	Серійне виробництво	Знятий з виробництва	Розробка	Розробка	Розробка

З порівняльного аналізу слідує, що використання термоелектричних джерел електрики для живлення електрокардіостимуляторів є перспективним. Такі джерела не є токсичними, мають практично необмежений ресурс роботи і, отже, не потребують заміни або зарядки, по оцінкам можуть бути значно дешевшими від хімічних джерел, а з практики використання та принципу роботи є більш надійними від інших джерел електрики.

## Висновки

1. Виконано порівняльний аналіз конструкцій, принципу роботи і технічних характеристики літій-іонних, радіоізотопних, п'єзоелектричних, механічних та термоелектричних джерел живлення для електрокардіостимуляторів. З порівняльного аналізу слідує, що використання термоелектричних джерел електрики для живлення електрокардіостимуляторів є перспективним. Такі джерела не є токсичними, мають практично необмежений ресурс роботи і, отже, не потребують заміни або зарядки, по оцінкам можуть бути значно дешевшими від хімічних джерел, а з практики використання та принципу роботи є більш надійними від інших джерел електрики.
2. Встановлено, що термоелектричні мікрогенератори, імплантовані в організм людини, дають можливість при перепаді температур 1°C генерувати 1.5-2 В електричної напруги та 100

мкВт електричної потужності, що цілком достатньо для живлення сучасних електрокардіостимуляторів.

## **Література**

1. Emelia J. Benjamin , Salim S. Virani , Clifton W. Callaway and other. Heart Disease and Stroke Statistics—2018 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation*. 2018; 137: e67–e492.
2. Теренда Н.О. Смертність від серцево-судинних захворювань як державна проблема // *Вісник наукових досліджень*. – № 4. – 2015. – с.11-13.
3. Гандзюк В.А. Аналіз захворюваності на ішемічну хворобу серця в Україні // *Український кардіологічний журнал*. – № 3. – 2014. – с.45-52.
4. Чепелевська Л. А. Прогнозні тенденції смертності населення України / Л. А. Чепелевська, О. В. Любінець // *Вісн. соц. гігієни та орг. охорони здоров'я України*. – 2009. – № 3. – С. 10–15.
5. Струтинская Л.Т. Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2008. – №4. – с. 5-13.
6. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1979. – 768 с.
7. Анатичук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
8. Заявка на корисну модель № у 2017 11815 від 04.12.2017 р. Електрокардіостимулятор з термоелектричним джерелом живлення // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Джал С.А.; Інститут термоелектрики. – 2017.
9. Заявка на корисну модель № у 2017 11818 від 04.12.2017 р. Електрокардіостимулятор з комбінованим джерелом живлення // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Джал С.А.; Інститут термоелектрики. – 2017.
10. Ludwig A, Zong X, Hofmann F, Biel M. Structure and function of cardiac pacemaker channels // *Cell Physiol Biochem*. 1999;9(4-5):179-86.PMCID: 10575196
11. <https://www.futurity.org/tiny-pacemaker-1049422/>
12. <http://www.kardiodom.ru/articles/572.html>.
13. Skundin A.M, Fateev S.A, Kulova T.L. Battery for cardiac pacemaker: an alternative to Lithium Iodine system. Institute of Electrochemistry of RAS. Moscow, Russia.
14. Julien C, Mauger A, Vijn A and other. Lithium batteries // *Science and Technology*. 2016, 15. ISBN: 978-3-319-19107-2.
15. <https://clinicalgate.com/engineering-and-construction-of-pacemaker-and-icd-leads-2/>
16. Tracy CM, Epstein AE, Darbar D and other. 2012 ACCF/AHA/HRS Focused Update Incorporated Into the ACCF/AHA/HRS 2008 Guidelines for Device-Based Therapy of Cardiac Rhythm Abnormalities: A Report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Heart Rhythm Society // *J Am Coll Cardiol*. – 2012 Dec 12.
17. Tatjana S. Potpara, Gregory Y.H. Lip, Torben B. Larsen and other. Stroke prevention strategies in patients with atrial fibrillation and heart valve abnormalities: perceptions of ‘valvular’ atrial fibrillation: results of the European Heart Rhythm Association Survey // *Europace*. – 2016. – 18. – с 1593 –1598.



18. Maria Gracia Bongiorni, Carina Blomstrom-Lundqvist, Laurent Pison and other. Management of malfunctioning and recalled pacemaker and defibrillator leads: results of the European Heart Rhythm Association survey // *Europace*. – 2014. – 16, с.1674–1678.
19. А.Р. Ливенсон. Электромедицинская аппаратура // Москва «Медицина» 5-е издание. 1981. –344с.
20. <http://www.eurolab.ua/encyclopedia/ambulance/48886/>
21. Patent US 3057356A. Medical cardiac pacemaker // Greatbatch Wilson. – 1962.
22. Patent US 5562715A. Cardiac pulse generator // John J. Czura, Randolph H. Kricke. – 1996.
23. Aizawa Y, Kunitomi A, Nakajima K, Kashimura S, Katsumata Y, Nishiyama T, Kimura T, Nishiyama N, Tanimoto Y, Kohsaka S, Takatsuki S, Fukuda K: Risk factors for early replacement of cardiovascular implantable electronic devices. *Int J Cardiol* 2015; 178:99–101.
24. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-50209-5\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-50209-5_11)
25. Patent US 4056105. Pulse generator // Richard J. Ravas. – 1977.
26. Patent US 3835864. Intra-cardiac stimulator // Ned S. Rasor. – 1974.
27. Michele Brignole, Angelo Auricchio, Gonzalo Baron-Esquivias. ESC Guidelines on cardiac pacing and cardiac resynchronization therapy // *European Heart Journal*. – 2013. – 34, 2281–2329.
28. Benkemoun H, Sacrez J, Lagrange P and other. Optimizing pacemaker longevity with pacing mode and settings programming: results from a pacemaker multicenter registry // *Pacing Clin Electrophysiology*. – 2012. – Apr;35(4):403-8.
29. Antonio Hernańdez, Thorsten Lewalter, Alessandro Proclemer. Remote monitoring of cardiac implantable electronic devices in Europe: results of the European Heart Rhythm Association survey // *Europace*. – 2014. – 16. – с. 129–132.
30. Victor A. Maltsev, Yael Yaniv, Anna V. Maltsev and other. Modern Perspectives on Numerical Modeling of Cardiac Pacemaker Cell // *Pharmacol Science journal*. – 2014. – 125(1). – с.6–38.
31. <http://www.kardiodom.ru/hirurgia/375.html>
32. David C. Bock, Amy C. Marschilok, Kenneth J. Takeuchi, Esther S. Takeuchi. Batteries used to Power Implantable Biomedical Devices // *Electrochim Acta*. Published online 2012 Mar 23. PMID: PMC3811938.
33. И.В. Абдульянов, И.И. Вагизов. Современные подходы к постоянной электрокардиостимуляции // *Практическая медицина* 3(71) сентябрь 2013г. УДК 616.12-7.
34. Venkateswara Sarma Mallela, V Ilankumaran, N.Srinivasa Rao. Trends in Cardiac Pacemaker Batteries. // *Indian Pacing Electrophysiol J*. 2004 Oct-Dec; 4(4): 201–212. Published online 2004 Oct 1. PMID: PMC1502062.
35. Derick Todd, Alessandro Proclemer, Maria Grazia Bongiorni and other. How are arrhythmias detected by implanted cardiac devices managed in Europe? Results of the European Heart Rhythm Association Survey // *Europace*. – 2015. – 17. – с. 1449–1453.
36. Radosław Lenarczyk, Tatjana S. Potpara, Kristina H. Hauga and other. The use of wearable cardioverter-defibrillators in Europe: results of the European Heart Rhythm Association survey // *Europace*. – 2016. – 18. – с. 146–150.
37. Parinaz Abiri, Ahmad Abiri, Rene R. Sevag Packard and others. Inductively powered wireless pacing via a miniature pacemaker and remote stimulation control system // *Scientific reports*

- 7, Article number:6180 (2017)
38. Patel, J. Wireless charging of implantable pacemaker's battery // Journal of Biosensors and Bioelectronics. – 2018. 2018, 9:3 DOI: 10.4172/2155-6210.1000258
  39. Achraf Ben Amar, Ammar B. Kouki and Hung Cao. Power Approaches for Implantable Medical Devices // Sensors. – 2015(15). – с.28889–28914.
  40. Г.У. Бадранова, П.М. Готовцев, А.А. Шаповалова. Устройства электроснабжения для медицинских имплантов и материалы для их конструкции // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. – 2014.- т.10.№4. с.54-66.
  41. [www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear\\_pacemakers.pdf](http://www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear_pacemakers.pdf)
  42. <https://www.orau.org/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm> Henry Sutanto. Leadless Cardiac Pacemaker as a Novel Intervention Modality for Atrioventricular Conduction Disturbance in Hypertrophic Cardiomyopathy // journal of Advanced Therapies and Medical Innovation Sciences Volume 2(2017)
  43. <https://newatlas.com/nanostim-leadless-pacemaker/29443>
  44. <https://www.medscape.com/viewarticle/827034>
  45. Leadless Pacemaker Devices // Prepared for the February 18, 2016 meeting of the Circulatory System Devices Advisory Panel Gaithersburg Hilton; Gaithersburg, MD.
  46. Vivek Y. Reddy, M.D., Derek V. Exner, M.D., and other. Implantation of an Entirely Intracardiac Leadless Pacemaker // The New England journal of Medicine. September 17, 2015 published online on August 30, 2015 DOI: 10.1056/NEJMoa1507192.
  47. Patent US20110208260A1. Rate Responsive Leadless Cardiac Pacemaker // Peter M. Jacobson. – 2017.
  48. <http://www.implantable-device.com/2011/12/24/nanostims-leadless-pacemaker/>
  49. (49)Dinesh Bhatia, Sweeti Bairagi, Sanat Goel, Manoj Jangra and other. Pacemakers charging using body energy // Journal of pharmacy and Bioallied sciences, 2010 Jan-Mar; 2(1): 51–54. PMID: PMC3146093.
  50. Patent US 3943936. Self powered pacers and stimulators // Ned S. Rasor. – 1976.
  51. Henry Sutanto. Leadless Cardiac Pacemaker as a Novel Intervention Modality For Atrioventricular Conduction Disturbance in Hypertrophic Cardiomyopathy // Journal of Advanced Therapies and Medical Innovation Sciences Volume 2 (2017).
  52. John C. Norman, Farouk A. Molokhia, Lowell T. Harmison and other. An Implantable Nuclear-Fueled Circulatory Support System // Annsurgery. – 0260-0062. – с.492-502.
  53. Albert, H. M, Glass B. A., Pittman. B. Plutonium for Pacemakers e// British Medical journal. 1969. – 22.11. с. 447.
  54. Fred N. Huffman, Joseph J. Migliore, William J. Robinson, John C. Norman. Radioisotope powered cardiac pacemakers // Cardiovascular Diseases (now published as Texas Heart Institute Journal), ISSN 0093-3546). – 1974. – 1(1). – p. 52-60.
  55. Patent US 20100257871. Thin Film Thermoelectric Devices For Power Conversion And Cooling // Rama Venkatasubramanian. – 2010.
  56. Patent US 6470212. Body heat powered implantable medical device // Koen J. Weijand (Medtronic, Inc.). – 2002.
  57. Patent US 4002497. Thermoelectric batteries // Harold Brown. – 1977.
  58. Kwi-II Park, Sheng Xu, Ying Liu and other. Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates // American Chemical Society, Nano Lett., 2010, 10 (12), pp 4939–4943; DOI: 10.1021/nl102959k.

59. Canan Dagdevirena, Byung Duk Yanga, Yewang Su and other. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, December 16, 2013, doi: 10.1073/pnas.1317233111.
60. Xi Chen, Shiyong Xu, Nan Yao and Yong Shi. 1.6 V Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting Using PZT Nanofibers // American Chemical Society, May 25, 2010, Nano Lett., 2010, 10 (6), pp 2133–2137 DOI: 10.1021/nl100812k.
61. <https://inhabitat.com/wild-new-nanoribbon-implant-uses-heartbeats-to-power-pacemakers/?variation=d>
62. <http://www.piezo.com/tech3faq.html#app7>
63. Adrian Zurbuchen, Andreas Haeblerlin, Lukas Bereuter. The swiss approach for a hertbet-driven lead – and batteryless pacemaker // Heart Rhythm, May 25, 2010, Nano Lett., 2010, 10 (6), pp 2133–2137 DOI: 10.1021/nl100812k.
64. <https://www.powerelectronics.com/energy-harvesting/energy-harvesting-poised-eliminate-pacemaker-battery>
65. <https://newatlas.com/wristwatch-pacemaker/33624/>
66. Mahammad A Hannan, Saad Mutashar, Salina A Samad. Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges // Hannan et al. BioMedical Engineering OnLine. – 2014. - 13:79, с.1-23.

Надійшла до редакції 07.11.19

**Анатичук Л.І.,** *акад. НАН України*<sup>1,2</sup>  
**Тодуров Б.М.,** *док. мед. наук, професор*<sup>3</sup>  
**Кобилянський Р.Р.** *канд. физ.-мат. наук*<sup>1,2</sup>,  
**Джал С.А.**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектричества НАН и МОН України,

ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,

*e-mail: anatyck@gmail.com;*

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,

Черновцы, 58012, Украина

## **ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ КОЖИ**

*В работе приведены результаты разработки термоэлектрического прибора для лечения заболеваний кожи. Разработанный прибор имеет расширенный диапазон рабочих температур (-50 ÷ 0) °С и допускает визуальный контроль температуры охлаждающих рабочих инструментов во время проведения терапевтических процедур. Описаны*

особенности конструкции прибора, его технические характеристики и результаты апробации в клинической практике. Библ. 22, рис. 6, табл. 1.

**Ключевые слова:** термоэлектрический прибор, термоэлектрическое охлаждение, лечение заболеваний кожи, дерматология, косметология.

**L.I. Anatyshuk** acad. National Academy of sciences of Ukraine<sup>1,2</sup>,  
**B.M. Todurov**, dok. med. sciennces, professor<sup>3</sup>  
**R.R. Kobylanskyi** cand. phys.– math. sciences<sup>1,2</sup>,  
**Dzhal S.A.**<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
Chernivtsi, 58012, Ukraine

## ON THE USE OF THERMOELECTRIC MICROGENERATORS FOR POWERING CARDIAC PACEMAKERS

*The paper describes the design and operation of modern pacemakers, as well as their classification by the mechanism of work and power supplies. A comparative analysis of power supplies is given and prospects for the use of thermoelectric microgenerators for powering pacemakers are determined. Bibl. 66, Fig. 15, Tabl. 8.*

**Key words:** cardiac pacemaker, power supply, thermoelectric microgenerator, cardiovascular diseases.

### References

1. Benjamin Emelia J., Virani Salim S., Callaway Clifton W., et al. (2018). Heart disease and stroke statistics—2018 update: a report from the American Heart Association. *Circulation*, 137: e67–e492.
2. Terenda N.O. (2015). Smertnist vid sertsevo-sudynnykh zakhvoriuvan yak derzhavna problema [Mortality from cardiovascular diseases as a state problem]. *Visnyk naukovykh doslidzhen-Herald of Scientific Research*, 4, 1-13 [in Ukrainian].
3. Handziuk V.A. (2014). Analiz zakhvoriuvanosti na ishemichnu khvorobu sertsia v Ukraini [Analysis of the incidence of coronary heart disease in Ukraine]. *Ukrainian Journal of Cardiology*, 3, 45-52.
4. Chepelevska L.A., Liubinets O.V. (2009). Prohnozni tendentsii smertnosti naselennia Ukrainy [Predictive tendencies of mortality of the population of Ukraine]. *Visnyk sotsialnoi hihieny ta okhorony zdorovia Ukrainy – Bulletin of Social Hygiene and Health Care Organization of Ukraine*, 3, 10–15 [in Ukrainian].
5. Strutinskaya L.T. (2008). Termoelektricheskiie mikrogeneratory. Sovremennoie sostoianiiie i perspektivy ispolzovaniia [Thermoelectric microgenerators. Curent status and prospects of use]. *Tekhnologiiia i konstruirovaniie v elektronnoi apparature – Technology and Design in Electronic*

- Equipment, 4, 5-13 [in Russian].
6. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
  7. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskiye preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
  8. Application for utility model № u 2017 11815 (2017). Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Dzhal S.A. Cardiac pacemaker with a thermoelectric power supply [in Ukrainian].
  9. Application for utility model № u 2017 11818 (2017). Anatyshuk L.I., Kobylianskyi R.R., Dzhal S.A. Cardiac pacemaker with a combined power supply [in Ukrainian].
  10. Ludwig A, Zong X, Hofmann F, Biel M. (1999). Structure and function of cardiac pacemaker channels. *Cell Physiol Biochem*, 4-5:179-86.PMCID: 10575196
  11. <https://www.futurity.org/tiny-pacemaker-1049422/>
  12. <http://www.kardiodom.ru/articles/572.html>.
  13. Skundin A.M, Fateev S.A, Kulova T.L. Battery for cardiac pacemaker: an alternative to lithium iodine system. Moscow: Institute of Electrochemistry of RAS.
  14. Julien C., Mauger A., Vijn A., et al. (2016). Lithium batteries. *Science and Technology*, 15. ISBN: 978-3-319-19107-2.
  15. <https://clinicalgate.com/engineering-and-construction-of-pacemaker-and-icd-leads-2/>
  16. Tracy C.M., Epstein A.E., Darbar D., et al. (2012) ACCF/AHA/HRS focused update incorporated into the ACCF/AHA/HRS 2008 guidelines for device-based therapy of cardiac rhythm abnormalities: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Heart Rhythm Society. *J. Am. Coll. Cardiol.*, Dec 12.
  17. Potpara Tatjana S., Lip Gregory Y.H., Larsen Torben B., et al. (2016). Stroke prevention strategies in patients with atrial fibrillation and heart valve abnormalities: perceptions of ‘valvular’ atrial fibrillation: results of the European Heart Rhythm Association Survey. *Europace*, 18, 1593–1598.
  18. Bongiorni Maria Gracia, Blomstrom-Lundqvist Carina, Pison Laurent, et al. (2014). Management of malfunctioning and recalled pacemaker and defibrillator leads: results of the European Heart Rhythm Association survey. *Europace*, 16, 674–1678.
  19. Livenson A.R. (1981). *Elektromeditsinskaia apparatura. [Electromedical equipment]*. 5<sup>th</sup> ed. [in Russian].
  20. <http://www.eurolab.ua/encyclopedia/ambulance/48886/>
  21. Patent US 3057356A. (1962). Greatbatch Wilson. Medical cardiac pacemaker.
  22. Patent US 5562715A. (1996). John J. Czura, Randolph H. Kricke. Cardiac pulse generator.
  23. Aizawa Y, Kunitomi A, Nakajima K, Kashimura S, Katsumata Y, Nishiyama T, Kimura T, Nishiyama N, Tanimoto Y, Kohsaka S, Takatsuki S, Fukuda K. (2015). Risk factors for early replacement of cardiovascular implantable electronic devices. *Int. J. Cardiol*, 178, 99–101.
  24. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-50209-5\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-50209-5_11)
  25. Patent US 4056105. (1977). Richard J. Ravas. Pulse generator.
  26. Patent US 3835864. (1974). Ned S.Rasor. Intra-cardiac stimulator.
  27. Brignole Michele, Auricchio Angelo, Baron-Esquivias Gonzalo. (2013). ESC Guidelines on cardiac pacing and cardiac resynchronization therapy. *European Heart Journal*, 34, 2281–2329.
  28. Benkemoun H., Sacrez J., Lagrange P., et al. (2012). Optimizing pacemaker longevity with

- pacing mode and settings programming: results from a pacemaker multicenter registry. *Pacing Clin Electrophysiology*, 35(4), 403-8.
29. Hernandez Antonio, Lewalter Thorsten, Proclemer Alessandro (2014). Remote monitoring of cardiac implantable electronic devices in Europe: results of the European Heart Rhythm Association survey. *Europace*, 16, 129–132.
  30. Maltsev Victor A., Yaniv Yael, Maltsev Anna V., et al. (2014). Modern perspectives on numerical modeling of cardiac pacemaker cell. *Pharmacol Science Journal*, 125(1), 6–38.
  31. <http://www.kardiodom.ru/hirurgia/375.html>
  32. Bock David C., Marschilok Amy C., Takeuchi Kenneth J., Tekeuchi Esther S. (2012). Batteries used to power implantable biomedical devices. *Electrochim Acta*. Published online 2012 Mar 23. PMID: PMC3811938.
  33. Abdulianov I.V., Vagizov I.I. (2013). Modern approaches to constant pacing. *Practical Medicine*, 3(71).
  34. Sarma Mallela Venkateswara, Ilankumaran V., Srinivasa Rao N. (2004). Trends in cardiac pacemaker batteries. *Indian Pacing Electrophysiol J.*, 4(4), 201–212. Published online 2004 Oct 1. PMID: PMC1502062.
  35. Todd Derick, Proclemer Alessandro, Bongiorno Maria Grazia, et al. (2015). How are arrhythmias detected by implanted cardiac devices managed in Europe? Results of the European Heart Rhythm Association Survey. *Europace*, 17, 1449–1453.
  36. Lenarczyk Radoslaw, Potpara Tatjana S., Hauga Kristina H., et al. (2016). The use of wearable cardioverter-defibrillators in Europe: results of the European Heart Rhythm Association survey. *Europace*, 18, 146–150.
  37. Abiri Parinaz, Abiri Ahmad, Sevag Packard Rene R., et al. (2017). Inductively powered wireless pacing via a miniature pacemaker and remote stimulation control system. *Scientific reports* 7, Article number:6180 (2017)
  38. Patel, J. (2018). Wireless charging of implantable pacemaker's battery. *Journal of Biosensors and Bioelectronics*, 9, 3 DOI: 10.4172/2155-6210.1000258
  39. Amar Achraf Ben, Kouki Ammar B. and Cao Hung (2015). Power approaches for implantable medical devices. *Sensors*, 15, 28889–28914.
  40. Badranova G.U., Gotovtsev P.M., Shapovalova A.A. (2014). Ustroistva elektrosnabzheniia dlia meditsinskikh implantov i materialy dlia ikh konstruksii [Power supply devices for medical implants and materials for their construction]. *Vestnik biotekhnologii i fiziko-kmicheskoi biologii imeni Yu.A.Ovchinnikova – Bulletin of Biotechnology and physico-chemical biology named after Yu.A.Ovchinnikov*, 10, 4, 54-66 [in Russian].
  41. [www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear\\_pacemakers.pdf](http://www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear_pacemakers.pdf)
  42. <https://www.orau.org/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm> Henry Sutanto (2017). Leadless cardiac pacemaker as a novel intervention modality for atrioventricular conduction disturbance in hypertrophic cardiomyopathy. *Journal of Advanced Therapies and Medical Innovation Sciences*, 2.
  43. <https://newatlas.com/nanostim-leadless-pacemaker/29443>
  44. <https://www.medscape.com/viewarticle/827034>
  45. *Leadless pacemaker devices*. Prepared for the February 18, 2016 meeting of the Circulatory System Devices Advisory Panel Gaithersburg Hilton; Gaithersburg, MD.
  46. Vivek Y. Reddy, M.D., Derek V. Exner, M.D., et al. (2015). Implantation of an entirely intracardiac leadless pacemaker. *The New England Journal of Medicine*. Published online on

August 30, 2015 DOI: 10.1056/NEJMoa1507192.

47. *Patent US20110208260A1*. (2017). Peter M. Jacobson. Rate responsive leadless cardiac pacemaker.
48. <http://www.implantable-device.com/2011/12/24/nanostims-leadless-pacemaker/>
49. Bhatia Dinesh, Bairagi Sweeti, Goel Sanat, Jangra Manoj, et al. (2010). Pacemakers charging using body energy. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 2(1), 51–54. PMID: PMC3146093.
50. *Patent US 3943936* (1976). Ned S. Rasor. Self powered pacers and stimulators.
51. Sutanto Henry. (2017). Leadless cardiac pacemaker as a novel intervention modality for atrioventricular conduction disturbance in hypertrophic cardiomyopathy. *Journal of Advanced Therapies and Medical Innovation Sciences*, 2.
52. Norman John C., Molokhia Farouk A., Harmison Lowell T., et al. An implantable nuclear-fueled circulatory support system. *Annals of Surgery*, 0260-0062. 492-502.
53. Albert, H. M., Glass B. A., Pittman. B. (1969). Plutonium for pacemakers e. *British Medical Journal*, 22.11, 447.
54. Huffman Fred N., Migliore Joseph J., Robinson William J., Norman John C. (1974). Radioisotope powered cardiac pacemakers. *Cardiovascular Diseases* (now published as *Texas Heart Institute Journal*), ISSN 0093-3546), 1(1), 52-60.
55. *Patent US 20100257871*. (2010). Rama Venkatasubramanian. Thin film thermoelectric devices for power conversion and cooling.
56. *Patent US 6470212* (2002). Koen J. Weijand. Body heat powered implantable medical device.
57. *Patent US 4002497* (1977). Harold Brown. Thermoelectric batteries.
58. Kwi-Il Park, Sheng Xu, Ying Liu, et al. (2010). Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> thin film nanogenerator on plastic substrates. *American Chemical Society, Nano Lett.*, 2010, 10 (12), 4939–4943; DOI: 10.1021/nl102959k.
59. Dagdevirena Canan, Yanga Byung Duk, Su Yewang, et al. (2013). Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, December 16, 2013, doi: 10.1073/pnas.1317233111.
60. Xi Chen, Xu Shiyu, Nan Yao and Yong Shi (2010). 1.6 V nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers. *American Chemical Society, May 25, 2010, Nano Lett.*, 10 (6), 2133–2137 DOI: 10.1021/nl100812k.
61. <https://inhabitat.com/wild-new-nanoribbon-implant-uses-heartbeats-to-power-pacemakers/?variation=d>
62. <http://www.piezo.com/tech3faq.html#app7>
63. Zurbuchen Adrian, Haeberlin Andreas, Bereuter Lukas (2010). The swiss approach for a heartbeats-driven lead – and batteryless pacemaker. *Heart Rhythm*, May 25, 2010, *Nano Lett.*, 10 (6), 2133–2137 DOI: 10.1021/nl100812k.
64. <https://www.powerelectronics.com/energy-harvesting/energy-harvesting-poised-eliminate-pacemaker-battery>
65. <https://newatlas.com/wristwatch-pacemaker/33624/>
66. Hannan Mahammad A., Mutashar Saad, Samad Salina A. (2014). Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges. *Hannan et al. BioMedical Engineering OnLine*, 4, 13:79, 1-23.

Submitted 07.11.2019

## 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 .орґ чи .сdг, допускається у форматах .jрг чи .tіf. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

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

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

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

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

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

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

**ЛІТЕРАТУРА** – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете

автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

• таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

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

### Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

#### Статті в журналах

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

#### Книги

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

#### Патенти

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

#### Матеріали конференцій

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

#### Автореферати дисертацій

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

### Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

#### Статті в журналах

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

#### Книги

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

#### Патенти

*Patent of Ukraine № 85293*. Anatyshuk 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].

