

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

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

№ 4

2020

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

Л.М. Вихор

Б.І. Стадник

В.В. Лисько

О.Я. Лусте

С.В. Мельничук

О.І. Рогачова

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

Ю. Грін, *Німеччина*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

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

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

Редактори

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

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

Адреса редакції:

Україна, 58002, м.Чернівці, Головоштамт, 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: 25.09.2020 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, 2020

ЗМІСТ

Матеріалознавство

- Ніколаєнко Г.О., Водоріз О.С., Рогачова О.І., Тавріна Т.В., Лісачук Г.В.*
Теплопровідність твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$) 5
- Рогачова О.І., Новак К.В., Орлова Д.С., Нащекіна О.М., Сінатов О.Ю.,
Лісачук Г.В.* Розмірні ефекти та термоелектричні властивості
тонких плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ 14

Технології

- Рибчаков Д.С.* Комп'ютерне моделювання процесу екструзії термоелектричного
матеріалу на основі $Bi-Te$ прямокутної форми 33

Метрологія і стандартизація

- Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Тимчик Г.С., Сокол Б.В.* Температурне розділення
комп'ютерно-інтегрованого поляризаційного тепловізора 42

Термоелектричні виробы

- Анатичук Л.І.* Критерій ефективності термоелектричних перетворювачів енергії,
що використовують теплові відходи 59
- Філін С.О., Закшевський Б.* Експериментальні дослідження впливу режиму
роботи вентилятора і модуля на характеристики термоелектричного
охолоджувача напоїв 65
- Анатичук Л.І., Пасєчнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С.,
Назаретян Р.Е., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А., Кобилянський Р.Р.*
Термоелектричний прилад для безконтактного охолодження
очей людини 77
- Анатичук Л.І., Прибила А.В., Кібак А.М.* Термоелектричні кондиціонери
для сидінь автотранспорту 90

УДК 537.32

Ніколаєнко Г.О., Водоріз О.С., канд. фіз.-мат. наук

Рогачова О.І., докт. фіз.-мат. наук, професор

Тавріна Т.В. канд. фіз.-мат. наук, доцент

Лісачук Г.В., докт. техн. наук, професор

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ

$PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$)

Одержано залежність ґраткової теплопровідності λ_L пресованих зразків твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ від складу ($x = 0 - 0.04$) за температури 325 К. На кривій $\lambda_L(x)$ виявлено максимум поблизу $x = 0.0075$. Вимірювання температурної залежності λ_L в інтервалі 150 - 600 К показало, що концентраційна аномалія в цьому ж інтервалі складів спостерігається і на залежності степеневого коефіцієнта β у температурній залежності λ_L від складу. Немонотонний характер залежностей $\lambda_L(x)$ і $\beta(x)$ пов'язується з критичними явищами, що супроводжують перехід перколяційного типу від розведених до концентрованих твердих розчинів. При дослідженні і практичному застосуванні твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ необхідно враховувати немонотонний характер зміни теплопровідності зі складом. Бібл. 15, рис. 3.

Ключові слова: тверді розчини $PbSe_{1-x}Te_x$, теплопровідність, склад, температура, перколяція.

Вступ

Напівпровідникові ізовалентні та ізоструктурні тверді розчини (ТР) заміщення $PbSe_{1-x}Te_x$ – перспективні середньотемпературні термоелектричні (ТЕ) матеріали [1,2]. Оскільки ефективність використання ТЕ матеріалів визначається добротністю ZT ($ZT = S^2\sigma T/\lambda$, де S – коефіцієнт Зеебека, σ – електропровідність, λ – загальна теплопровідність і T – абсолютна температура), одним із шляхів підвищення ZT є зниження λ . Теплопровідність напівпровідника включає дві основні складові - ґраткову (λ_L) і електронну (λ_e), які відображають розподіл теплового потоку у речовині фононами і електронами провідності [1,2]. Посилити розсіювання фононів і, як наслідок, знизити λ_L , не впливаючи негативно на електронні властивості (S , σ) залишається актуальною проблемою ТЕ матеріалознавства [1 – 3].

Експериментально теплопровідність полікристалічних ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ досліджували в багатьох роботах [4 – 6], де основна увага приділялась складам з боку $PbTe$. Так, в [4,5] загальна λ знижувалась з ростом вмісту Se до $x \sim 0.5$, а потім знову зростала. В [6] було показано, що λ_L також знижується з ростом вмісту Se до $x = 0.25$, що на думку авторів обумовлено розсіюванням

фононів через локальну деформацію, викликану різницею мас атомів Te і Se . Теоретичний розрахунок λ_L , проведений авторами [7] показав, що за кімнатної температури при $x = 0.5$ спостерігається максимальне зниження λ_L на $\sim 30\%$ в порівнянні з λ_L сполук $PbTe$ і $PbSe$.

Раніше в ряді робіт, огляд яких наведено в [8], були виявлені аномалії на ізотермах властивостей, в тому числі і теплопровідності у твердих розчинах на основі сполук IV-VI при малому вмісті другого компонента ($\sim 0.5-1.5$ ат. %). За припущенням авторів цих робіт концентраційні аномалії пов'язані з наявністю фазових переходів перколяційного типу при переході від розведених до концентрованих твердих розчинів.

Аномальна ділянка зростання теплопровідності на залежності $\lambda(x)$ за кімнатної температури спостерігалася і авторами [9] у ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ з боку $PbTe$ в інтервалі $x = 0.9925 - 0.9875$. Представляло інтерес з'ясувати чи буде проявлятися аналогічний ефект у цих же ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ тільки з боку $PbSe$. Тому, в роботі [10] було проведено дослідження концентраційних залежностей мікротвердості H , S , σ литих і пресованих полікристалічних зразків ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.045$) за кімнатної температури і поблизу $x = 0.01$ виявлено ділянки аномального зниження H та S і зростання σ . Проте, теплові властивості цих зразків не були вивчені.

Дана робота присвячена дослідженню впливу складу і температури на теплопровідність твердих розчинів на основі селеніду свинцю у системі $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$).

Експеримент

Полікристалічні зразки $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0, 0.0025, 0.005, 0.01, 0.0125, 0.015, 0.0175, 0.035, 0.04$) були синтезовані шляхом сплавлення вихідних елементів у вакуумованих кварцових ампулах за температури 1380 К з наступним гомогенізуючим відпалом за температури 870 К протягом 240 год. Всі зразки мали p -тип провідності. Для вимірювання теплопровідності із литих злитків виготовлялись гарячепресовані зразки циліндричної форми діаметром 15 мм і висотою 5.5 мм (температура пресування 650 К, тиск 0.4 ГПа, час витримки під навантаженням 10 с) з наступним відпалом за температури 720 К протягом 250 год.

Теплопровідність вимірювалась в інтервалі температур 150 - 600 К на приладі ВТ- λ -400 методом динамічного калориметра в режимі монотонного нагріву. Для кожного зразка було проведено три вимірювання λ . Відносна похибка вимірювань не перевищувала 5 %. Граткова складова теплопровідності λ_L виділялась із загальної теплопровідності шляхом віднімання електронної складової λ_e , яка розраховувалась за законом Відемана-Франца $\lambda_e = L\sigma T$ (для виродженого напівпровідника число Лоренца $L = \pi^2 k^2 / 3e = 2.45 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом·К⁻² [11]). Електропровідність σ вимірювалась чотирьохзондовим методом з точністю 5 %.

Результати та їх обговорення

На рис. 1 наведено залежність граткової теплопровідності від складу ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ за температури 325 К. Видно, що при загальній тенденції до зменшення λ_L зі збільшенням вмісту Te на залежності $\lambda_L(x)$ спостерігається максимум поблизу $x = 0.0075$, що вказує на зменшення

фононного розсіювання і збільшення швидкості розповсюдження елементарних збуджень поблизу $x = 0.0075$.

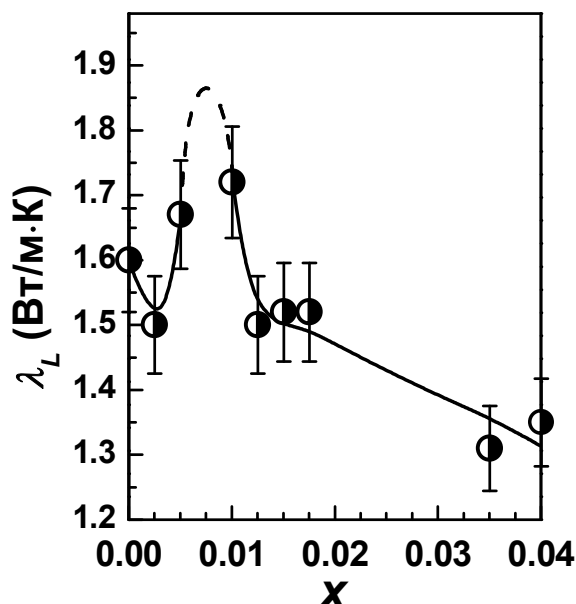


Рис. 1 Залежність граткової теплопровідності λ_L твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ від складу x за температури 325 К

У зв'язку з цим представляло інтерес з'ясувати, який буде характер концентраційної залежності степеневого коефіцієнта у температурній залежності λ_L . Тому було проведено вимірювання загальної теплопровідності λ досліджуваних зразків в інтервалі температур 150 - 600 К. На рис. 2 наведено температурні залежності $\lambda(T)$ деяких зразків $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0, 0.0025, 0.005, 0.0175$). Решта зразків мала аналогічний характер залежностей $\lambda(T)$. З рис. 2 видно, що в досліджуваному інтервалі температур значення λ знижуються, що характерно для фонон-фононного розсіювання і узгоджується із залежностями $\lambda(T)$ наведеними в роботах [4 - 6].

Виконаний нами оціночний розрахунок електронної складової теплопровідності показав, що для полікристалу $PbSe$ за кімнатної температури $\lambda_e = 1 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), $\lambda_L/\lambda = 99.4\%$, а для ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ значення $\lambda_e = (0.5 - 1.4) \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), $\lambda_L/\lambda = (99.2 - 99.8)\%$. Отже, в $PbSe$ і в ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ на його основі основний вклад у теплопровідність вносить λ_L . На підставі цього можна припустити, що отримані у даній роботі експериментальні значення λ практично співпадають зі значеннями граткової теплопровідності.

Відомо, що за температур вище за температуру Дебая Θ_D (для $PbSe$ $\Theta_D = 138$ К) λ_L напівпровідників з ростом температури знижується за законом $\lambda_L \sim T^{-1}$ [11,12]. Припускаючи степеневий характер температурної залежності λ_L ($\lambda_L \sim T^\beta$), для досліджуваних зразків був оцінений степеневий коефіцієнт β (рис. 3). Як видно з рис. 3, після зниження β при введенні першої порції домішки ($x = 0.0025$) спостерігається різке зростання степеневого коефіцієнта при

$x = 0.005$, коли β досягає практично теоретичного значення ($\beta = -1.05 \pm 0.05$), і наступне різке зменшення до $\beta = -0.5 \pm 0.05$, що свідчить про наявність якихось перетворень у кристалі, які суттєво змінюють процеси теплопереносу і розсіювання фононів. Наступне зростання β і сталість λ_L в інтервалі $x = 0.0125 - 0.0175$ вказують на складний характер цих перетворень, які можуть супроводжуватися процесами упорядкування. Було цікаво порівняти значення β , одержані іншими авторами, з результатами цієї роботи.

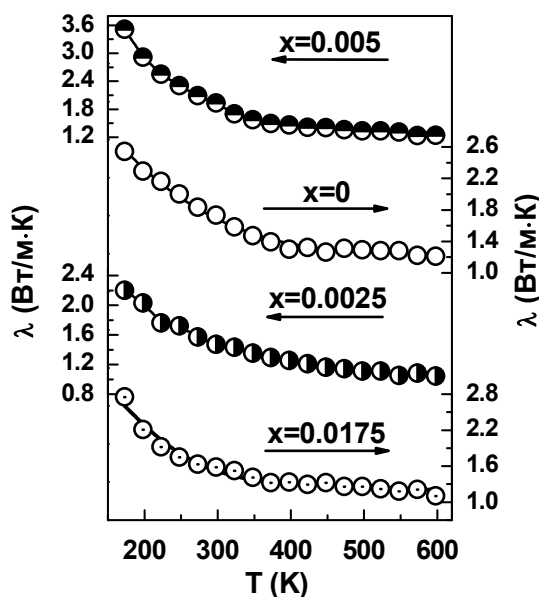


Рис. 2 Температурні залежності загальної теплопровідності λ твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$

Проведене чисельне оцінювання степеневого коефіцієнта β для ряду експериментальних залежностей $\lambda_L(T)$ для полікристалів $PbSe$, наведених в роботах [5, 6, 13], показало, що значення β дорівнюють $\beta = -(0.7 - 0.9)$. Відхилення значень β для чистого $PbSe$ від теоретичного значення, очевидно, пов'язане з наявністю границь зерен, дефектів нестехіометрії та інших недосконалостей у полікристалах.

Аномальне зростання λ_L поблизу $x = 0.0075$ можна описати, як це робилось в [9], в рамках задачі сфер теорії перколяції [14, 15]. В цій моделі кожний введений атом заміщення (в даному випадку атом Te), представлений у вигляді сфери, викликає поле статичної деформації радіусом R_0 і збудження фононного спектру у кристалі. При досягненні певної критичної концентрації x_c атомів заміщення (поріг перколяції) утворюється ланцюжок взаємопов'язаних атомів, що пронизує весь кристал (нескінченний кластер). Коли в решітку $PbSe$ вводяться перші порції Te , структура кристалу стає неупорядкованою, що проявляється у зниженні теплопровідності при $x = 0.0025$. Подальше збільшення концентрації Te призводить до того, що деформаційні поля сусідніх атомів заміщення починають перекриватися, що визиває зниження локальних пружних напружень решітки, збільшення швидкості розповсюдження теплових коливань кристалічної

решітки і, як наслідок, зростання теплопровідності. В рамках задачі сфер перколяційної теорії, використовуючи припущення про близькодійний характер деформаційної взаємодії, критичну концентрацію можна визначити з умови $4/3N_c(2R_0)^3 \approx 2.7$, де N_c - середнє число центрів сфер радіусом R_0 в одиниці об'єму [15]. Припускаючи, що критична концентрація з максимальним значенням λ_L відповідає $x_c = 0.0075$, було одержано $R_0 = 1.39a_0$ (де a_0 - параметр елементарної комірки $PbSe$). Подальше збільшення концентрації Te викликає нові деформації кристалу в ТР, а значить зниження λ_L при $x > 0.015$. З великою вірогідністю, як вже відзначалося вище, такий перколяційний перехід супроводжується процесами упорядкування.

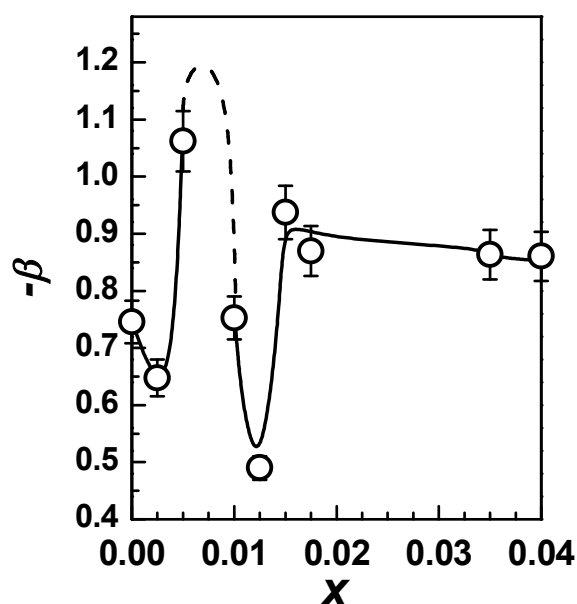


Рис. 3 Залежність степеневого коефіцієнта β у температурній залежності ґраткової теплопровідності λ_L від складу твердого розчину $PbSe_{1-x}Te_x$

Таким чином, аномальне зростання $\lambda_L(x)$ в ТР $PbSe_{1-x}Te_x$ поблизу $x = 0.0075$ ми пов'язуємо з проявом критичних явищ, що супроводжують перехід перколяційного типу від розведених твердих розчинів до концентрованих. Наявність такої ділянки зростання $\lambda_L(x)$ треба враховувати при розробці матеріалів на основі $PbSe$, бо збільшення теплопровідності може привести до зменшення значення ZT . Результати роботи ще раз підтверджують обґрунтоване в роботі [8] припущення про універсальний характер таких концентраційних аномалій.

Висновки

Отримано залежності ґраткової теплопровідності λ_L пресованих зразків твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$) за температури 325 К і степеневого коефіцієнта β у температурній залежності λ_L від складу. На залежностях $\lambda_L(x)$ і $\beta(x)$ поблизу $x = 0.0075$ спостережено чіткі

максимуми, наявність яких свідчить про існування перетворень у гратковій підсистемі кристала, що приводять до зростання швидкості розповсюдження фононів і зміни у процесах їх розсіювання. Немонотонний характер залежностей $\lambda_L(x)$ і $\beta(x)$ пов'язується з проявом критичних явищ, які супроводжують фазовий перехід перколяційного типу, що має місце при переході від розведених до концентрованих твердих розчинів. Одержані в цій роботі, а також попередні наші дані по дослідженню твердих розчинів $PbSe_{1-x}Te_x$ показують, що при інтерпретації результатів, оптимізації ТЕ властивостей і практичному застосуванні цих матеріалів необхідно враховувати концентраційні аномалії теплопровідності в певному інтервалі складів поблизу вихідних компонентів $PbTe$ і $PbSe$.

Література

1. Rowe D.M. (Ed.) CRC Handbook of Thermoelectrics, London, New York, Washington: CRC Press, Boca Raton, 1995, 701p.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник, Киев: Наукова Думка, 1979, 768с.
3. Ren Z., Lan Y., Zhang Q., Advanced thermoelectrics: Materials, contacts, devices, and systems, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017, 813p.
4. Pei Y., Shi X., LaLonde A., Wang H., Chen L., Snyder G.J., Convergence of electronic bands for high performance bulk thermoelectrics, Nature. Letter., 473, 2011, 66-69.
5. Basu R., Bhattacharya Sh., Bhatt R., Singh A., Aswal D. K., Gupta Sh. K., Improved thermoelectric properties of Se-doped n-type $PbTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$), Journal of Electronic Materials, 42(7), 2013, 2292-2296.
6. Li J.Q., Li S.P., Wang Q.B., Wang L., Liu F.S., Ao W.Q., Synthesis and thermoelectric properties of the $PbSe_{1-x}Te_x$ alloys, Journal of Alloys and Compounds, 509, 2011, 4516-4519.
7. Tian Zh., Garg J., Esfarjani K., Shiga T., Shiomi J., Chen G., Phonon conduction in $PbSe$, $PbTe$, and $PbTe_{1-x}Se_x$ from first-principles calculations, Phys. Rev. B, 85, 2012, 184303.
8. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Thermal conductivity isotherm anomalies in semiconductor solid solutions based on IV-VI compounds, J. Thermoelectricity, 4, 2005, 82-90.
9. Rogacheva E.I., Vodorez O.S., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Concentration anomalies of the thermal conductivity in $PbTe$ - $PbSe$ semiconductor solid solutions, Phys. St. Sol. B, 251, 2014, 1231-1238.
10. Vodorig O.S., Tavrina T.V., Nikolaenko G.O., Rogachova O.I. Mechanical and Thermoelectric Properties of $PbSe_{1-x}Te_x$ Semiconductor Solid Solutions ($x = 0 - 0.04$), Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 42(4), 2020, 487-495 (in Ukrainian).
11. Tritt T.M., Thermal conductivity: theory, properties, and applications, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 2004, 290p.
12. Berman R., Thermal conduction in solids, Clarendon Press, Oxford, 1976, 193 p.
13. Pei Y.-L., Liu Y. Electrical and thermal transport properties of Pb-based chalcogenides: $PbTe$, $PbSe$

and PbS, J. Alloys and Compounds, 514, 2012, 40-44.

14. Тарасевич Ю.Ю., Перколяция: теория, приложения, алгоритмы, Москва: Едиториал УРСС, 2002, 112 с.
15. Stauffer D., Aharony A., Introduction to Percolation Theory, Taylor & Francis, Washington, DC, 1992, 192p.

Надійшла до редакції 06.08.2020

Николаєнко Г.А., Водоріз А.С., канд.физ.-мат. наук
Рогачева Е.И., докт. физ.-мат. наук, профессор,
Таврина Т.В., канд. физ.-мат. наук, доцент
Лисачук Г.В., докт. физ.-мат. наук, профессор

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$)

Получена зависимость решеточной теплопроводности λ_L прессованных образцов твердых растворов $PbSe_{1-x}Te_x$ от состава ($x = 0 - 0.04$) при температуре 325 К. На кривой $\lambda_L(X)$ выявлен максимум вблизи $x = 0.0075$. Измерение температурной зависимости λ_L в интервале 150 - 600 К показало, что концентрационная аномалия в этом же интервале составов наблюдается и на зависимости степенного коэффициента β в температурной зависимости λ_L от состава. Немонотонный характер зависимостей $\lambda_L(x)$ и $\beta(x)$ связывается с критическими явлениями, сопровождающими переход перколяционного типа от разбавленных к концентрированным твердым растворам. При исследовании и практическом применении твердых растворов $PbSe_{1-x}Te_x$ необходимо учитывать немонотонный характер изменения теплопроводности с составом. Библ. 15, рис. 3.

Ключевые слова: твердые растворы $PbSe_{1-x}Te_x$, теплопроводность, состав, температура, перколяции.

G.O.Nikolaenko, O.S.Vodoriz, *cand. phys.-math. Sciences*
E.I. Rogacheva *doc. phys. - math. Sciences, Professor*
Tavrina T.V., *cand. phys.-math. Sciences, Associate Professor*
Lisachuk G.V., *doc. phys.-math. Sciences, Professor*

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
2 Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

THERMAL CONDUCTIVITY OF $PbSe_{1-x}Te_x$ ($x = 0 - 0.04$) SOLID SOLUTIONS

The dependence of lattice thermal conductivity λ_L of pressed samples of $PbSe_{1-x}Te_x$ solid solutions on the composition ($x = 0 - 0.04$) at a temperature of 325 K is obtained. The $\lambda_L(x)$ curve shows a maximum near $x = 0.0075$. Measurement of the temperature dependence of λ_L in the range of 150 - 600 K showed that a concentration anomaly in the same range of compositions is also observed on the composition dependence of power factor β in the temperature dependence of λ_L . The non-monotonic character of the $\lambda_L(x)$ and $\beta(x)$ dependences is associated with critical phenomena accompanying the transition of the percolation type from dilute to concentrated solid solutions. In the study and practical application of $PbSe_{1-x}Te_x$ solid solutions, it is necessary to take into account the non-monotonic nature of the change in thermal conductivity with composition.

Key words: $PbSe_{1-x}Te_x$ solid solutions, thermal conductivity, composition, temperature, percolation.

References

1. Rowe D.M. (1995). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press.
2. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva. Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Ren Z., Lan Y., Zhang Q. (2017). *Advanced thermoelectrics: Materials, contacts, devices, and systems*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
4. Pei Y., Shi X., LaLonde A., Wang H., Chen L., Snyder G.J. (2011). Convergence of electronic bands for high performance bulk thermoelectrics. *Nature Letter*, 473, 66-69.
5. Basu R., Bhattacharya Sh., Bhatt R., Singh A., Aswal D. K., Gupta Sh. K. (2013). Improved thermoelectric properties of Se-doped n-type $PbTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$). *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 2292-2296.

6. Li J.Q., Li S.P., Wang Q.B., Wang L., Liu F.S., Ao W.Q. (2011). Synthesis and thermoelectric properties of the $PbSe_{1-x}Te_x$ alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 4516-4519.
7. Tian Zh., Garg J., Esfarjani K., Shiga T., Shiomi J., Chen G. (2012). Phonon conduction in PbSe, PbTe, and $PbTe_{1-x}Se_x$ from first-principles calculations. *Phys. Rev. B*, 85, 184303.
8. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S. (2005). Thermal conductivity isotherm anomalies in semiconductor solid solutions based on IV-VI compounds. *J. Thermoelectricity*, 4, 82-90.
9. Rogacheva E.I., Vodoretz O.S., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S. (2014). Concentration anomalies of the thermal conductivity in PbTe–PbSe semiconductor solid solutions. *Phys. St. Sol. B*, 251, 1231-1238.
10. Vodoretz O.S., Tavrina T.V., Nikolaenko G.O., Rogachova O.I. (2020). Mechanical and thermoelectric properties of $PbSe_{1-x}Te_x$ semiconductor solid solutions ($x = 0 - 0.04$). *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42(4), 487-495 (in Ukrainian).
11. Tritt T.M. (2004). *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. New York: Kluwer Academic, Plenum Publishers.
12. Berman R. (1976). *Thermal conduction in solids*. Oxford: Clarendon Press.
13. Pei Y.-L., Liu Y. (2012). Electrical and thermal transport properties of Pb-based chalcogenides: PbTe, PbSe and PbS. *J. Alloys and Compounds*, 514, 40-44.
14. Tarasevich Yu.Yu. (2002). *Percolatsiia: teoriia, prilozheniia, algoritmy [Percolation: theory, applications, algorithms]*. Moscow: Editorial URSS [in Russian].
15. Stauffer D., Aharony A. (1992). *Introduction to percolation theory*. Wasington, DC: Taylor & Francis.

Submitted 06.08.2020

Рогачова О.І., докт. фіз.-мат. наук, професор
Новак К.В., Орлова Д.С.,
Нащекіна О.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент
Сіпатов О.Ю., докт. фіз.-мат. наук, професор
Лісачук Г.В. докт. техн. наук, професор

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова 2, Харків 61002, Україна

РОЗМІРНІ ЕФЕКТИ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$

При кімнатній температурі отримано залежності термоелектричних властивостей (коефіцієнта Зеебека S , електропровідності σ , коефіцієнта Холла R_H і термоелектричної потужності $P = S^2\sigma$) від товщини ($d = 5 - 250$ нм) тонких плівок твердих розчинів $Bi_{0.98}Sb_x$, вироцених на підкладках зі слюди методом термічного випаровування у вакуумі із одного джерела. Показано, що монотонна складова залежності $\sigma(d)$ добре описується в рамках теорії Фукса-Зондгеймера для класичного розмірного ефекту. Виявлена осцилююча складова d -залежностей σ , S , R_H та $S^2\sigma$ пов'язується з проявом квантового розмірного ефекту, і визначений експериментально період квантових осциляцій $\Delta d = 45 \pm 5$ нм добре узгоджується зі значенням Δd , теоретично розрахованим в рамках моделі нескінченно глибокої потенційної ями.

Ключові слова: $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ твердий розчин, тонка плівка, товщина, термоелектричні властивості, розмірний ефект, період осциляцій.

Вступ

Тверді розчини $Bi_{1-x}Sb_x$ добре відомі як ефективні термоелектричні (ТЕ) матеріали для охолоджуючих пристроїв для температур нижче ~ 200 К [1, 2]. Зростаючий інтерес до вивчення твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ зумовлений не тільки можливістю їх практичного застосування у ТЕ енергетиці, але і їх унікальними властивостями, які пов'язані із особливостями енергетичного спектра і можливістю зі зміною складу його якісної перебудови, яка супроводжується рядом фазових переходів [3 – 7]. Ві виявляє напівметалеві властивості: електронна L_s – зона та T – зона “важких” дірок перекриваються. Коли Sb додається до Bi , відстань між електронною L_s – зоною та La - зоною “легких” дірок зменшується і при $x = 0.023 \div 0.04$ (різні автори повідомляють про різні значення x), енергетичний проміжок між ними стає нульовим, тобто реалізується

безщільний стан. З подальшим збільшенням x , відстань між L_s та L_a зонами знову збільшується, одночасно перекриття зон T і L_s зменшується і при $x = 0.06 \div 0.07$ має місце перехід напівметал – непрямозонний напівпровідник. Далі при $x = 0.08 \div 0.09$ вершини валентних зон T і L_s збігаються і в діапазоні $x \cong 0.09 \div 0.15$ напівпровідник стає прямозонним. В роботах [8 – 12] було показано, що критичним складам, при яких мають місце електронні фазові переходи та перехід перколяційного типу від розведених до концентраційних твердих розчинів відповідають концентраційні аномалії транспортних властивостей. Відповідно до [13, 14], фазові переходи цих типів реалізуються у тонких плівках $Bi_{1-x}Sb_x$.

Останнім часом інтерес до вивчення властивостей твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ різко зріс після того, як було показано, що вони мають властивості топологічних ізоляторів – найновіших матеріалів квантової фізики, в яких сильна спін-орбітальна взаємодія призводить до появи топологічних металевих поверхневих станів з лінійним діраківським законом дисперсії $E(k)$ [15 – 17], Твердий розчин $Bi_{1-x}Sb_x$ з $x = 0.1$ був першим експериментально відкритим 3D-топологічним ізолятором [16]. Після того, як було встановлено, що найкращі TE матеріали (включаючи $Bi_{1-x}Sb_x$) належать до класу топологічних ізоляторів, останнім часом все частіше дискутується питання про можливість використання унікальних властивостей топологічного поверхневого шару для розробки принципово нових способів збільшення TE добротності ZT .

Розвиток нанотехнологій та можливість збільшення ZT в низькорозмірних структурах [18] стимулювали дослідження тонкоплівкових структур $Bi_{1-x}Sb_x$. З іншого боку, для вивчення властивостей топологічного шару краще використовувати тонкі плівки, в яких зростає внесок у провідність металевого шару. Однак при використанні тонких плівок слід мати на увазі, що в тонкоплівковому стані можливі прояви класичного розмірного ефекту (КлРЕ) та квантового розмірного ефекту (КРЕ), які можуть значно змінити властивості плівки порівняно з об'ємним кристалом. [19]. КлРЕ викликається дифузним розсіюванням носіїв заряду на границях плівки і проявляється у випадку, коли товщина плівки d порівнянна із середньою довжиною вільного пробігу носіїв заряду l . КРЕ є результатом квантування енергетичного спектра носіїв заряду і спостерігається, коли значення d стає порівняним з довжиною хвилі Фермі, $\lambda_F = h/\sqrt{2m^*E_F}$ де h – стала Планка, m^* – ефективна маса і E_F – енергія Фермі. Одним із наслідків КРЕ є осцилюючий характер d -залежностей транспортних властивостей. Завдяки надзвичайно низькому значенню m^* і аномально високій рухливості електронів у Bi та $Bi_{1-x}Sb_x$ ці матеріали дуже зручні для вивчення КРЕ. Саме у тонких плівках Bi films були вперше спостережені і теоретично пояснені осциляції на d -залежностях гальваноманітних властивостей [20, 21].

Після цього з'явилася велика кількість робіт, присвячених розмірним ефектам у плівках Bi (див., напр., [19, 22 – 51]). За результатами вивчення d – залежностей транспортних властивостей деякі автори [23, 27, 31, 38, 39, 43, 44, 49, 50] визначили l та коефіцієнт r (частка носіїв заряду, які відбиваються дзеркально від поверхні) для плівок Bi , використовуючи теорію Фукса-Зомерфельда (ФЗТ) [52, 53] або інші методи. Було показано, що величина l у монокристалічних

плівках Bi при кімнатній температурі знаходиться в діапазоні 600 -1000 нм, а у полікристалічних плівках в інтервалі $l = 100-250$ нм, а величина p в інтервалі $p = 0 - 0.8$. Відмінність у значеннях l та p , одержаних різними авторами, очевидно, була пов'язана з тим, що ці параметри залежать як від структури плівки, яка в свою чергу визначається технологією її приготування, так і від методу визначення l і p .

Після відкриття авторами [20] в плівках Bi осциляцій кінетичних коефіцієнтів існування таких осциляцій було підтверджено у великій кількості робіт [19, 22 – 51], в яких осциляційні залежності електричного опору ρ , коефіцієнта Холла R_H , коефіцієнта Зеєбека S та магнітоопору $\Delta\rho/\rho$ від d також були інтерпретовані як прояв КРЕ. Періоди осциляцій Δd , визначені експериментально для тонких плівок Bi різними авторами, знаходилися в діапазоні 25-45 нм. Деякі автори [54 – 60] навіть розглядали квантові поправки до провідності, які є наслідком квантової інтерференції.

Наступним кроком було вивчення транспортних властивостей тонких плівок твердих розчинів $Bi_{1-x}Sb_x$ [61 – 74] з метою ідентифікації КЛРЕ та КРЕ. Виявилось, що, як і у плівках Bi , d -залежності кінетичних властивостей у $Bi_{1-x}Sb_x$ демонструють КЛРЕ. Автори [65] оцінили значення l для епітаксialьних плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ в області $x = 0 - 0,142$ за d -залежностями рухливості електронів при 4.2 К, використовуючи ФЗТ. Згідно з [65], l змінюється в межах $l \cong 1000 - 6000$ нм. Автори [71, 72] обчислили значення l для полікристалічних плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ при $x = 0.07$ [71] та $x = 0.12$ [72] до та після відпалу із залежностей $\sigma(d)$ та $S(d)$ при кімнатній температурі у припущенні про повне дифузне розсіювання носіїв заряду ($p = 0$) та отримали значення $l = 60$ і 180 нм [71] та $l = 150$ і 230 нм [72].

Перші роботи [61 – 63] з вивчення d -залежностей σ , S та ρ плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ підтвердили наявність КРЕ у тонких плівках $Bi_{1-x}Sb_x$. Автори [61,62] досліджували залежності $\sigma(d)$ та $S(d)$ при 90 К для полікристалічних плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ ($d \leq 300$ нм) з $x = 0.018$ та 0.035 і виявили, що порівняно з плівками вісмуту Δd збільшується відповідно до $\Delta d = 70$ і 90 нм. У роботі [63] також було показано, що введення невеликої кількості Sb ($x \sim 0.04$) у плівки Bi з $d = 420 - 570$ нм, отримані термічним випаровуванням Sb у вакуумі з наступним відпалом, призвело до збільшення Δd від $\sim d \sim 26$ нм для чистого Bi до $\Delta d \sim 65$ нм для $Bi_{1-x}Sb_x$ при 4.2 К. Подальші більш детальні систематичні дослідження d -залежностей ($d = 400-1200$ нм) σ , R_H та $\Delta\rho/\rho$ при 4.2 К, проведені авторами [64 – 68], показали, що збільшення x до $x = 0.059$ призводить до збільшення Δd до $\Delta d \sim 110$ нм, однак подальше збільшення x до $x = 0.142$ зменшує Δd до $\Delta d \sim 50$ нм, що було віднесено авторами [64 – 68] до зміни у параметрах зонного спектра $Bi_{1-x}Sb_x$ зі зміною складу.

Можна бачити, що в різних дослідженнях розмірних ефектів у плівках $Bi_{1-x}Sb_x$ використовували плівки різного складу, різної товщини, приготовані за різними технологіями, і вимірювання проводили при різних температурах. Між тим властивості кристалів $Bi_{1-x}Sb_x$ і, ще більшою мірою, плівок дуже чутливі до різних типів зовнішніх впливів, тому порівняння різних фізичних параметрів тонких плівок слід проводити при однакових температурах. однакових

інтервалах d і однакових технологіях вирощування плівок. Крім того, зазвичай досліджувались або КлРЕ, або КРЕ, хоча обидва види розмірних ефектів повинні проявлятися одночасно.

У [73, 74] ми повідомляли про спостереження осциляцій з $\Delta d = 80 \pm 5$ нм [73] та з $\Delta d = 105 \pm 5$ нм [74] у d -залежностях σ , R_H , $\Delta\rho/\rho$ та S при кімнатній температурі для полікристалічних тонких плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ ($d = 5-400$ нм), одержаних термічним випаровуванням у вакуумі кристалів з $x = 0.045$ та $x = 0.09$ та подальшим осадженням на підкладки (111) слюди при температурі $T_S = 380 \pm 5$ К. Визначене раніше при кімнатній температурі Δd для плівок Bi , отриманих за подібних умов, становило ~ 30 нм [46]. Одночасно у [73, 74] було досліджено КлРЕ, і розрахунки з використанням теорії ФЗТ дали значення $l = 800 \pm 40$ нм ($x = 0.045$) та $l = 900 \pm 50$ нм, ($x = 0.09$), а значення p практично не залежало від складу і відповідало $p = 0.8$. Склад $x = 0.045$ відповідає напівметалічному стану і лежить між критичними складами, що відповідають переходу в безщілинний стан ($x \sim 0.03$) та переходу від напівметалу до непрямозонного напівпровідника

($x \sim 0.06$). Склад $x = 0.09$ відповідає області прямозонного напівпровідника.

Таким чином, плівки $Bi_{1-x}Sb_x$, досліджені в [73, 74] і плівки чистого Bi , досліджені в [46], були виготовлені і досліджені з використанням одних методик приготування та вимірювання, а склад цих плівок лежали поза областями фазових переходів, наявність яких могла б викликати прояв деяких особливостей розмірних ефектів. Цікавим було би вивчення тонких плівок, одержаних за однакових умов із напівметалічних кристалів $Bi_{1-x}Sb_x$, складу яких лежать між критичними складами, що відповідають перколяційному переходу ($x \sim 0.01$) та переходу у безщілинний стан ($x \sim 0.03$). Таким складом може бути склад, що відповідає $x = 0.02$.

Метою цієї роботи є виготовлення напівметалевих плівок різної товщини d зі складом $x = 0.02$, використовуючи методику, подібну до описаної в роботах [46, 73, 74], та шляхом вимірювання d -залежностей ТЕ характеристик виявити класичні та квантові розмірні ефекти, оцінити значення l , p та Δd і порівняти їх із значеннями, отриманими в роботах [46, 73, 74]

Результати та їх обговорення

Об'єктами цього дослідження є тонкі плівки твердого розчину $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ товщиною $d = 5-250$ нм, отримані шляхом термічного випаровування у вакуумі полікристалу $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ та подальшого осадження на слюдяні підкладки при температурі 380 К. Методи приготування плівок, вимірювання їх товщини, сертифікація мікро- та кристалічної структури та вимірювання ТЕ властивостей аналогічні описаним у роботах [46, 73, 74].

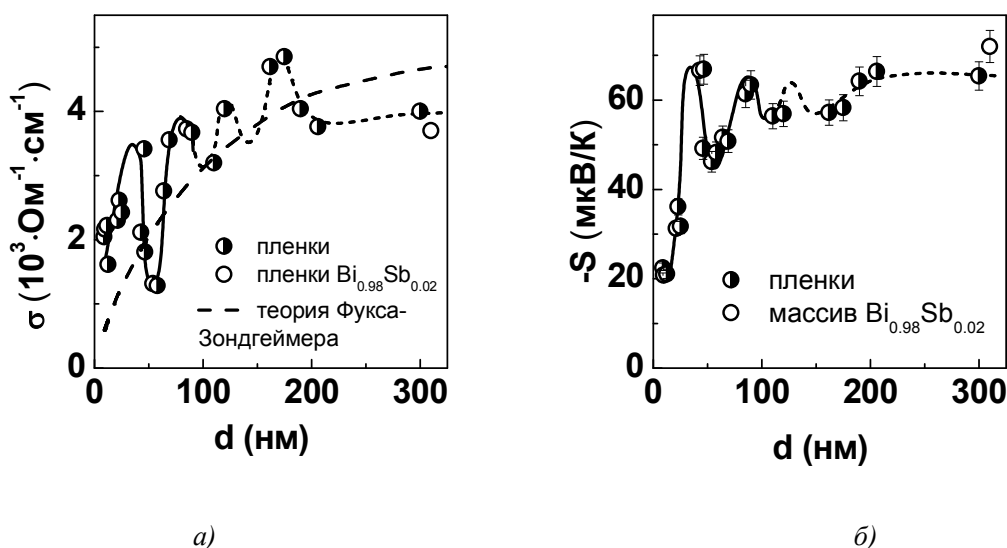
На рис. 1, а, б, в, г представлено залежності σ , S , R_H та ТЕ коефіцієнта потужності $P = S^2 \sigma$ від d при 300 К. Ненульова провідність спостерігалася, починаючи з критичної товщини $d_c = 9$ нм, що відповідає переходу від острівцевих плівок до структури з каналами. Згідно з більш ранніми електронно-мікроскопічними дослідженнями [46, 73, 74], плівки Bi та $Bi_{1-x}Sb_x$ на підкладках зі слюди ростуть за острівцевим механізмом в епітаксильній орієнтації (001) Bi || (001) слюди. Вони містять висококутні границі подвійного типу і є мозаїчними монокристаллами.

Видно, що всі залежності кінетичних коефіцієнтів від товщини демонструють немонотонну поведінку. Зі збільшенням d спостерігається тенденція до збільшення σ , S та R_H . Однак також видно, що на фоні монотонного зростання кінетичних коефіцієнтів зі збільшенням d спостерігаються осциляції на тих самих залежностях, і для всіх d -залежностей можна виділити монотонну та осциляційну складові. Ми приписуємо наявність монотонної складової КлРЕ, а осциляційної – КРЕ.

Згідно з ФЗТ класичного розмірного ефекту [52, 53], залежність електропровідності від d , при умові, що $d \ll l$ має вигляд:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_\infty} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1+p}{1-p} \cdot \frac{d}{l} \cdot \ln \frac{l}{d}, \quad (1)$$

де l – середня довжина вільного пробігу носіїв заряду масивного матеріалу, p – поверхневий коефіцієнт розсіювання, Δd – електропровідність плівки товщиною d , σ_∞ – провідність масивного кристала. Значення p знаходиться між 0 (для повністю дифузного розсіювання) та 1 (для повністю дзеркального відбиття). В останньому випадку КлРЕ не буде спостерігатися. ФЗТ передбачає реалізацію КлРЕ у разі переважно дифузного характеру розсіювання, тобто при достатньо низьких значеннях p . Слід зазначити також, що в ФЗТ прийнято ряд спрощень: розглядається метал із сферичною поверхнею Фермі та ізотропною l , не залежною від d , вважається, що p – константа, однакова для обох поверхонь плівки, незалежна від d , кута падіння на поверхню та траєкторії електронів. Використовуючи як σ_∞ значення електропровідності для плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ товщиною $d = 200-300$ нм ($\sigma \approx 4000$ (Ом см)⁻¹) і змінюючи значення p і l , були розраховані теоретичні залежності $\sigma(d)$. Порівняння експериментальних та теоретичних залежностей $\Delta(d)$, розрахованих у рамках ФЗТ, дозволило встановити, що найкраще співвідношення результатів теоретичних розрахунків та експериментальних даних спостерігалось при $p = 0.5 \pm 0.05$ та $l = 800 \pm 40$ нм. На рис. 1, а теоретична залежність $\Delta(d)$, обчислена за допомогою рівняння (1), зображена пунктиром.



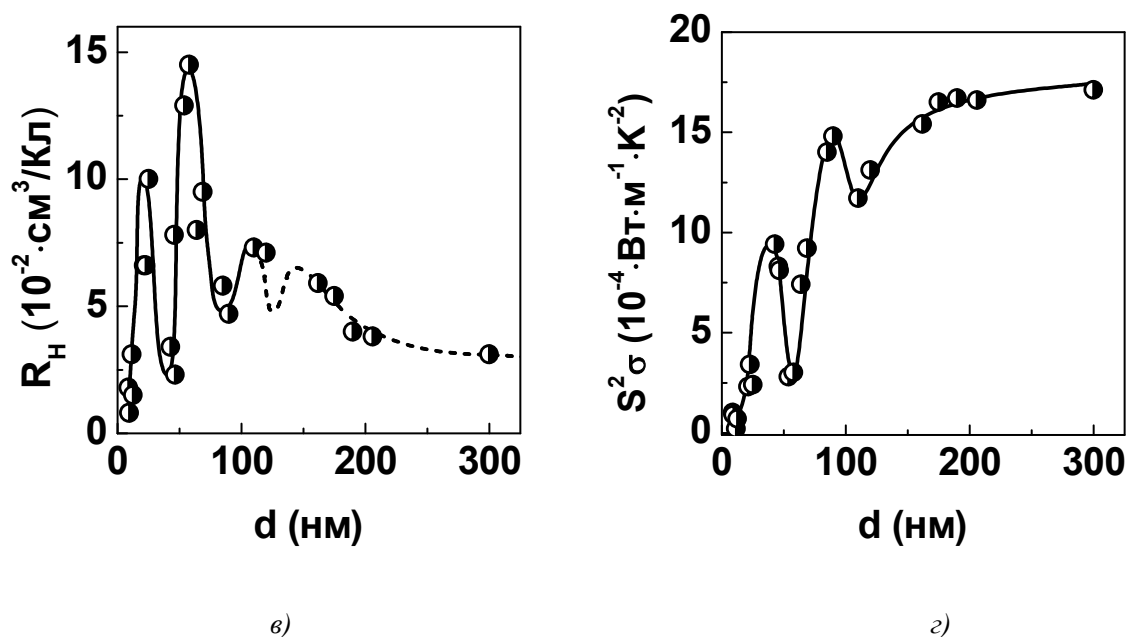


Рис. 1. Залежності електропровідності σ (а), коефіцієнта Зеєбека S (б), коефіцієнта Холла R_H (в) і термоелектричної потужності $P = S^2 \sigma$ (г) при кімнатній температурі в ід товщини d плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$, виготовлених методом термічного випаровування у вакуумі на підкладки зі слюди. На рис. 1,а) показана пунктиром теоретична залежність $\Delta(d)$, одержана з використанням теорії Фукса - Зондгеймера.

На рис. 1,б представлена залежність $S(d)$ при кімнатній температурі. S має від'ємний знак, як в масивних кристалах Bi та $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$. При збільшенні d спостерігається тенденція до зростання величини S .

На рис. 1,в показана залежність $R_H(d)$. Можна бачити, що на відміну від знака S у плівках і масивному кристалі знак R_H у плівках стає позитивним. При збільшенні d спостерігається тенденція до зростання величини R_H . Осциляції ще більш виражені ніж у залежностях $\Delta(d)$ і $S(d)$.

Значення періодів осциляцій, що спостерігаються на залежностях σ , S , R_H від d практично співпадають для усіх кінетичних коефіцієнтів і дорівнюють $\Delta d = 45 \pm 5$ нм.

Використовуючи дані для σ та S , було розраховано коефіцієнт ТЕ потужності $P = S^2 \sigma$. Поведінка залежності $P(d)$ подібна до поведінки $\Delta(d)$ та $S(d)$ залежностей (рис. 1,г). Значення ТЕ коефіцієнта потужності для «товстих» плівок ($d \sim 200-400$ нм) практично збігається зі значеннями для об'ємного кристала $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$, з якого були отримані плівки.

Природно вважати, що осциляційна поведінка, що спостерігається в d -залежностях σ , R_H і S , є результатом розмірного квантування у тонких плівках $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$. У полікристалічних плівках для спостереження КРЕ необхідне формування текстури, і плівка не обов'язково повинна бути монокристалічною. Через осьову симетрію зонної структури Bi щодо тригональної осі виникають осциляції електропровідності, якщо тригональні осі нормальні до поверхні плівки у всіх кристалах.

Тонка плівка напівметалу – це квантова яма, всередині якої рух носіїв заряду обмежений в одному напрямку. Така система є зручним модельним об'єктом, оскільки її властивості близькі до моделі потенційної ями з нескінченно високими стінками. Теоретична модель для цього випадку проста у порівнянні з моделлю ями обмеженої висоти. Можливість спостереження таких осциляцій у плівці, вирощеній на аморфній підкладці, пояснюється наявністю текстури у тонких плівках $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ у напрямку обмеження руху електронів [19].

Обмеження руху електронів призводить до квантування поперечної складової квазіімпульсу, і, відповідно, до квантування енергетичного спектра. Для бар'єра нескінченної висоти, використовуючи наближення ефективної маси, рівні енергії можна представити у вигляді:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_z^* d^2} n^2 + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_x^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_y^*} \quad (2)$$

де m_x^* , m_y^* – компоненти ефективної маси для руху паралельно поверхні плівки а m_z^* – компонента ефективної маси для руху перпендикулярно поверхні плівки, n – дискретне квантове число. При фіксованих значеннях n енергія змінюється безперервно як функція k_x і k_y , що відповідає кожній підзоні n , а енергетичний спектр складається з підзон, що перекриваються. Твердий розчин $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ – це напівметал, у якому носії заряду перебувають у виродженому стані; тому умову квантування для нього можна виразити через довжину хвилі Фермі та енергію Фермі E_F . Використовуючи наближення моделі потенційної ями з нескінченно високими стінками, можна оцінити період осциляцій Δd :

$$\Delta d = \frac{h}{\sqrt{8m_z^* \varepsilon_F}} \quad (3)$$

Знаючи ефективну масу електронів та енергію Фермі для твердого розчину $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$. з $x = 0.02$ з літературних даних [4] для об'ємних кристалів ($m^*_x = 0.02 = 0.8 m^*_{Bi}$, $m^*_{Bi} = 0.012 \pm 0.002$ то $E_F = 22.7$ меВ) і з урахуванням формули (3) теоретичний період квантових осциляцій можна оцінити як $\Delta d = 52$ нм. Видно, що теоретичне значення добре узгоджується з експериментально визначеними значеннями ($\Delta d = 45 \pm 5$ нм). Слід зазначити, що хоча σ , R_H та S вимірювалися незалежно, у всіх d -залежностях для всіх змінних спостерігалися осциляції з приблизно однаковими періодами. Порівняння отриманого значення Δd зі значеннями, отриманими нами раніше [46, 73, 74] для плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ з іншими значеннями x , але виготовленими за аналогічною технологією, показує, що зі збільшенням x величина Δd зростає і дорівнює $\Delta d = 30, 45, 80, 105$ нм для плівок зі значеннями $x = 0, 0.02, 0.045$ і 0.1 , відповідно.

Як впливає з отриманих даних, R_H для всіх плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ має позитивний знак, а S – від'ємний. Цю відмінність можна пояснити сильною анізотропією монокристалів Bi , яка також виникає, хоча і в меншій мірі, при введенні Sb у Bi . Згідно з [75], у монокристалах Bi R_H має

позитивний знак тільки у напрямку тригональної осі, тоді як у перпендикулярних напрямках знак R_H змінюється на від'ємний. На відміну від R_H , коефіцієнт Зеєбека залишається від'ємним у будь-яких кристалографічних напрямках [75]. Ось чому у всіх плівках Bi , вирощених уздовж тригональної осі [001], спостерігався позитивний знак R_H та від'ємний знак S [46]. Однак зауважимо, що ми спостерігали зміну знака R_H зі збільшенням d у плівках з високим вмістом Sb [73, 74] і пояснювали це тим, що для таких зразків перпендикулярна орієнтація тригональної осі [001] щодо поверхні підкладки стає менш досконалою. Це пояснення підтверджується результатами, отриманими в роботі [29], де в полікристалічних плівках Bi знак R_H , як і знак S , був від'ємним, оскільки не було анізотропії в полікристалічних плівках Bi та внесок бісекторної та біполярної компонент, які давали від'ємний знак R_H , був переважним. Той факт, що позитивний знак R_H у плівках $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ зберігається при всіх d , вказує на те, що після введення невеликої кількості Sb (2 ат.%) ступінь текстури плівки залишається досить високою.

З отриманих експериментальних даних випливає, що товщинні осциляції транспортних властивостей $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ чітко проявляються навіть при кімнатній температурі, хоча очікується, що термічне розмивання енергетичних рівнів зростає з підвищенням температури, і розмивання може стати порівняним із відстанню між квантовими рівнями. У ряді робіт з вивчення плівок Bi та $Bi_{1-x}Sb_x$ вимірювання проводилися при 4.2 К, однак осциляції проявлялися не більш чітко. У наших роботах з вивчення плівок IV-VI та V2VI3 (див., напр., [76, 77]) ми повідомляли, що амплітуда квантових товщинних осциляцій при кімнатній температурі досить велика. Ось чому, мабуть, слабка температурна залежність амплітуди осциляцій не визначається специфічністю тонких плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$, але є загальною для плівок різних типів і потребує теоретичної інтерпретації.

Висновки

1. У залежностях електропровідності σ , коефіцієнта Холла R_H та коефіцієнта Зеєбека S від товщини d ($d = 5 - 250$ нм) тонких плівок $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ при кімнатній температурі можна виділити монотонні та осциляційні компоненти, що вказує на прояв класичного та квантового розмірних ефектів.
2. Монотонна складова σ добре описується в рамках теорії Фукса - Зондгеймера зі значеннями середньої довжини вільного пробігу електронів l та коефіцієнта поверхневого розсіювання p як $l = 800 \pm 40$ нм та $p = 0.5 \pm 0.05$.
3. Експериментальне значення періоду квантових осциляцій ($\Delta d = 45 \pm 5$ нм) добре узгоджується з теоретичним значенням, розрахованим в рамках моделі нескінченно глибокої потенційної ями. Порівняння отриманого значення Δd зі значеннями, отриманими нами раніше [73, 74] для плівок $Bi_{1-x}Sb_x$ з іншими значеннями x , але виготовленими за аналогічною технологією, показує, що зі збільшенням x величина Δd зростає і дорівнює $\Delta d = 30, 45, 80, 105$ нм для плівок зі значеннями $x = 0, 0.02, 0.045$ і 0.1 , відповідно.

4. На відміну від раніше досліджених плівок з $x = 0.045$ [73] та $x = 0.09$ [74], у яких знак R_H залежав від товщини плівки, у плівках $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ знак R_H залишався позитивним для всіх d , як і в чистому Bi . Між тим знак S був від'ємним. Спостережуваний ефект пов'язаний з різницею знака R_H для різних напрямків у кристалі та збільшенням ступеня дезорієнтації текстури зі збільшенням x .
5. Залежність ТЕ коефіцієнта потужності від товщини плівок при кімнатній температурі також демонструє осциляційну поведінку. Значення коефіцієнта потужності для «товстих» плівок ($d \sim 200-400$ нм) практично збігаються зі значеннями для об'ємного $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ кристала, з якого вирощувались тонкі плівки, які служили зарядом для приготування тонкої плівки.

Ця робота виконувалася за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (проект № М 0625).

Література

1. Rowe D.M. (Ed.) CRC Handbook of Thermoelectrics, London, New York, Washington: CRC Press, Boca Raton, 1995, 701p.
2. Anatychyk L.I., Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book. Kyiv: Naukova dumka, 1979, 768p.
3. Brandt N.B., Chudinov S.M., Karavaev V.G., Study of a gapless state induced by a magnetic field in bismuth-antimony alloys. Zh. Eksper. Teor. Fiz. 70(6), 1976, 2296.
4. Brandt N.B., Chudinov S.M., Oscillatory effects in semimetallic $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys under pressure, Zh. Eksper. Teor. Fiz., 59(5), 1970, 1494-1507.
5. Oelgart G., Schneider G., Kraak W., Thesemiconductor-semimetal transition in $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys Phys.Stat.Sol, 74(b), 1976, 75-78.
6. Brandt N.B., Semenov M.V., Falkovsky L.A., Experiment and theory on the magnetic susceptibility of Bi-Sb alloys, J. Low Temp. Phys., 27(1,2), 1977, 75-90.
7. Lenoir B., Cassart M., Michenaud J.-P., Transport properties of Bi-rich Bi-Sb alloys, J. Phys. Chem. Solids, 57(1), 1996, 89-99.
8. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Transition into a gapless state and concentration anomalies in the properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions, Appl. Phys. Lett., 94 (20), 2009, 202111.
9. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Percolation effects in semimetallic Bi-Sb solid solutions, Phys.Stat. sol, 207(A), 2010, 344-347.
10. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Men'shov Yu.V., Galvanomagnetic properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0-0.25$, Functional Materials, 27(3), 2020, 488-496.
11. Rogacheva E.I. and Drozdova A.A., Thermoelectric properties of polycrystalline Bismuth-Antimony Solid Solutions, J. Thermoelectricity, 2, 2006, 22-28.

12. Doroshenko A.N., Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Martynova K.V., Men'shov Yu.V., Thermoelectric properties of the polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration interval $x = 0 - 0.25$, J. Thermoelectricity, 4, 2016, 23-36.
13. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Orlova D.S., Doroshenko A.N., Dresselhaus M.S., Influence of Composition on the Thermoelectric Properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ Thin Films, J. Electronic Mater. 46(7), 2017, 3821-3825.
14. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Sipatov A.Yu., Electronic phase transitions in thin $Bi_{1-x}Sb_x$ films, J. Thermoelectricity, 2, 2020, 12-24.
15. Fu L., Kane C.L., Mele E.J., Phys. Rev. Lett., 98, 2007, 106803.
16. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S., Cava R.J., Hasan M.Z, Nature, 452, 2008, 970.
17. Hasan M.Z. Kane C.L., Rev. Mod. Phys., 82, 2010, 3045.
18. Dresselhaus M.S. , Yu-Ming Lin, Koga T. , Cronin S.B. , Rabin O., Black M.R. , Dresselhaus G. , In Semiconductors and Semimetals, Recent Trends in Thermoelectric Materials Research III, USA, San Diego, CA, Academic Press, 2001, 1-121.
19. Komnik Yu.F., Physics of Metal Films, Moscow, Atomizdat, 1979, 264.
20. Ogrin Y.F., Lutsky V.N., Yelinson M.I., Observation of Quantum Size Effects in Thin Bismuth Films, Sov. Phys. JETP Lett., 3, 1966, 71-73.
21. Sandomirskii V.B., Quantum size effect in a semimetal films, Soviet Phys. JETP, 25(1), 1967, 101-106.
22. Duggal P., Rup R., Tripathi P., Quantum size effect in thin bismuth films, Appl. Phys. Lett., 9(8), 1966, 293-295.
23. Komnik Yu.F., Buchshtab E.I., Observation of the Quantum and Classical Size Effects in Polycrystalline Thin Bismuth Films, Soviet Physics JETP, 54, 1968, 34-37.
24. Traon J.J.Y.le, Combet H.A., Electrical conductivity and Hall effect in thin layers of bismuth between 4,2K and 300K, J. Phys., 30, 1969, 419-426.
25. Thornburg D.D., Wayman C.M., Quantum and Classical Size Effects in the Thermoelectric Power of Thin Bismuth Films, Philos. Magaz., 20(167), 1969, 1153-1161.
26. Lal A., Duggal V.P., Thermoelectric Power of Thin Single Crystal Bismuth Films, Philos. Magaz., 22(175), 1970, 189-191.
27. Hoffman R.A., Frankl D.R., Electrical Transport Properties of Thin Bismuth Films, Phys. Rev. B., 3(6), 1971, 1825-1833.
28. Komnik Yu.F., Andrievskii V.V., Buhsthab E.I., Features of the magnetoresistance of thin bismuth films, FTT, 12(11), 1970, 3266 - 3269.
29. Petrosyan V.I., Molin V.N., Dagman E.I., Tavger B.A., Skripkina P.A., Aleksandrov L.N., Features of quantum size effects in thin non-textured polycrystalline bismuth films obtained by the electric flash method, Fizika metalov i metalovedenie, 32, 1971, 725 - 730 (in Russian)..
30. Garcia N., Kao Y.H., Strongin M., Galvanomagnetic Studies of Bismuth Films in the Quantum-Size-Effect Region, Phys. Rev. B., 5(6), 1972, 2029-2039.

31. Subotowicz M., Jaloehowski M., Mikolajczak B, Mikolajczak P., Measurements of the physical properties of thin Bi films from 180 to 40000 Å, *Phys. Stat. Sol. A.*, 17(1), 1973, 79-87.
32. Abrasimov V.M., Yegorov B.N., Krykin M.A., Size effect of kinetic coefficients in polycrystalline bismuth films, *Sov. Phys. JETP*, 37(1), 1973, 113-116.
33. Inoue M., Yagi H., Tamaki Y., Anomalies in the Hall coefficient of bismuth films, *Japan. J. Appl. Phys.*, 12, 1973, 310.
34. Mikolajczak P., Piasek W., Subotowicz M., Thermoelectric power in bismuth thin films, *Phys. Stat. Sol. A.*, 25(2), 1974, 619-628.
35. Borzyak P.G., Vatamanyuk V.I., Kulyupin Yu.A., Peculiarities of the thickness dependences of the bismuth films structure and resistivity, *Phys. Stat. Sol. A.*, 22, 1974, 3-6.
36. Baba S., Sugawara H., Kinbara A., Electrical Resistivity of Thin Bismuth Films, *Thin Solid Films*, 31, 1976, 329-335.
37. Bondar E. A., Vatamanyuk V.I., Chumak A.A., Thickness dependence of the current carrier concentration in bismuth films, *Thin Solid Films*, 34, 1976, 387-389.
38. Komnik Yu.F., Andrievsky V.V., Kinetic properties of electrons in bismuth thin films, *Thin Solid Films*, 42, 1977, 1-6.
39. Kochowski S., Opilski A., Concentration and Mobility of Charge Carriers in Thin Polycrystalline Films of Bismuth, *Thin Solid Films*, 48, 1978, 345-351.
40. Saleh M., Buxo J., Dorville G., Sarabayrouse G., Electrical and elastoresistance properties of evaporated thin films of bismuth, *Revue de Physique Applique*, 14, 1979, 405-413.
41. Asahi H., Kinbara A., Size effect in electrical properties of thin epitaxial bismuth films, *Thin Solid Films*, 66, 1980, 131-137.
42. Boxus J., Uher C., Heremans J., Issi J -P., Size dependence of the transport properties of trigonal bismuth, *Phys. Rev. B.*, 23, 1981, 449-452
43. Akhtar S.M., Khawaja E.E., A study of the resistivity and the thermoelectric power of thin films of Sb and Bi, *Phys. Stat. Sol. A.*, 87, 1985, 335-340.
44. Damodara Das V., Soundararajan N., Size and temperature effects on the Seebeck coefficient of thin bismuth films, *Phys. Rev. B.*, 35(12), 1987, 5990-5996.
45. Chu H.T., Zhang W., Quantum size effect and electric conductivity in thin films of pure bismuth, *J. Phys. Chem. Solids*, 53, 1992, 1059.
46. Rogacheva E.I., Grigorov S.N., Nashchekina O.N., Lyubchenko S.G., Dresselhaus M.S., Quantum-size effects in n-type bismuth thin films, *Appl. Phys. Let.*, 82(15), 2003, 2628-2630.
47. Rogacheva E.I., Lyubchenko S.G., Nashchekina O.N., Meriuts A.V., Dresselhaus M.S., Quantum size effects and transport phenomena in thin Bi layers, *Microelectronics Journal*, 40, 2009, 728-730.
48. Rogacheva E.I., Lyubchenko S.G., Drozdova A.A., Effect of magnetic field on galvanomagnetic properties of mica/Bi/EuS heterostructures, *Microelectronics Journal*, 40, 2009, 821-823
49. Mustafaev Z., Fraiman B.S., Chudnovskiy A.F., Thermal conductivity of thin layers of bismuth,

- Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 5(1), 1971, 242-246 (in Russian)
50. Okun I.Z., Fraiman B.S., Chudnovskiy A.F., Magnetoresistance of thin bismuth layers, Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 6(4), 1972, 715-717 (in Russian)
 51. Burchakova V.I., Gitsu D.V., Kozlovskiy M.I., Features of Thermoelectric Power of Bismuth Thin Films, Fizika tverdovo tela, 14(3), 1972, 907-909 (in Russian).
 52. Fuchs K., The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals Proc. Cambridge Philos. Soc., 34, 1938, 100-108.
 53. Sondheimer E.H., The mean free path of electrons in metals, Adv. Phys., 1(1), 1952, 1-42.
 54. Savchenko A.K., Lutskiy V.N., Rilik A.S., About the influence of quantum corrections on the resistance of thin bismuth films, Sov. Phys. JETP Lett., 34(6), 1981, 367-371.
 55. Buhsthab E.I., Komnik Yu.F., Butenko A.V. Andrievskiy V.V., Features of the magnetoresistance of thin bismuth films in the region of manifestation of quantum corrections, Sov. J. Low Temp. Phys., 8(4), 1982, 440-445.
 56. Komnik Yu.F., Buhsthab E.I., Butenko A.V. Andrievskiy V.V., Localization effects in bismuth films in a weak magnetic field, Sov. J. Low Temp. Phys., 8(12), 1982, 1289-1292.
 57. Komnik Yu.F., Bukhshtab E.I., Butenko A.V., Andrievskiy V.V., Separation of the electron localization and interaction in bismuth film resistance, Solid State Commun., 44(6), 1982, 865-867.
 58. Fumio Komori, Shun-inhi Kobayashi, Wataru Sasaki, The Anti-Localization Effect in Bi Thin Films, J. Phys. Soc. Japan, 52(2), 1983, 368-371.
 59. Woerlee P.H., Verkade G.C., Jansen G.M., An experimental investigation on weak localisation, spin-orbit and interaction effects in thin bismuth films, J. Phys. C: Solid State Phys., 16, 1983, 3011-3024.
 60. McLachlan D.S., Weak-localization, spin-orbit, and electron-electron interaction effects in two- and three-dimensional bismuth films, Phys. Rev. B., 28(12), 1983, 6821-6832.
 61. Favennec M.M.E., Le Contellec M., Le Traon J.Y., Study of quantum size effects by elastoresistance, thermoelectric power and conductivity measurements in Bi and $Bi_{1-x}Sb_x$, Thin Solid Films, 13(1), 1972, 73-79.
 62. Favennec M.P., Le Contellec M., Quantum size effects in the thermoelectric power of Bi and $Bi_{1-x}Sb_x$ thin films, Solid State Commun. 13(2), 1973, 141-146.
 63. Komnik Yu. F., Bukhshtab E. I., Nikitin Yu. V. Quantum size effect in bismuth films with antimony adding, Sov. J. Low Temp. Phys., 1, 1975, 243-246.
 64. Bukhshtab E. I., Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V. Electrical properties of thin bismuth-antimony films. I. Changes in the properties with varying composition, Sov. J. Low Temp. Phys., 4(8), 1978, 474 - 479.
 65. Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V., Bukhshtab E. I. Electrical properties of thin bismuth-antimony films. II. Changes in the properties with varying thickness, Sov. J. Low Temp. Phys., 4(9), 1978, 538 - 544.
 66. Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V., Bukhshtab E. I. Electrical properties of thin bismuth-antimony

- films. III. Quantum size effect, *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(10), 1978, 591 – 595.
67. Nikitin Yu. V., Bukhshtab E. I., Komnik Yu. F. Electrical properties of thin bismuth-antimony films. IV. Temperature dependence, *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(11), 1978. 679 – 684.
68. Komnik Yu. F., Bukhshtab E. I., Nikitin Yu. V. Specific features of the galvanomagnetic properties of thin films of $Bi_{1-x}Sb_x$ in the semimetal and semiconductor regions, *Thin Solid Films.*, 52, 1978, 361 – 364.
69. Damodara Das V., Meena N., Electrical properties of $Bi_{80}Sb_{20}$ alloy thin films, vacuum-deposited at different substrate temperatures, *J. Mater. Science*, 16(12), 1981, 3489–3495.
70. Tang M.Y., Dresselhaus M.S., A band structure phase diagram calculation of 2D BiSb films, *Materials research society symposium proceedings*, 886, 2006, 129134.
71. Mallik R.C., Damodara Das V. Study of structural-, and thickness-dependent thermoelectric and electrical properties of $Bi_{93}Sb_7$ alloy thin films, *J. Appl. Phys.* 98, 2005, 0237101-0237108.
72. Mallik R.C., Damodara Das V. Size- and temperature-dependent thermoelectric and electrical properties of $Bi_{88}Sb_{12}$ alloy thin films, *Vacuum*, 77(3), 2005, 275-285.
73. Rogacheva E.I., Orlova D.S., Dresselhaus M.S., Tang S. Size Effects in Bi-Sb Solid Solutions Thin Films, *MRS Online Proceedings Library*, 1314, 2011, 1-6.
74. Rogacheva E.I., Orlova D.S., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Tang S. Thickness dependence oscillations of transport properties in thin films of topological insulator $Bi_{91}Sb_9$, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 2012, 023108(1-4).
75. Michenaud J-P., Issi J-P., Electron and hole transport in bismuth, *J. Phys. C:Solid State Phys.*, 5, 1972, 3061-3072.
76. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Tavrina T.V., Us M.A., Dresselhaus M.S., Cronin S.B., Rabin O., Quantum size effects in IV-VI quantum wells, *Physica E*, 17, 2003, 313-315.
77. Rogacheva E.I., Budnik A.V., Sipatov A.Yu., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Thickness dependent quantum oscillations of transport properties in topological insulator Bi_2Te_3 thin films, *Appl. Phys. Lett.* 106, 2015, 053103.

Надійшла до редакції 21.09.2020

Рогачева Е.І., *докт. физ.-мат. наук, професор*

Новак К.В., Орлова Д.С.

Нащекіна О.М., *канд. физ.-мат. наук, доцент*

Сипатов А.Ю., *докт. физ.-мат. наук, професор*

Лисачук Г.В., *докт. техн. наук, професор*

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина

РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$

При комнатной температуре получены зависимости термоэлектрических свойств (коэффициента Зеебека S , электропроводности σ , коэффициента Холла R_H и термоэлектрической мощности $P=S^2\sigma$) от толщины ($d = 5 - 250$ нм) тонких пленок твердых растворов $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$, выращенных на подложках из слюды методом термического испарения в вакууме из одного источника. Показано, что монотонная составляющая зависимости $\sigma(d)$ хорошо описывается в рамках теории Фукса-Зондгеймера для классического размерного эффекта. Обнаруженная осциллирующая составляющая d -зависимостей σ , S , R_H и $S^2\sigma$ связывается с проявлением квантового размерного эффекта, и определенный экспериментально период квантовых осцилляций $\Delta d = 45 \pm 5$ нм хорошо согласуется со значением Δd , теоретически рассчитанным в рамках модели бесконечно глубокой потенциальной ямы. Библ. 77, рис. 1.

Ключевые слова: $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$, твердый раствор, тонкая пленка, толщина, термоэлектрические свойства, размерный эффект, период осцилляций.

E.I. Rogacheva, *doc. phys. - math. Sciences, Professor*

K.V. Novak, D.S. Orlova,

O.N. Nashchekina, *cand. phys. - math. Sciences, Assistant Professor*

A.Yu. Sipatov, *doc. phys. - math. Sciences, Professor*

G.V. Lisachuk, *doc. techn. Sciences, Professor*

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
2 Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

SIZE EFFECTS AND THERMOELECTRIC PROPERTIES OF $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ THIN FILMS

The room-temperature dependences of thermoelectric properties (the Seebeck coefficient S , electrical conductivity σ , Hall coefficient R_H , and thermoelectric power factor $P = S^2\sigma$) on the thickness ($d = 5 - 250$ nm) of the $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ solid solution thin films grown on mica substrates by thermal evaporation in vacuum from a single source were obtained. It is shown that the monotonic component of the $\sigma(d)$ dependence is well described within the framework of the Fuchs-Sondheimer theory for the classical size effect. The presence of an oscillating component in the d -dependences of σ , S , R_H and $S^2\sigma$ is attributed to the manifestation of the quantum size effect, and the experimentally determined period of quantum oscillations $\Delta d = 45 \pm 5$ nm is in good agreement with the Δd value

calculated theoretically within the framework of the model of an infinitely deep potential well. *Bibl.* 77, Fig. 1.

Key words: $Bi_{0.98}Sb_{0.02}$ solid solution, thin film, thickness, thermoelectric properties, size effect, oscillation period.

References

1. Rowe D.M. (Ed.) (1995). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. London, New York, Washington: CRC Press, Boca Raton.
2. Anatychyk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiie ustroystva. Spravochnik. [Thermoelements and thermoelectric devices. Reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Brandt N.B., Chudinov S.M, Karavaev V.G. (1976). Study of a gapless state induced by a magnetic field in bismuth-antimony alloys. *Zh. Eksper. Teor. Fiz.* 70(6), 2296.
4. Brandt N.B., Chudinov S.M (1970). Oscillatory effects in semimetallic $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys under pressure. *Zh. Eksper. Teor. Fiz.*, 59(5), 1494-1507.
5. Oelgart G., Schneider G., Kraak W. (1976). The semiconductor-semimetal transition in $Bi_{1-x}Sb_x$ alloys. *Phys.Stat.Sol*, 74(b), 1976, 75-78.
6. Brandt N.B., Semenov M.V., Falkovsky L.A. (1977). Experiment and theory on the magnetic susceptibility of Bi-Sb alloys. *J. Low Temp. Phys.*, 27(1,2), 75-90.
7. Lenoir B., Cassart M., Michenaud J.-P. (1996). Transport properties of Bi-rich *Bi-Sb* alloys. *J. Phys. Chem. Solids*, 57(1), 89-99.
8. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. (2009). Transition into a gapless state and concentration anomalies in the properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions. *Appl. Phys. Lett.*, 94 (20), 202111.
9. Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Nashchekina O.N. (2010). Percolation effects in semimetallic Bi-Sb solid solutions. *Phys.Stat. sol*, 207(A), 344–347.
10. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Drozdova A.A., Nashchekina O.N., Men'shov Yu.V. (2020). Galvanomagnetic properties of polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration range $x = 0-0.25$. *Functional Materials*, 27(3), 488-496.
11. Rogacheva E.I. and Drozdova A.A. (2006). Thermoelectric properties of polycrystalline Bismuth-Antimony Solid Solutions. *J. Thermoelectricity*, 2, 22-28.
12. Doroshenko A.N., Rogacheva E.I., Drozdova A.A., Martynova K.V., Men'shov Yu.V.(2016). Thermoelectric properties of the polycrystalline $Bi_{1-x}Sb_x$ solid solutions in the concentration interval $x = 0 - 0.25$. *J. Thermoelectricity*, 4, 23-36.
13. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Orlova D.S., Doroshenko A.N., Dresselhaus M.S. (2017). Influence of composition on the thermoelectric properties of $Bi_{1-x}Sb_x$ thin films. *J. Electronic Mater.* 46(7), 3821-3825.
14. Rogacheva E.I., Doroshenko A.N., Sipatov A.Yu. (2020). Electronic phase transitions in thin $Bi_{1-x}Sb_x$ films. *J. Thermoelectricity*, 2, 12-24.

15. Fu L., Kane C.L., Mele E.J. (2007). *Phys. Rev. Lett.*, 98, 106803.
16. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S, Cava R.J., Hasan M.Z. (2008). *Nature*, 452, 970.
17. Hasan M.Z. Kane C.L. (2010). *Rev. Mod. Phys.*, 82, 3045.
18. Dresselhaus M.S., Yu-Ming Lin, Koga T., Cronin S.B., Rabin O., Black M.R., Dresselhaus G. (2001). In *Semiconductors and Semimetals, Recent Trends in Thermoelectric Materials Research III*, USA, San Diego, CA, Academic Press, 2001, 1–121.
19. Komnik Yu.F. (1979). *Fizika metalicheskikh plionok [Physics of metal films]*. Moscow: Atomizdat [In Russian].
20. Ogrin Y.F., Lutsky V.N., Yelinson M.I. (1966). Observation of quantum size effects in thin bismuth films. *Sov. Phys. JETP Lett.*, 3, 71-73.
21. Sandomirskii V.B. (1967). *Quantum size effect in semimetal films*. Soviet Phys. JETP, 25(1), 101-106.
22. Duggal P., Rup R., Tripathi P. (1966). Quantum size effect in thin bismuth films. *Appl. Phys. Lett.*, 9(8), 293-295.
23. Komnik Yu.F., Buchshtab E.I. (1968). Observation of the quantum and classical size effects in polycrystalline thin bismuth films. *Soviet Physics JETP*, 54, 34-37.
24. Traon J.J.Y.le, Combet H.A. (1969). Electrical conductivity and Hall effect in thin layers of bismuth between 4,2K and 300K. *J. Phys.*, 30, 419-426.
25. Thornburg D.D., Wayman C.M. (1969). Quantum and classical size effects in the thermoelectric power of thin bismuth films. *Philos. Magaz.*, 20(167), 1153-1161.
26. Lal A., Duggal V.P. (1970). Thermoelectric power of thin single crystal bismuth films. *Philos. Magaz.*, 22(175), 189-191.
27. Hoffman R.A., Frankl D.R. (1971). Electrical transport properties of thin bismuth films. *Phys. Rev. B.*, 3(6), 1825-1833.
28. Komnik Yu.F., Andrievskii V.V., Buhsthab E.I. (1970). Features of the magnetoresistance of thin bismuth films. *Physics of the Solid State*, 12(11), 3266 – 3269.
29. Petrosyan V.I., Molin V.N., Dagman E.I., Tavger B.A., Skripkina P.A., Aleksandrov L.N. (1971). Features of quantum size effects in thin non-textured polycrystalline bismuth films obtained by the electric flash method. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, 32, 725 – 730 [in Russian].
30. Garcia N., Kao Y.H., Strongin M. (1972). Galvanomagnetic studies of bismuth films in the quantum-size-effect region. *Phys. Rev. B.*, 5(6), 2029-2039.
31. Subotowicz M., Jaloehowski M., Mikolajczak B, Mikolajczak P. (1973). Measurements of the physical properties of thin Bi films from 180 to 40000 AA. *Phys. Stat. Sol. A.*, 17(1), 79-87.
32. Abrasimov V.M., Yegorov B.N., Krykin M.A. (1973). Size effect of kinetic coefficients in polycrystalline bismuth films. *Sov. Phys. JETP*, 37(1), 113-116.
33. Inoue M., Yagi H., Tamaki Y. (1973). Anomalies in the Hall coefficient of bismuth films. *Japan. J. Appl. Phys.*, 12, 310.

34. Mikolajczak P., Piasek W., Subotowicz M. (1974). Thermoelectric power in bismuth thin films. *Phys. Stat. Sol. A.*, 25(2), 619-628.
35. Borzyak P.G., Vatamanyuk V.I., Kulyupin Yu.A. (1974). Peculiarities of the thickness dependences of the bismuth films structure and resistivity. *Phys. Stat. Sol. A.*, 22, 3-6.
36. Baba S., Sugawara H., Kinbara A. (1976). Electrical resistivity of thin bismuth films. *Thin Solid Films*, 31, 329-335.
37. Bondar E. A., Vatamanyuk V.I., Chumak A.A. (1976). Thickness dependence of the current carrier concentration in bismuth films. *Thin Solid Films*, 34, 387-389.
38. Komnik Yu.F., Andrievsky V.V. (1977). Kinetic properties of electrons in bismuth thin films. *Thin Solid Films*, 42, 1-6.
39. Kochowski S., Opilski A. (1978). Concentration and mobility of charge carriers in thin polycrystalline films of bismuth. *Thin Solid Films*, 48, 345-351.
40. Saleh M., Buxo J., Dorville G., Sarrabayrouse G. (1979). Electrical and elastoresistance properties of evaporated thin films of bismuth. *Revue de Physique Applique*, 14, 405-413.
41. Asahi H., Kinbara A. (1980). Size effect in electrical properties of thin epitaxial bismuth films. *Thin Solid Films*, 66, 131-137.
42. Boxus J., Uher C., Heremans J., Issi J -P. (1981). Size dependence of the transport properties of trigonal bismuth. *Phys. Rev. B.*, 23, 449-452.
43. Akhtar S.M., Khawaja E.E. (1985). A study of the resistivity and the thermoelectric power of thin films of Sb and Bi. *Phys. Stat. Sol. A.*, 87, 335-340.
44. Damodara Das V., Soundararajan N. (1987). Size and temperature effects on the Seebeck coefficient of thin bismuth films. *Phys. Rev. B.*, 35(12), 5990-5996.
45. Chu H.T., Zhang W. (1992). Quantum size effect and electric conductivity in thin films of pure bismuth. *J. Phys. Chem. Solids*, 53, 1059.
46. Rogacheva E.I., Grigorov S.N., Nashchekina O.N., Lyubchenko S.G., Dresselhaus M.S. (2003). Quantum-size effects in n-type bismuth thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 82(15), 2628-2630.
47. Rogacheva E.I., Lyubchenko S.G., Nashchekina O.N., Meriuts A.V., Dresselhaus M.S. (2009). Quantum size effects and transport phenomena in thin Bi layers. *Microelectronics Journal*, 40, 728-730.
48. Rogacheva E.I., Lyubchenko S.G., Drozdova A.A. (2009). Effect of magnetic field on galvanomagnetic properties of mica/Bi/EuS heterostructures. *Microelectronics Journal*, 40, 821-823.
49. Mustafaev Z., Fraiman B.S., Chudnovskiy A.F. (1971). Thermal conductivity of thin layers of bismuth. *Semiconductors*, 5(1), 242-246 [in Russian].
50. Okun I.Z., Fraiman B.S., Chudnovskiy A.F. (1972). Magnetoresistance of thin bismuth layers. *Semiconductors*, 6(4), 715-717 [in Russian].
51. Burchakova V.I., Gitsu D.V., Kozlovskiy M.I. (1972). Features of thermoelectric power of bismuth thin films. *Physics of the Solid State*, 14(3), 1972, 907-909 [in Russian].

52. Fuchs K. (1938). The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 34, 100-108.
53. Sondheimer E.H. (1952). The mean free path of electrons in metals. *Adv. Phys.*, 1(1), 1-42.
54. Savchenko A.K., Lutskiy V.N., Rilik A.S. (1981). About the influence of quantum corrections on the resistance of thin bismuth films. *Sov. Phys. JETP Lett.*, 34(6), 367-371.
55. Buhstap E.I., Komnik Yu.F., Butenko A.V. Andrievskiy V.V. (1982). Features of the magnetoresistance of thin bismuth films in the region of manifestation of quantum corrections. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 8(4), 440-445.
56. Komnik Yu.F., Buhstap E.I., Butenko A.V. Andrievskiy V.V. (1982). Localization effects in bismuth films in a weak magnetic field. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 8(12), 1289-1292.
57. Komnik Yu.F., Bukhshtap E.I., Butenko A.V., Andrievskiy V.V. (1982). Separation of the electron localization and interaction in bismuth film resistance. *Solid State Communs.*, 44(6), 865-867.
58. Fumio Komori, Shun-inhi Kobayashi, Wataru Sasaki (1983). The anti-localization effect in Bi thin films. *J. Phys. Soc. Japan*, 52(2), 368-371.
59. Woerlee P.H., Verkade G.C., Jansen G.M. (1983). An experimental investigation on weak localisation, spin-orbit and interaction effects in thin bismuth films. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 16, 3011-3024.
60. McLachlan D.S. (1983). Weak-localization, spin-orbit, and electron-electron interaction effects in two- and three-dimensional bismuth films. *Phys. Rev. B.*, 28(12), 6821-6832.
61. Favennec M.M.E., Le Contellec M., Le Traon J.Y. (1972). Study of quantum size effects by elastoresistance, thermoelectric power and conductivity measurements in Bi and Bi_xSb_{1-x} . *Thin Solid Films*, 13(1), 73-79.
62. Favennec M.P., Le Contellec M. (1973). Quantum size effects in the thermoelectric power of Bi and Bi_xSb_{1-x} thin films. *Solid State Communs.*, 13(2), 141-146.
63. Komnik Yu. F., Bukhshtap E. I., Nikitin Yu. V. (1975). Quantum size effect in bismuth films with antimony adding. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 1, 243-246.
64. Bukhshtap E. I., Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V. (1978). Electrical properties of thin bismuth-antimony films. I. Changes in the properties with varying composition. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(8), 474 - 479.
65. Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V., Bukhshtap E. I. (1978). Electrical properties of thin bismuth-antimony films. II. Changes in the properties with varying thickness. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(9), 538 - 544.
66. Komnik Yu. F., Nikitin Yu. V., Bukhshtap E. I. (1978). Electrical properties of thin bismuth-antimony films. III. Quantum size effect. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(10), 591 - 595.
67. Nikitin Yu. V., Bukhshtap E. I., Komnik Yu. F. Electrical properties of thin bismuth-antimony films. IV. Temperature dependence, *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 4(11), 1978. 679 - 684.

68. Komnik Yu. F., Bukhshtab E. I., Nikitin Yu. V. (1978). Specific features of the galvanomagnetic properties of thin films of $Bi_{1-x}Sb_x$ in the semimetal and semiconductor regions. *Thin Solid Films.*, 52, 361 – 364.
69. Damodara Das V., Meena N. (1981). Electrical properties of $Bi_{80}Sb_{20}$ alloy thin films, vacuum-deposited at different substrate temperatures. *J. Mater. Science*, 16(12), 3489–3495.
70. Tang M.Y., Dresselhaus M.S., A band structure phase diagram calculation of 2D BiSb films, Materials research society symposium proceedings, 886, 2006, 129134.
71. Mallik R.C., Damodara Das V. (2005). Study of structural-, and thickness-dependent thermoelectric and electrical properties of $Bi_{93}Sb_7$ alloy thin films. *J. Appl. Phys.* 98, 0237101-0237108.
72. Mallik R.C., Damodara Das V. (2005). Size- and temperature-dependent thermoelectric and electrical properties of $Bi_{88}Sb_{12}$ alloy thin films. *Vacuum*, 77(3), 275-285.
73. Rogacheva E.I., Orlova D.S., Dresselhaus M.S., Tang S. (2011). Size effects in Bi-Sb solid solutions thin films. *MRS Online Proceedings Library*, 1314, 1-6.
74. Rogacheva E.I., Orlova D.S., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S., Tang S. (2012). Thickness dependence oscillations of transport properties in thin films of atotopological insulator $Bi_{91}Sb_9$. *Appl. Phys. Lett.*, 101, 023108(1-4).
75. Michenaud J-P., Issi J-P. (1972). Electron and hole transport in bismuth. *J. Phys. C:Solid State Phys.*, 5, 3061-3072.
76. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Tavrina T.V., Us M.A., Dresselhaus M.S., Cronin S.B., Rabin O. (2003). Quantum size effects in IV-VI quantum wells. *Physica E*, 17, 313-315.
77. Rogacheva E.I., Budnik A.V., Sipatov A.Yu., Nashchekina O.N., Dresselhaus M.S.(2015). Thickness dependent quantum oscillations of transport properties in topological insulator Bi_2Te_3 thin films. *Appl. Phys. Lett.* 106, 053103.

Submitted 21.09.2020

УДК 53.082

Рибчаков Д.Є.



Рибчаков Д.Є.

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

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
ЕКСТРУЗІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО
МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ *Bi-Te*
ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ**

Процес гарячої екструзії являє собою проходження розігрітого до температури нижче температури плавлення термоелектричного матеріалу через прес-форму (філь'єру) під дією тиску. В даній роботі проведено моделювання цього процесу з використанням пакету прикладних програм об'єктно-орієнтованого моделювання Comsol Multiphysics. В даній моделі екструдований матеріал представляється як рідина з дуже високою в'язкістю, яка залежить від швидкості та температури. В результаті моделювання було отримано розподіли температури й швидкості течії матеріалу в матриці, а також розподіл напруг у матриці за рахунок зовнішнього тиску і теплових навантажень в процесі стрічкової екструзії. Дані дослідження дають змогу оптимізувати установку для одержання екструдованого термоелектричного матеріалу. Бібл. 4. рис. 6, табл. 2.

Ключові слова: термоелектричний матеріал, гаряча екструзія, комп'ютерне моделювання, філь'єра.

Вступ

Існують різні методи отримання термоелектричних матеріалів, які являють собою тверді розчини на основі телуриду вісмуту. Дані матеріали мають ряд специфічних особливостей, які ускладнюють отримання матеріалів високої якості. Серед існуючих методів отримання термоелектричних матеріалів найбільш розповсюдженим є метод зонної плавки, переважно вертикальної [1].

Другим методом отримання термоелектричних матеріалів – є метод гарячої екструзії, який являє собою проходження розігрітого до температури нижче температури плавлення термоелектричного матеріалу через прес-форму (філь'єру) під дією тиску [2]. Даний метод має наступні переваги:

- Висока ступінь однорідності отриманих зразків.
- Можливість отримання зразків необхідної форми, що дозволяє зменшити втрати матеріалу при подальшому розрізанні.

- Більш висока механічна міцність зразків в порівнянні з зразками отриманими шляхом зонної плавки.

Проте метод гарячої екструзії також має і недоліки, основним з яких є те, що текстура в екструдованих матеріалах виражена гірше ніж в матеріалах отриманих методом зонної плавки, але добротність екструдованого матеріалу досягається не лише текстурою, а й за рахунок розсіювання фононів на границях зерен[3].

Сумуючи переваги та недоліки методу гарячої екструзії можна зробити висновки, що матеріали отримані даним шляхом мають високий споживчий потенціал. Таким чином основним завданням при дослідженні гарячої екструзії є поліпшення вихідних зразків. Це досягається при оптимізації геометрії філь'єр та експериментуючи з вхідними умовами виконання процесу до прикладу температури, тиску та багато іншого. Проте такі експерименти несуть в собі великі фінансові та трудові затрати, які в результаті можуть бути зовсім не виправданими. Для зниження цих витрат та формулювання теоретичної частини даної технології, досить актуальним методом є комп'ютерне моделювання. Цей метод дозволяє виявити критичні недоліки впливу умов на отримані зразки. Звісно він не здатен з 100 % достовірністю відтворити реальні умови гарячої екструзії, проте навіть існуюча не ідеальна достовірність дозволяє зменшити витрати в декілька раз.

Метою цієї роботи є створення комп'ютерної моделі процесу гарячої екструзії термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту, для дослідження розподілу температури та швидкості формування екструдованого матеріалу у вигляді стрічок, які можуть бути основою для оптимізації робочого обладнання для гарячої екструзії.

Фізична, математична та комп'ютерна моделі

Для виконання поставленої задачі використано пакет прикладних програм об'єктно-орієнтованого моделювання Comsol Multiphysics [4]. В даній моделі термоелектричний матеріал розглядається, як рідина з високою в'язкістю, яка залежить від швидкості та температури. Комп'ютерна модель дозволяє дослідити розподіл механічних напружень в матриці за рахунок зовнішнього тиску та навантажень.

Використана фізична модель процесу екструзії стрічкового матеріалу представлена на рис. 1. У моделі розглянуто випадок екструзії циліндричної заготовки матеріалу 1 через матрицю 2 на виході, якої формується стрічка термоелектричного матеріалу. Геометричні розміри: A та B – діаметр та довжина вхідної комірки матриці в якій розміщено заготовку термоелектричного матеріалу; C – довжина скошеної частини матриці; D та F – товщина та довжина вихідного отвору матриці, ширина якого рівна A . Розглядається випадок коли відношення довжини до товщини вихідного отвору лежить в межах 2 – 10.

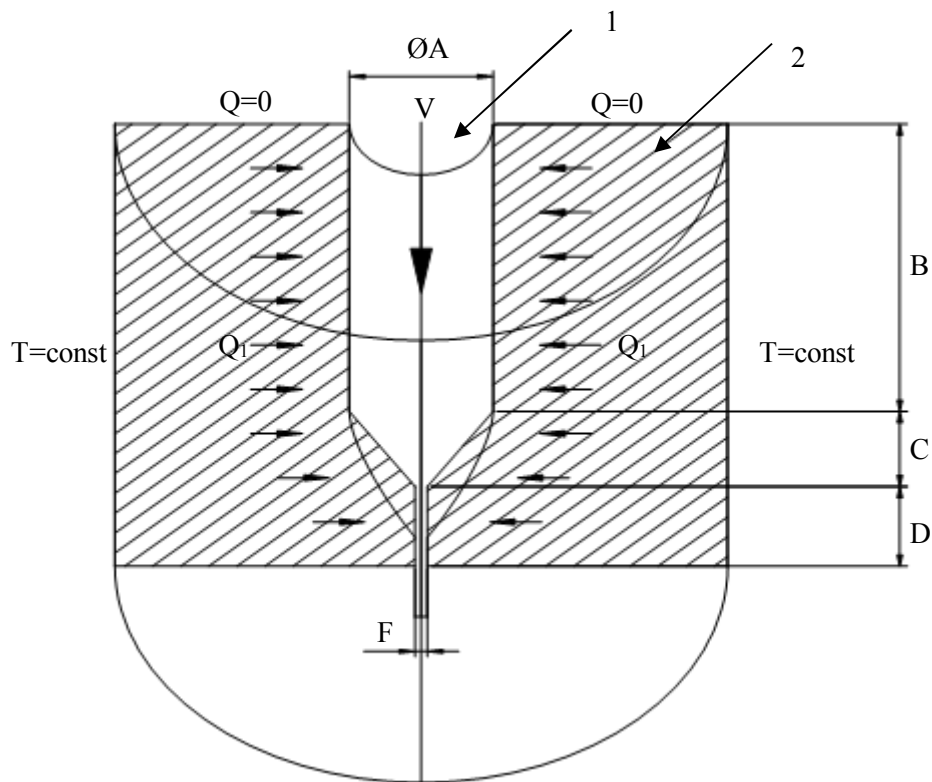


Рис. 1. Фізична модель процесу екструзії стрічкового термоелектричного матеріалу.

При моделюванні також потрібно врахувати велику кількість параметрів робочого середовища, деякі з яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови середовища моделі

1.	Температура оточуючого середовища	25°C
2.	Температура матриці(T=const)	450°C
3.	Коефіцієнт теплообміну між матеріалом та матрицею	11000 Вт/(м ² *К)
4.	Швидкість руху поршня, який пресує матеріал(V)	0.03 мм/с

Властивості термоелектричного матеріалу та матеріалу з якого виготовлена матриця наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Властивості матеріалів

1.	Термоелектричний матеріал	Теплопровідність, Вт/(м*К)	4
		Густина, кг/м ³	7600
		Теплоємність, Дж/(кг/К)	150
2.	Сталь(матриця)	Теплопровідність, Вт/(м*К)	24.3
		Густина, кг/м ³	7850
		Теплоємність, Дж/(кг/К)	500

На рис. 2. наведена сітка досліджуваної моделі в Comsol Multiphysics.

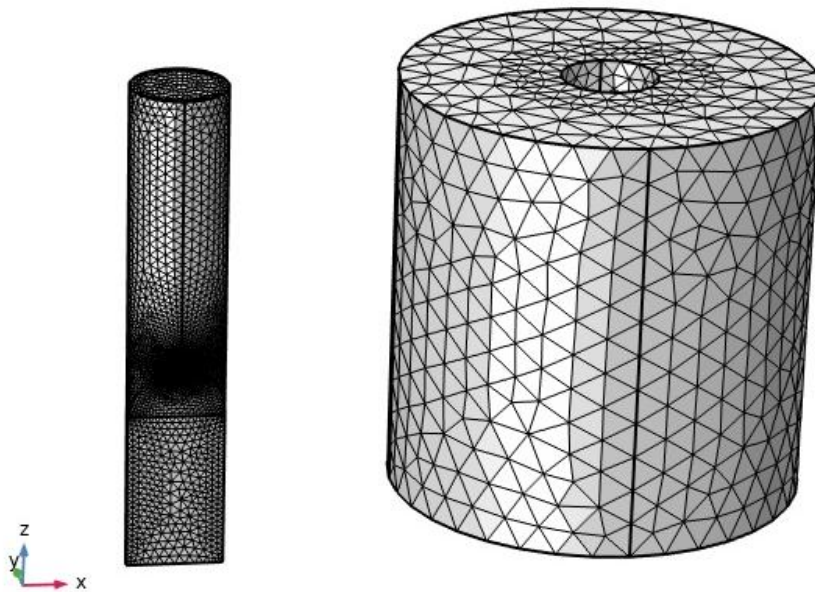


Рис. 2. Сітка побудована для конфігурацій матриці, наведених на рис.1.

Результати комп'ютерного моделювання

В результаті комп'ютерного моделювання були отримані наступні показники:

Поле швидкостей термоелектричного матеріалу всередині матриці наведено на рис. 3. та рис. 4.

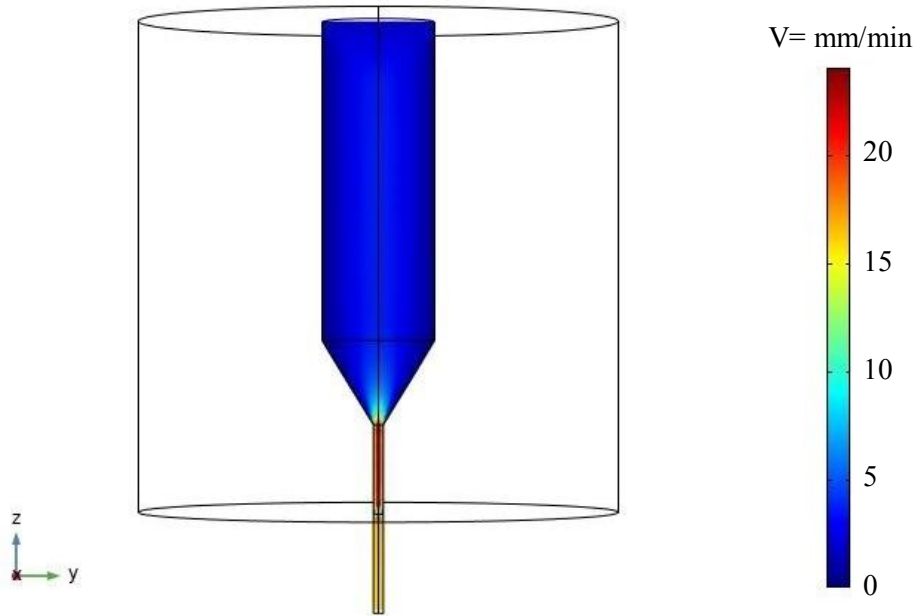


Рис. 3. Поле швидкостей термоелектричного матеріалу.

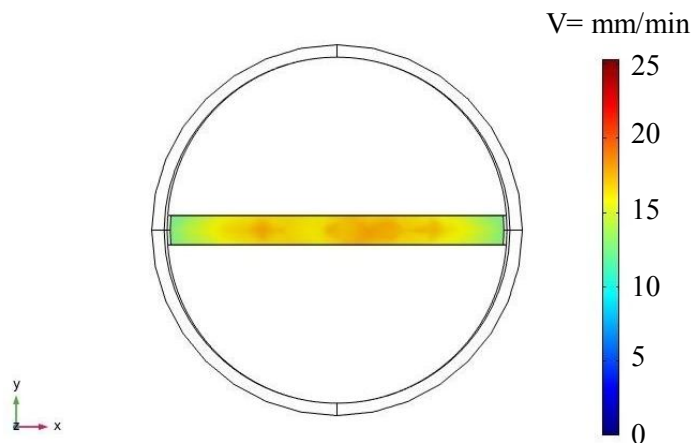


Рис. 4. Поле швидкостей термоелектричного матеріалу на виході.

Розподіли температур у термоелектричному матеріалі та матриці наведено на рис. 5. та рис. 6.

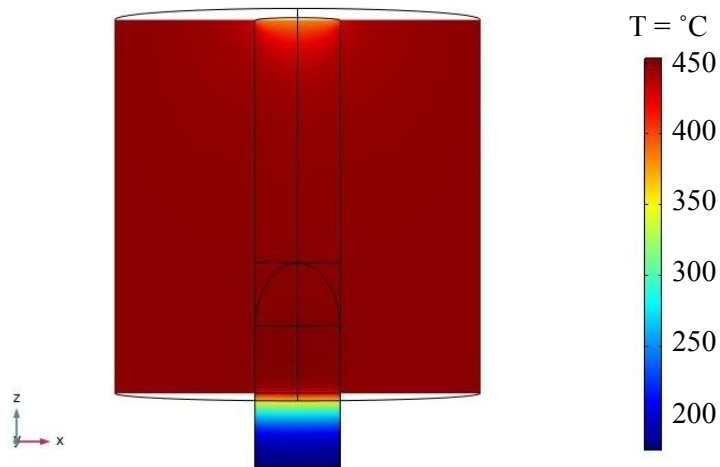


Рис. 5. Розподіли температур.

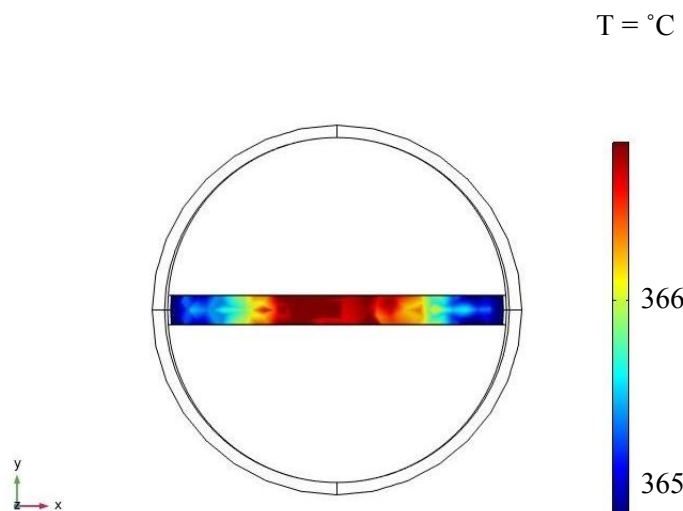


Рис. 6. Розподіли температур на виході.

Розроблена комп'ютерна модель може служити основою для оптимізації установки для екструзії термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту з метою підвищення ефективності її роботи, а також для покращення вихідного продукту.

Висновки

1. Створено комп'ютерну модель процесу гарячої стрічкової екструзії термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту, яка може бути використана для дослідження розподілів температури й швидкості руху матеріалу в матриці заданої форми, а також розподілу напруг у матриці за рахунок зовнішнього тиску й теплових навантажень.

2. Вивчено поведінка термоелектричного матеріалу при проходженні його через матрицю для випадку стрічкової екструзії термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту.
3. Отримані розподіли температури й поля швидкостей залежно від конфігурації матриці для випадку одноступінчастої стрічкової екструзії термоелектричного матеріалу на основі телуриду вісмуту.

Література

1. Гольцман Б. М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3) / Б. М. Гольцман, В. А. Кудинов, И. А. Смирнов. – Москва: Наука, 1972. – 320 с.
2. Сабо Е. П. Технология халькогенидных термоэлементов. Физические основы / Е. П. Сабо // Термоэлектричество. – 2006. – № 1. – С. 45 — 66.
3. Горський П. В. Про принципову відмінність термоелектричних композитів від легованих термоелектричних матеріалів та наслідки з неї / П. В. Горський. // Термоелектрика. – 2020. – №1. – С. 27–37.
4. Fluid-Structure Interaction in Aluminum Extrusion // Structural Mechanics Module Model Library. – COMSOL AB, 2008. – p. 301-316.

Автор виражає подяку академіку НАНУ Анатичуку Л.І. за надану тему досліджень, а також ст.н.с. Лисько В.В. та ст.н.с. Разінькова В.В. за допомогу в проведенні досліджень.

Надійшла до редакції 10.09.2020

Рыбчаков Д.Э.

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

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА
ОСНОВЕ *Bi-Te***

Процесс горячей экструзии представляет собой прохождение разогретого до температуры ниже температуры плавления термоэлектрического материала через пресс-форму (фильеру) под действием давления. В данной работе проведено моделирование этого

процесса с использованием пакета прикладных программ объектно-ориентированного моделирования Comsol Multiphysics. В данной модели экструдированный материал представляется как жидкость с очень высокой вязкостью, которая зависит от скорости и температуры. В результате моделирования было получено распределения температуры и скорости течения материала в матрице, а также распределение напряжений в матрице за счет внешнего давления и тепловых нагрузок в процессе ленточной экструзии. Данные исследования позволяют оптимизировать установку для получения экструдированного термоэлектрического материала. Библиограф. 4, рис. 6, табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический материал, горячая экструзия, компьютерное моделирование, фильеры.

D.E. Rybchakov

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatyck@gmail.com

COMPUTER SIMULATION OF THE EXTRUSION PROCESS OF RECTANGULAR FORM THERMOELECTRIC MATERIAL ON THE BASIS OF *Bi-Te*

The process of hot extrusion is the passage of heated to a temperature below the melting point of the thermoelectric material through the mold (die) under the action of pressure. This work simulates this process using the Comsol Multiphysics object-oriented modeling application suite. In this model, the extruded material is presented as a liquid with a very high viscosity, which depends on the speed and temperature. As a result of modeling, the temperature and flow velocity distributions in the matrix were obtained, as well as the stress distribution in the matrix due to external pressure and thermal loads during the strip extrusion process. These studies make it possible to optimize the installation for the production of extruded thermoelectric material. Bibl. 4. Fig. 6, Table. 2.

Key words: thermoelectric material, hot extrusion, computer simulation, dies.

References

1. Goltsman B.M. Semiconductor thermoelectric materials based on bismuth telluride (Bi_2Te_3) / B.M. Goltsman, V.A. Kudinov, I.A Smirnov. - Moscow: Science. - 1972. - 320 p. (In Russian)

2. Sabo E.P. Tekhnology of chalcogenide thermoelements. Physical fundamentals / E.P. Sabo // J. Thermoelectricity. – 2006. – No. 1. – P. 45 - 66.
3. Gorskiy P.V About the principles of the development of thermoelectric composites in lightweight thermoelectric materials and inheritance from it / P.V. Gorskiy. // J. Thermoelectricity. – 2020. – No. 1. – P. 27-37.
4. Fluid-Structure Interaction in Aluminum Extrusion // Structural Mechanics Module Model Library. - COMSOL AB. - 2008. - p. 301-316.

Submitted 10.09.2020

УДК 537

Колобродов В.Г., докт. техн. наук, професор
Микитенко В.І., докт. техн. наук, доцент
Тимчик Г.С. докт. техн. наук, професор
Сокол Б.В.

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

ТЕМПЕРАТУРНЕ РОЗДІЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

Робота присвячена розробці методу визначення енергетичного (температурного) розділення поляризаційного тепловізора. Запропоновано використовувати для цього величину еквівалентної шуму різниці температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Розроблено фізико-математичну модель оптико-електронної системи поляризаційного тепловізора, яка дозволяє обраховувати її функцію передачі сигналу. На основі цієї функції розроблено методу обчислення NETD. Отримано формулу, що описує функціональну залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від куткової орієнтації поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини при заданому ступені поляризації. Виконано дослідження впливу ступеня поляризації випромінювання тест-об'єкта на температурне розділення поляризаційного тепловізора, який містить лінійний поляризатор і фазову пластину.

Ключові слова: поляризаційний тепловізор, енергетичне розділення, еквівалентна шуму різниця температур, ступень поляризації

Вступ

Поляризація є однією із чотирьох параметрів електромагнітного поля випромінювання, а три інші – це інтенсивність, довжина хвилі і когерентність [1, 2]. Поляриметрія вимірює векторний характер випромінювання і дозволяє отримати важливу інформацію про орієнтацію поверхні об'єкта, його форму і якість поверхні. Поляризаційні властивості випромінювання від об'єктів спостереження відрізняється від випромінювання фонів і не корельовані з їх інтенсивністю і спектром. Як правило, випромінювання від об'єкта є частково поляризоване, а від фону – природне [3, 4]. Таким чином поляриметричні зображення дуже корисні для збільшення сигналу від об'єкта і пригнічення фонових завад.

Основними характеристиками поляризованого випромінювання є інтенсивність, ступінь поляризації, еліптичність і кут поляризації [5, 6]. Для вимірювання цих характеристик в інфрачервоній (ІЧ) області спектру використовують поляризаційні

теповізори (ПТ) [7, 8]. Основними характеристиками любого тепловізора, який використовується для дослідження термоелектричних явищ та пристроїв є енергетичне (температурне), просторове і часове розділення, які залежать від коефіцієнта пропускання його оптичної системи, чутливості приймача випромінювання і характеристик електронної системи обробки відеосигналів [9 – 11]. Існує значна кількість стандартів, монографій і статей, присвячених моделюванню, розрахунку і вимірюванню температурного розділення тепловізорів, під яким будемо розуміти мінімальний радіаційний контраст між об'єктом і фоном, що може виявити тепловізор [12 – 14]. В той же час практично відсутня науково-технічна інформація стосовно методів розрахунку температурного розділення ПТ.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка і дослідження методу визначення температурного (енергетичного) розділення поляризаційного тепловізора.

Модель поляризаційного тепловізора

Поляризаційний тепловізор можна розглядати як лінійну систему, яка перетворює яскравість площини спостереження із ІЧ області спектру в яскравість зображення об'єкта і фону на екрані дисплея у видимій області спектру. Процес такого перетворення можна дослідити за допомогою узагальненої схеми системи «об'єкт спостереження – атмосфера – тепловізор – спостерігач» [12, 13].

Випромінювання (власне або відбите) від об'єкта спостереження і фону проходить через атмосферу і потрапляє в оптичну систему тепловізора, яка формує зображення об'єкта і фону в площині матричного приймача випромінювання (МПВ). Приймач випромінювання перетворює потік випромінювання, що формує зображення, в електричний відеосигнал, який після підсилення надходить до пристроїв аналогової та цифрової обробки. Після необхідних перетворювань відеосигнал надходить до дисплея, на екрані якого формується видимий аналог об'єкта та фону, що сприймаються спостерігачем.

Розглянемо оптико-електронну систему ПТ, яка складається із оптичної системи і МПВ (рис. 1). В свою чергу оптична система складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, четвертьхвильової пластини (quarter-wave retarder) і ІЧ об'єктива тепловізора.

Однією із важливих характеристик тепловізора є *функція передачі сигналу* (Signal Transfer Function – *SiTF*) $u_s(L_t)$ – це залежність електричного сигналу на виході електронного блоку тепловізора від яскравості об'єкта спостереження L_t . Для отримання функціональної залежності $u_s(L_t)$ розглянемо рис. 1. Нехай об'єкт спостереження має рівномірну за площею спектральну яскравість $L_t(\lambda)$ а його кутові розміри $\xi_{tx} \times \xi_{ty}$ значно перевищують миттєве поле зору тепловізора, що розміщений на відстані R від об'єкта

спостереження. Вважатимемо, що поверхня об'єкта і фону випромінює за законом Ламберта.

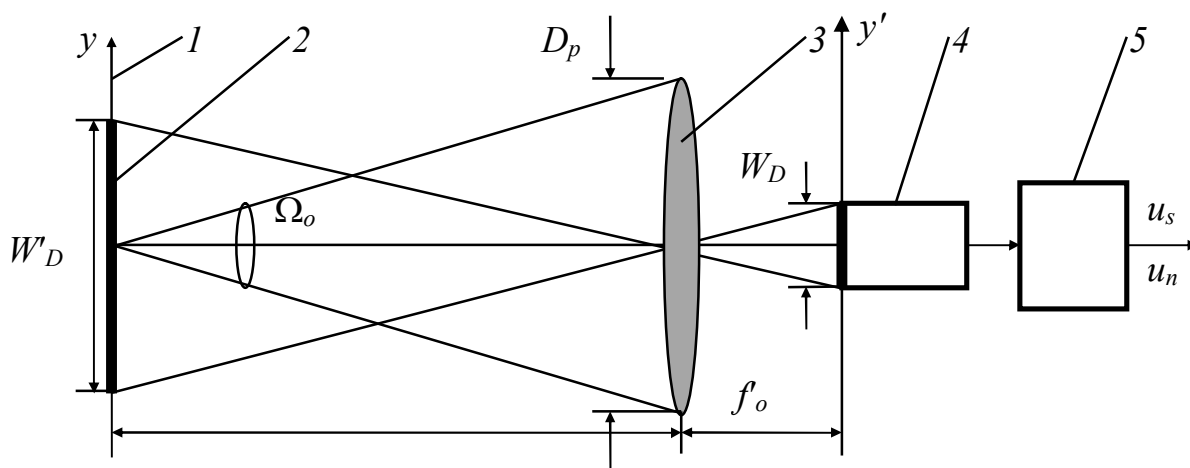


Рис. 1. До розрахунку функції передачі сигналу тепловізора:

1 – площина об'єкта випромінювання; 2 – миттєве лінійне поле зору;
3 – оптична система; 4 – МПВ; 5 – відео підсилювач

Тоді спектральна яскравість поверхні об'єкта визначають за формулою як

$$L_t(\lambda) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (1)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта; $M_\lambda(\lambda, T_t)$ – функція Планка.

Якщо нормаль до поверхні об'єкта розміщена під кутом φ до оптичної осі спостереження, то до входньої зіниці об'єктива надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \tau_A(\lambda, R) L_{\lambda t}(\lambda) \Omega_o A_t \cos \varphi, \quad (2)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; A_t – площа об'єкта, що перебуває у межах миттєвого поля зору тепловізора; $\Omega_o = A_p/R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до входньої зіниці об'єктива площею A_p .

Сигнал на виході МПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме

$$u_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_t \frac{A_p}{R^2} \cos \varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Під час вимірювання функції $SiTF$ вважають, що тест-об'єкт розміщений на невеликій відстані від тепловізора, тобто $\tau_A(\lambda) \approx 1$, а спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи у межах робочого спектрального діапазону має середнє значення τ_0 . Тоді функція $SiTF$ (3) тепловізора з урахуванням коефіцієнта підсилення електронного блока C_{EI} та співвідношень $A_p = \pi D_p^2/4$ і $A_t/R^2 = A_D/f_0'^2$ які впливають із рис. 1, матиме вигляд

$$u_s(L_t) = \frac{\pi}{4} C_{EI} A_D \left(\frac{D_p}{f_0'} \right)^2 \tau_0 \cos \varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_t(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Функція $u_s(L_t)$ має складний вигляд, який залежить, перш за все, від робочого спектрального діапазону та спектральної чутливості МПВ, що ускладнює вимірювання істинної яскравості об'єкта. Формула (4) не враховує спектральний склад електричного сигналу, який визначається системою зчитування. Крім того, на величину сигналу u_s впливає коефіцієнт підсилення C_{EI} та шуми системи.

Як видно із формул (1) – (4), величина тепловізійного сигналу $u_s(x', y')$ на виході МПВ залежить від абсолютної температури T_t поверхні об'єкта і її спектрального коефіцієнти випромінювання $\varepsilon_t(\lambda, T)$. Крім того, відеосигнал $u_s(x', y')$ залежить від коефіцієнта пропускання атмосфери $\tau_A(\lambda, R)$, характеристик оптичної системи D_p, f_0', τ_0 і МПВ $R_D(\lambda), \lambda_1 \dots \lambda_2, A_D$, а також від модуляційних передавальних функцій окремих елементів оптико-електронної системи тепловізора.

Визначення температурного розділення ПТ

В якості температурного розділення ПТ будемо використовувати класичний параметр, що називається еквівалентною шуму різницею температур (ЕШРТ) $NETD$ (Noise Equivalent Temperature Difference). Під параметром $NETD$ розуміють різницю температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють як абсолютно чорне тіло (АЧТ), за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра тепловізора, яка розглядає тест-об'єкт, до шуму дорівнює одиниці [15, 16]. Тест-об'єкт повинен мати кутові розміри, які у декілька разів перевищують кутовий розмір чутливої площадки пікселя МПВ $\alpha_D \times \beta_D$, щоб вилучити вплив просторового розділення на результати вимірювань.

Щоб отримати формули для розрахунку $NETD$ розглянемо функцію передачі сигналу тепловізора (4). Додатково зробимо низку припущень:

1. Тест-об'єкт розміщений на незначній відстані від тепловізора. Тоді можна вважати, що випромінювання мало поглинається під час проходження через атмосферу, тобто в робочому спектральному діапазоні $\tau_A(\lambda) \approx 1$.

- Електронна система тепловізора має ефективну шумову смугу пропускання Δf .
- Тест-об'єкт великих розмірів розміщений на рівномірному фоні і має температурний контраст ΔT . Тест-об'єкт і фон випромінюють як АЧТ.

Оскільки об'єкт завжди міститься на фоні, то корисний (інформативний) сигнал виникає за наявності температурного контрасту між об'єктом і фоном, тобто

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (5)$$

де u_{st} і u_{sb} – сигнали, утворені об'єктом і фоном відповідно.

Якщо об'єкт і фон випромінюють згідно із законом Ламберта, то формулу (5) з урахуванням (4) за умови, що коефіцієнт підсилення $C_{EI} = 1$, представимо у вигляді

$$\begin{aligned} u_s &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T_b + \Delta T) - M_\lambda(\lambda, T_b)] d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \cdot \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda, \end{aligned} \quad (6)$$

де τ_o – середній коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ МПВ виразимо через питому виявлену здатність $D^*(\lambda)$ згідно формули [13]

$$R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (7)$$

де A_D і u_n – площа і шумовий сигнал пікселя МПВ відповідно.

Підставивши формулу (7) у (6) знайдемо відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра

$$SNR = \frac{u_s}{u_n} = \frac{1}{\pi} A_t \tau_o \frac{A_o}{R^2} \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda. \quad (8)$$

Формулу для розрахунку $NETD$ знаходимо з (8), вважаючи, що $SNR = 1$. Тоді

$$NETD = \Delta T = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_t \tau_o A_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda}. \quad (9)$$

Отримана формула найзагальніша для розрахунку $NETD$. Представимо рівняння (9) в іншому вигляді, користуючись рис. 1. Очевидно, що $A_p = \pi D_p^2/4$ і $A_t/R^2 = A_D/f_0^2$. Тоді

$$NETD = \frac{4k_o^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (10)$$

де $k_o = f'_o / D_p$ – діафрагмове число об'єктива.

Користуючись співвідношенням (10), визначимо такі шляхи зменшення параметра $NETD$:

1. Використання світлосильних об'єктивів з малим діафрагмовим числом $k_o = f'_o / D_p$ і високим коефіцієнтом пропускання τ_o . Це найефективніший спосіб, тому що $NETD \sim k_o^2$.
2. Використання МПВ з великою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$.
3. Зменшення ефективної шумової смуги Δf еталонного фільтра. Однак для отримання високого просторового розділення цю смугу потрібно збільшувати [15]. Тому Δf обирають з компромісу між просторовим та температурним розділеннями.

Отримана формула (10) для енергетичного розділення справедлива для випадку, коли тепловізор перетворює яскравість об'єкта спостереження із ІЧ області спектру в його зображення на екрані дисплея у видимій області спектру. Іншими словами, в класичному тепловізорі відбувається перетворення інтенсивності випромінювання. Поляризаційний тепловізор реєструє поляризаційні характеристики об'єкта і фону за рахунок зміни кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини в оптичній системі. Коефіцієнт пропускання τ_o оптичної системи ПТ при такій зміні кутової орієнтації буде різним, що згідно формули (10) призведе до різної величини енергетичного розділення тепловізора.

В статті [16] досліджено метод розрахунку енергетичного коефіцієнта пропускання оптичної системи поляризаційного тепловізора для частково поляризованого випромінювання в залежності від кутової орієнтації поляризатора і фазової пластинки. В ПТ характеристики поляризаційного зображення визначаються за допомогою параметрів Стокса, які вимірюються для кутів α між площиною пропускання поляризатора і оптичною віссю чвертьхвильової пластини рівних 0° , 90° , 45° і 135° .

Результати цих досліджень свідчать про те, що нормований коефіцієнт пропускання оптичної системи ПТ $\tau_{os,n} = \tau_{os} / \tau_p \tau_{hp} \tau_o$, де τ_p , τ_{hp} і τ_o – коефіцієнти пропускання, що обумовлені френелівськими втратами на вхідній та вихідній поверхнях оптичних елементів і поглинанням в оптичному середовищі поляризатора і фазової пластини відповідно; τ_o – коефіцієнти пропускання ІЧ об'єктива:

1. Для природнього випромінювання коефіцієнт пропускання не залежить від кутової орієнтації фазової пластини і дорівнює 0.5.

2. Для частково поляризованого випромінювання коефіцієнт пропускання залежить від кута α . Для кутів α рівних 0° , 90° , 45° і 135° нормований коефіцієнт пропускання $\tau_{os,n}$ для ступеня поляризації 0.5 дорівнює 0.75, 0.25, 0.5 і 0.5 відповідно. Таку особливість оптичної системи ПТ будемо враховувати при розрахунках температурного розділення тепловізора.

Метод розрахунку температурного розділення ПТ

Важливим етапом при визначення ЕШРТ є вибір тест-об'єкта, який необхідно використовувати при розрахунках і вимірюваннях температурного розділення ПТ. При цьому слід врахувати:

1. Поляризаційні характеристики об'єкта спостереження: інтенсивність, ступінь поляризації і поляризаційний кут.
2. Енергетичні параметри об'єкта спостереження (тест-об'єкта) і фону, які визначаються температурою, коефіцієнтами випромінювання і відбивання поверхні об'єкта і фону.
3. Орієнтацію поверхні тест-об'єкта і фону відносно оптичної осі тепловізора.

Врахування цих особливостей потребує детального дослідження, що виходить за рамки цієї статті. За основу досліджень візьмемо стандарт NATO 4347 для сухопутних сил «Визначення номінальних характеристик статичної дальності для систем інфрачервоного спостереження» [17].

Тому в цій статті у формулі енергетичного розділення класичних тепловізорів (10) будемо додатково враховувати таке:

1. Параметри тест-об'єкта і фону:
 - 1.1. Поверхні об'єкта і фону мають рівномірний розподіл температури T_t і T_b , коефіцієнтів випромінювання ε_t і ε_b і відбивання R_t і R_b . Температура фону $T_b = 288$ К.
 - 1.2. Ступінь поляризації випромінювання від тест-об'єкта дорівнює P_t , а від фону – $P_b = 0$.
2. Коефіцієнт пропускання оптичної системи $\tau_{os}(\alpha) = \tau_{os,n}(\alpha)(\tau_p \tau_{hp} \tau_0)$, залежить від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини.
3. Приймач випромінювання – мікроболометрична матриця (МБМ), яка має температурну чутливість $NETD_D$, формат $p_D \times q_D$, розмір пікселя $V_D \times W_D$, частоту кадрів f_f

Питома виявлювальна здатність D_{th}^* теплового приймача випромінювання, якою є МБМ, не залежить від довжини хвилі випромінювання, і тому її в формулі (10) можна винести за інтеграл. Для визначення $NETD$ як параметра МБМ у формулі (10) вважають, що [18]:

– діафрагмове число оптичної системи $k_o = 1$;

– ефективна шумова смуга $\Delta f = 1/(2t_i)$, де t_i – час інтегрування матриці, який може дорівнювати постійній часу пікселя t_D .

У разі таких допущень параметр МБМ $NETD_D$ розраховують за формулою

$$NETD_D = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i} \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_{th})}{\partial T} d\lambda}, \quad (11)$$

де T_{th} – температура тест-об'єкта, за якої відбувається визначення параметра $NETD_D$.

Із формули (11) визначаємо питому виявлену здатність D_{th}^* і підставляємо до (10)

$$NETD = NETD_D \frac{k_0^2}{\tau_{os}(\alpha)\varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b), \quad (12)$$

де $k_D(T_{th}, T_b)$ – коефіцієнт, який враховує відмінність диференціальної світності поверхні тест-об'єкта при температурі T_{th} , за якої вимірювалась питома виявлювальна здатність МБМ, від реальної температури T_b фону при тестуванні ПТ,

$$k_D(T_{th}, T_b) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_{th})}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda}. \quad (13)$$

Формула (12) справедлива за умови, що коефіцієнти випромінювання тест-об'єкта ε_t і фону ε_b мають близькі значення, тобто $\varepsilon_t \approx \varepsilon_b$. Вплив ступеня поляризації P частково поляризованого світла від тест-об'єкта враховано в коефіцієнті пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ оптичної системи ПТ. В статті [16] було встановлено, що коефіцієнт пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ визначається функцією:

$$\tau_{os}(\alpha) = \tau_p \tau_{hp} \tau_o \left[\frac{1}{2}(1 - P) + P \cos^2 \alpha \right]. \quad (14)$$

Таким чином, отримана формула (12) дозволяє розрахувати енергетичне розділення поляризаційного тепловізора.

Приклад розрахунку температурного розділення ПТ

Розглянемо приклад розрахунку температурного розділення ПТ за таких умов:

1. Параметри тест-об'єкта:

- Температура фону $T_b = 288$ К.
- Температурний контраст $\Delta T = 2$ К.
- Коефіцієнт випромінювання поверхні тест-об'єкта $\varepsilon_t = 1$.
- Кутове положення нормалі до поверхні відносно осі спостереження $\varphi = 85^\circ$
- Ступінь поляризації $P = 0.5$.
- Поляризаційний кут $\psi = 0^\circ$.

2. Інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери в спектральному діапазоні

$$\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14 \text{ мкм} \quad \tau_A = 1.$$

3. Параметри оптичної системи:

- Діаметр вхідної зіниці і фокусна відстань ІЧ об'єктива – $D_p = 50$ мм і $f_o = 50$ мм.
- Інтегральні коефіцієнти пропускання окремих елементів оптичної системи:
 - поляризатора $\tau_p = 0.9$;
 - фазової пластини $\tau_{hp} = 0.9$;
 - ІЧ об'єктива $\tau_0 = 0.85$.

4. Параметри приймача випромінювання – мікроболометричної матриці GWIR 0304X2A, яка має параметри:

- Робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14$ мкм.
- Температурна чутливість $NETD_D = 0.05$ К.
- Формат матриці $p_D \times q_D = 640 \times 512$ пікселів.
- Розмір пікселя $V_D \times W_D = 17 \times 17$ мкм.
- Частота кадрів $f_f = 50$ Гц.

Для розрахунку температурного розділення ПТ використаємо формулу (12), в якій за умовою прикладу відомими є:

1. Еквівалентна шуму різниця температур МБМ $NETD_D = 0.05$ К.
2. Коефіцієнт випромінювання поверхні тест-об'єкта $\varepsilon_t = 1$.
3. Діафрагмове число оптичної системи $k_o = D_p / f_o = 1$.

Коефіцієнт МБМ $k_D(T_{th}, T_b)$ для температур $T_{th} = 300$ К і $T_b = 288$ К розраховуємо за формулою (13) [13]:

$$k_D(T_{th}, T_b) = \frac{\int_8^{14} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, 300)}{\partial T} d\lambda}{\int_8^{14} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, 288)}{\partial T} d\lambda} = \frac{232 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \text{К}}}{263 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \text{К}}} = 0.88.$$

Визначення коефіцієнта пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ оптичної системи ПТ в залежності від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини детально досліджено в статті [16]. Для частково поляризованого випромінювання коефіцієнт пропускання залежить від кута α . Для кутів α рівних 0° , 90° , 45° і 135° нормований коефіцієнт пропускання $\tau_{os,n}$ для ступеня поляризації $P = 0.5$ дорівнює 0.75, 0.25, 0.5 і 0.5 відповідно. Таку особливість оптичної системи ПТ будемо враховувати при розрахунках температурного розділення тепловізора.

Підставимо наведені вище параметри ПТ до формули (12) і розрахуємо температурне розділення для різних значень кута α :

$$NETD(\alpha = 0^\circ) = 0.05 \cdot \frac{1}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.85 \cdot 0.75 \cdot 1} \cdot 0.88 = 0.085 \text{ К};$$

$$NETD(\alpha = 90^\circ) = 0.26 \text{ К}; \quad NETD(\alpha = 45^\circ) = 0.13 \text{ К}; \quad NETD(\alpha = 135^\circ) = 0.13 \text{ К}$$

Встановимо залежність температурного розділення ПТ від ступеня поляризації P частково поляризованого випромінювання, який впливає на коефіцієнт пропускання $\tau_{os}(P)$ оптичної системи тепловізора. В статті [16] було встановлено, що для кутів $\alpha = 45^\circ$ і 135° нормований коефіцієнт пропускання не залежить від ступеня поляризації і дорівнює $\tau_{os}(P) = 0.5$. Для кутів $\alpha = 0^\circ$ і 90° відповідно маємо:

$$\tau_{os}(P, \alpha = 0^\circ) = \frac{1}{2} \tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 + P); \tag{15}$$

$$\tau_{os}(P, \alpha = 90^\circ) = \frac{1}{2} \tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 - P). \tag{16}$$

Після підстановки (15) і (16) в рівняння (12) отримуємо залежність температурного розділення ПТ від ступеня поляризації випромінювання тест-об'єкта. Графік цієї залежності для обраних раніше параметрів тепловізора наведено на рис. 1.

$$NETD(P, \alpha = 0^\circ) = NETD_D \frac{2k_o^2}{\tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 + P) \varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b); \tag{17}$$

$$NETD(P, \alpha = 90^\circ) = NETD_D \frac{2k_o^2}{\tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 - P) \varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b). \tag{18}$$

Важливо також було встановити залежність температурного розділення ПТ для довільного кута α орієнтації фазової пластини відносно площини пропускання поляризатора. В статті [16] була отримана залежність коефіцієнта пропускання оптичної системи від кута α і ступеня поляризації P :

$$\tau_{os}(\alpha, P) = \tau_p \tau_{hp} \tau_o [0.5(1 - P) + P \cos^2 \alpha]. \quad (19)$$

Після підстановки (19) в рівняння (12) отримаємо залежність температурного розділення ПТ від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини при заданому ступені поляризації P .

$$NETD(\alpha, P) = NETD_D \frac{1}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.85 \cdot [0.5(1 - P) + P \cos^2 \alpha]} \cdot 0.88. \quad (20)$$

Графіки цієї залежності для обраних раніше параметрів тепловізора наведено на рис. 2 і 3.

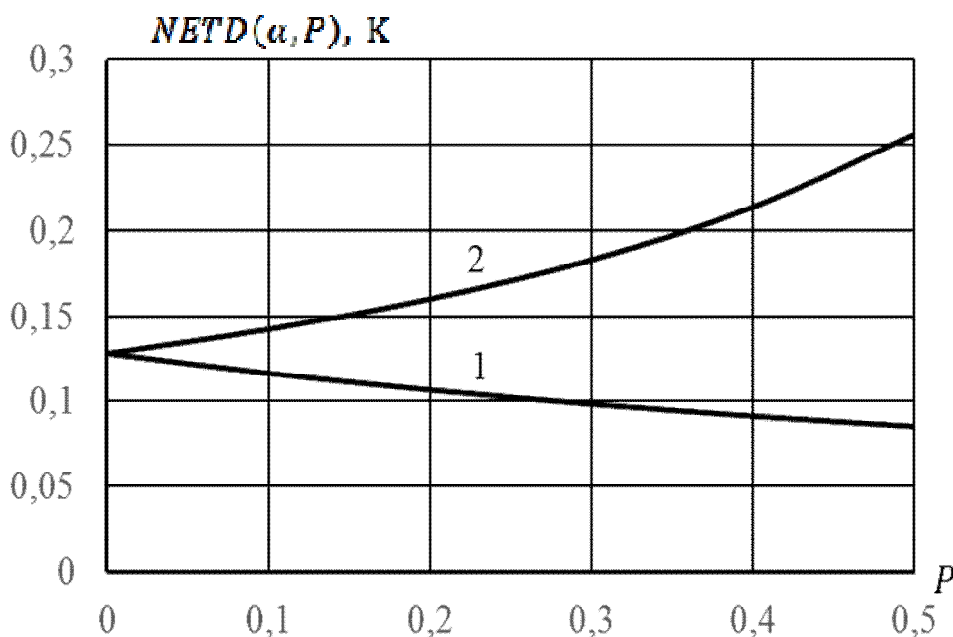


Рис. 2. Залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від ступеня поляризації P випромінювання тест-об'єкта для кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини, яка дорівнює: 1 – 0° ; 2 – 90° .

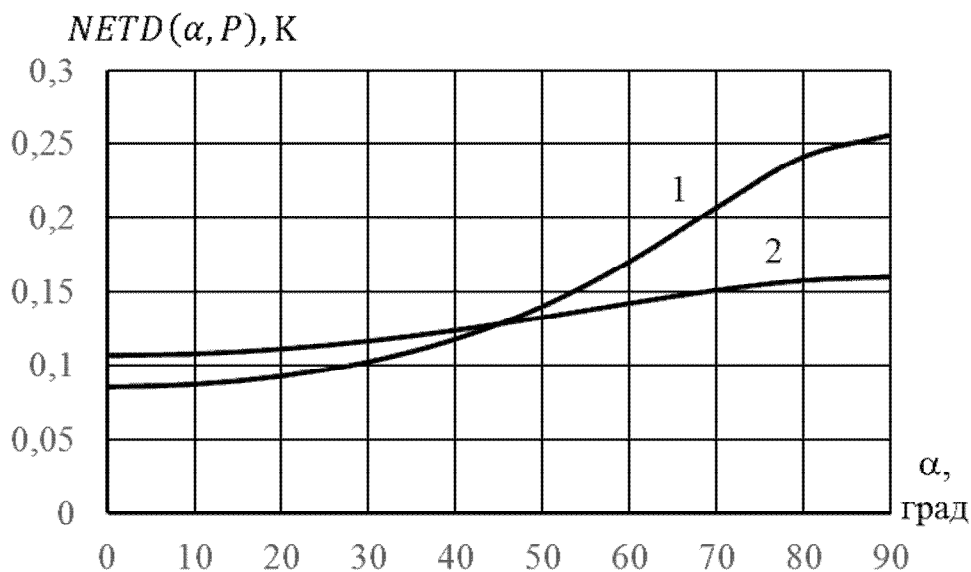


Рис. 3. Залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини для ступеня поляризації: 1 – $P=0.5$; 2 – $P=0.2$.

Аналіз отриманих теоретичних результатів моделювання дозволяє зробити такі висновки:

1. Із збільшенням ступеня поляризації P температурне розділення ПТ для складової випромінювання, що поляризоване в площині спостереження ($\alpha = 0^\circ$), зменшується, а для перпендикулярної складової ($\alpha = 90^\circ$) – збільшується.
2. Для неполяризованого випромінювання ($P = 0$) коефіцієнт пропускання оптичної системи не залежить від кута α , тому температурне розділення залишається незмінним при довільній орієнтації поляризатора відносно осі фазової пластини.
3. Для повністю поляризованого випромінювання ($P = 1$) температурне розділення залежить від кута α і змінюється по закону $NETD(\alpha, P = 1) \sim \cos^2 \alpha$. Якщо $\alpha = 0^\circ$, то ПТ має найменше температурне розділення (найбільшу роздільну здатність).
4. Якщо оптична вісь фазової пластини утворює з площиною поляризатора кут $\alpha = 45^\circ$, то температурне розділення ПТ не залежить від ступеня поляризації P і дорівнює 0,13 К.

Висновки

Запропонована фізико-математична модель оптико-електронної системи поляризаційного тепловізора, яка складається із послідовно розташованих на оптичній осі поляризатора, четвертьхвильової пластини і об'єктива, дозволила розробити метод визначення

температурного (енергетичного) розділення тепловізора. Дослідження цього методу дало можливість:

1. Отримати рівняння для функції передачі сигналу тепловізора, яке було використано для визначення температурного розділення тепловізора.
2. В якості температурного розділення поляризаційного тепловізора запропоновано використовувати класичний параметр – еквівалентну шуму різницю температур *NETD* і стандарт НАТО 4347 [17 – 19].
3. Отримати рівняння для розрахунку параметра *NETD*, яке враховує залежність коефіцієнта пропускання оптичної системи від кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини. Дослідження цього рівняння показало, що
 - 3.1 Поляризаційний тепловізор реєструє поляризаційні характеристики тест-об'єкта і фону шляхом зміни кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини в оптичній системі. Коефіцієнт пропускання τ_0 оптичної системи ПТ при такій зміні кутової орієнтації буде різним, що призводить до різної величини температурного розділення тепловізора [19].
 - 3.2 Температурне розділення залежить від ступеня поляризації досліджуваного випромінювання. Для неполяризованого випромінювання температурне розділення залишається незмінним при довільній орієнтації поляризатора відносно осі фазової пластини.
 - 3.3 Найменше температурне розділення (найбільша роздільна здатність) буде у випадку, коли оптична вісь фазової пластини утворює з площиною поляризатора кут $\alpha = 0^\circ$.

Отримані результати необхідно враховувати при розробці електронної системи обробки відеосигналів з матричного приймача випромінювання. В подальших дослідженнях важливо, також, розробити модель тест-об'єкта із заданими поляризаційними характеристиками ІЧ випромінювання такими як ступінь, еліптичність і азимут поляризації.

Література

1. Goldstein D.H. Polarized Light. Third edition / Dennis H. Goldstein. – CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. – London New York. – 2011. – 786 p.
2. Born M. Principles of optics, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. 7th edition. – 2002.
3. Yanga Bin. Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application / Bin Yanga, Taixia Wub, Wei Chenc, Yanfei Lic, Juri Knjazihhind, Anand Asundie, Lei Yan // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Volume XLII-2/W7, Wuhan, China. – P. 955–960.
4. Zhang Y. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization

- information / Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu // Journal of Electronic Imaging. – 2017. – Т. 33004. – №1.
5. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с.
 6. Vollmer M. Identification and Suppression of Thermal Imaging // M. Vollmer, S. Karstadt, K.-P. Mollmann, F. Pinno // *InfraMation Proceedings*. – University of Applied Sciences, Brandenbueg (Germany). – 2001. – ITC 104 A.
 7. Zhao Yongqiang. Multi-band Polarization Imaging and Applications / Yongqiang Zhao, Chen Yi, Seong G. Kong, Quan Pan, Yongmei Cheng. // National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2016. – 194 p.
 8. Gurton K.P. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging / K.P. Gurton, A.J. Yuffa, Videen G.W. // *Optical Society of America*. – 2014. – Vol. 39, No. 13. – 3857–3859 pp.
 9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — Изд. 4-е. — Физматлит, изд-во МФТИ, 2004. — 656 с.
 10. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Оптимальне керування часовою залежністю температури охолодження в термоелектричних пристроях // *Термоелектрика*. – № 5. – 2016. – С. 5-11.
 11. Kolobrodov V.H., Mykytenko V.I., Tymchuk H.S. (2020) Poliarizatsiina model teplokontrastnykh ob'iektiv sposterezhennia [Polarization model of heat-contrast objects of observation], *Termoelektryka*, pp. 36-52.
 12. Vollmer Michael. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – pp. 788.
 13. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007.– 364 с.
 14. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook / Krzysztof Chrzanowski. – Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010. – 164 p.
 15. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
 16. Kolobrodov V.G. Determination of Transmittance of Optical System of Polarizing Thermal Imager / V.G. Kolobrodov // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2020. – Iss. 78. – pp. 78–85.
 17. NATO Military Agency for standardization, “Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems,” 1995.
 18. Хребтов И. А. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения / И. А. Хребтов, В. Г. Маляров // *Оптический журнал*. – 1997. – № 6. – С. 3–17.
 19. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Kolobrodov M. S., Anatoliy S. Vasyura, Pawel Komada, Zhanar Azeshova "The output signal of a digital optoelectronic processor". - *Proc. SPIE*

10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108080W (1 October 2018)

Надійшла до редакції 28/08/2020

Колобродов В.Г., *докт. техн. наук, профессор*
Мыкытенко В.И., *докт. техн. наук, доцент*
Тымчик Г.С., *докт. техн. наук, профессор*
Сокол Б.В.

Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского», проспект Победы, 37,
Киев, 03056, Украина, e-mail: deanpb@kpi.ua

ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНО- ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Работа посвящена разработке метода определения энергетического (температурного) разделения. Предложено использовать для этого величину эквивалентной шумовой разности температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Разработана физико-математическая модель оптико-электронной системы поляризационного тепловизора, которая позволяет вычислять ее функцию передачи сигнала. На основе этой функции разработана методика вычисления NETD. Получена формула, описывающая функциональную зависимость температурного разделения поляризационного тепловизора от угловой ориентации поляризатора относительно оптической оси фазовой пластины при заданной степени поляризации. Выполнено исследование влияния степени поляризации излучения тест-объекта на температурное разделение поляризационного тепловизора, содержащего линейный поляризатор и фазовую пластину. Библ. 19, рис. 3.

Ключевые слова: поляризационный тепловизор, энергетическое разделение, эквивалентная шумовая разность температур, степень поляризации.

V.G. Kolobrodov, *doc. techn. sciences, Professor*
V.I. Mykytenko, *doc. techn. sciences, Assistant Professor*
G.S. Tymchyk, *doc. techn. sciences, Professor*
Sokol B.V.

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

TEMPERATURE RESOLUTION OF COMPUTER- INTEGRATED POLARIZATION THERMAL IMAGER

The work is devoted to the development of a method for determining the energy (temperature) resolution of a polarization thermal imager, which contains a linear polarizer and a phase plate. For this purpose it is proposed to use the noise equivalent temperature difference (NETD). A physico-mathematical model of an optoelectronic system of the polarization thermal imager has been developed, which allows one to calculate its signal transmission function. Based on this function, a method for calculating NETD has been developed. The formula describing functional dependence of a polarization thermal imager temperature resolution on the angular orientation of the polarizer relative to the optical axis of the phase plate at a given degree of polarization is obtained. A study of the impact of a test object radiation degree of polarization on the polarization thermal imager temperature resolution was performed.

Key words: polarization thermal imager, energy resolution, noise equivalent temperature difference, degree of polarization

References

1. Goldstein D.H. (2011). *Polarized light*. 3d ed. London - New York: CRC Press.
2. Born M., Wolf E. (2002). *Principles of optics*, 7th ed. Cambridge University.
3. Yanga Bin, Wub Taixia, Chenc Wei, Lic Yanfei, Knjazihhind Juri, Asundie Anand, Yan Lei (2017). Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLII-2/W7, Wuhan, China.
4. Zhang Y., Shi Z.G., Qiu T.W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *J.of Electronic Imaging*, T 33004, №1.
5. *Fizicheskii entsyklopedicheskii slovar' [Physical encyclopedic dictionary]* (1984). A.M.Prokhorov (Ed.). Moscow: Soviet Encyclopedia [in Russian].
6. Vollmer M., Karstadt S., Mollman K.-P., Pinno F. (2001). Identification and suppression of thermal imaging. *InfraMation Proceedings*. University of Applied Sciences, Brandenburg (Germany). ITC 104 A.
7. Zhao Yongqiang, Yi Chen, Kong Seong G., Pan Quan, Cheng Yongmei (2016). *Multi-band polarization imaging and applications*. National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

8. Gurton K.P., Yuffa A.J., Videen G.W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optical Society of America*, 39(13), 3857–3859.
9. Sivukhin D.V. (2004). *Obshchii kurs fiziki [General physics course]*. 4th ed. Moscow: MFTI [in Russian].
10. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Kotsur M.P., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2016). Optimal control of time dependence of cooling temperature in thermoelectric devices. *J. Thermoelectricity*, 5, 5-11.
11. Kolobrodov V.H., Mykytenko V.I., Tymchik H.S. (2020) Poliaryzatsiina model teplokontrastnykh ob'ektiv sposterezhennia [Polarization model of heat-contrast objects of observation]. *J. Thermoelectricity*, 1, 36-52.
12. Vollmer Michael, Mollman Klaus-Peter (2018). *Infrared thermal imaging. fundamentals, research and applications*. 2nd ed. Weinheim: Wiley – VCH.
13. Kolobrodov V.G., Lykholit M.I. (2007). *Proektuvannia teploviziinykh i televiziinykh system sposterezhennia [Design of thermal imaging and television surveillance systems]*. Kyiv: KPI [in Ukrainian].
14. Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland.
15. Lloyd G. (1978). *Thermal imaging systems*. Moscow: Mir [Russian transl].
16. Kolobrodov V.G. (2020). Determination of transmittance of optical system of polarizing thermal imager. *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 78, 78–85.
17. NATO Military Agency for standardization (1995). *Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems*.
18. Khrebtov I.A., Maliarov V.G. (1997). Neokhlazhdaiemyie teplovyie metrichnye priiomniki IK izlucheniia [Uncooled thermal array IR detectors]. *Soviet Journal of Optical Technology*, 6, 3–17 [in Russian].
19. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Kolobrodov M. S., Vasyura Anatoliy S., Komada Paweł, Azeshova Zhanar. (2018). The output signal of a digital optoelectronic processor. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108080W (1 October 2018).

Submitted 28.08.2020

УДК 536.24



Анатичук Л.І.

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

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕПЛОВІ ВІДХОДИ

У роботі проведено аналіз критерію ефективності термоелектричних перетворювачів енергії, що використовують відходи тепла (термоелектричних рекуператорів). Зроблено висновки, в яких випадках є економічно доцільним використання таких рекуператорів. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: термоелектричний генератор, утилізація відходів тепла.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Використання термоелектрики для утилізації відходів тепла з метою отримання електричної енергії протягом останніх майже трьох десятиріч було і залишається предметом інтересу спеціалістів, що займаються термоелектрикою. Серед них відходи тепла від двигунів внутрішнього згорання, металоплавильних печей, цементних печей, хімічної на нафтопереробної промисловості і багато іншого, де значна частина відпрацьованого тепла просто викидається у навколишнє середовище. Значне місце займають і відходи тепла у побуті [1, 2].

У зв'язку з всенаростаючою тенденцією боротьби з викидами CO₂ багато країн почали робити оцінку потенціалу своїх теплових відходів [3, 4]. У роботі [5] проаналізовано доступні статистичні дані і зроблено висновок, що у розвинутих країнах на долю промисловості приходить від 50 % до 80% енергії, споживаної країною в цілому. При цьому, в середньому 20 % від спожитої енергії втрачається з тепловими відходами, а в деяких країнах, таких як Ірландія, Туреччина, Іспанія, Кіпр, ця величина сягає 50 – 70 %.

Тому *актуальним* є створення термоелектричних генераторів (ТЕГ), які будуть використані в якості рекуператорів теплових відходів і повертати частину теплових втрат у вигляді електричної енергії.

Класична теорія термоелектричних генераторів визначає основним критерієм їх якості коефіцієнт корисної дії. Відмінністю у використанні термогенератора в ролі рекуператора є те, що відходи тепла є безкоштовними, і отже коефіцієнт корисної дії генератора не відіграє вирішальної ролі. *Актуальним* стає питання, яким критерієм варто оцінювати термоелектричні перетворювачі енергії, що будуть використовувати теплові відходи. Отже, виникає принципово нова ситуація щодо опису якості термоелектричного рекуператора.

Метою даної роботи є визначення критерію ефективності термоелектричного рекуператора, що використовує теплові відходи.

Критерій якості ТЕГ в ролі рекуператора теплових відходів

В умовах, коли коефіцієнт корисної дії не є визначальним фактором для оцінки якості термоелектричного рекуператора, на перше місце має бути поставлено економічну доцільність використання ТЕГ в ролі рекуператора.

Виходячи з того, що результатом роботи ТЕГ є додаткова електрична енергія, його доцільно буде використовувати, якщо вартість виробленої ним електричної енергії буде економічно раціональною для її використання у кожному конкретному випадку, а при наявності електричної мережі має бути нижчою за вартість промислової електричної енергії. Зрозуміло, що у цю вартість у режимі рекуперації не входить ціна теплової енергії, яка визначається вартістю енергоносіїв, таких як вуглеводні, ядерне паливо і інше, оскільки відходи тепла безкоштовні.

Тому вартість електричної енергії m_0 , що виробляє термоелектричний рекуператор визначатиметься наступним чином:

$$m_0 = \frac{S_0}{N}, \quad (1)$$

де S_0 – питома вартість термоелектричного рекуператора, N – ресурс роботи.

Отже, у випадку використання ТЕГ в якості рекуператора відходів тепла на перше місце виходять вимоги до його мінімальної питомої вартості S_0 та максимального ресурсу його роботи N .

У питому вартість рекуператора входять вартість самого генератора s_1 , витрати на його установку і обслуговування s_2 , витрати на відведення тепла від генератора s_3 та витрати на стабілізацію напруги s_4 (рис. 1). В залежності від умов експлуатації можуть мати місце і інші витрати.

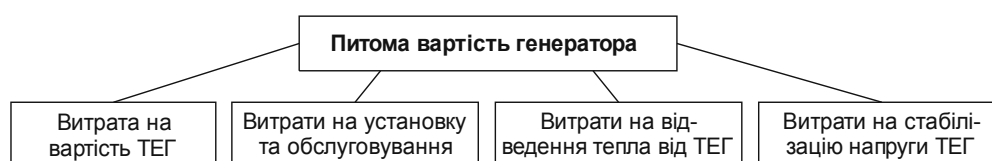


Рис. 1. Складові питомої вартості генератора.

Сукупність цих витрат формує питому вартість рекуператора S_0 (\$/W), що є відношенням усіх витрат до його електричної потужності W :

$$S_0 = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4}{W}. \quad (2)$$

Оцінки показують, що у даний час ця величина складає біля 25 \$/W [6]. Згідно (1) цю величину потрібно мінімізувати.

З іншого боку, чим більший ресурс роботи генератора N (години), тим нижча вартість виробленої ним електричної енергії m_0 .

Ресурс роботи термоелектричного рекуператора переважним чином залежить від ресурсу термоелектричних модулів, що використані в ТЕГ. Кращі зразки термоелектричних генераторних модулів, що спеціально розроблені для термоелектричних рекуператорів, мають ресурс роботи біля 100 000 годин [6].

Звідси можна оцінити мінімальну вартість електричної енергії термоелектричного рекуператора. Вона складатиме біля 0.25\$ за кВт·год. при умові забезпечення оптимальної температури на модулях ТЕГ.

При наявності промислових електричних мереж економічна доцільність використання ТЕГ в якості рекуператора досягається, коли вартість виробленої ним електричної енергії є нижчою, за вартість промислової електричної енергії, тобто при умові, коли

$$\frac{m}{m_0} > 1, \quad (3)$$

де m – вартість промислової електричної енергії, m_0 – вартість електричної енергії, виробленої термоелектричним рекуператором.

Підставивши (3) в (1) отримаємо критерій ефективності термоелектричного рекуператора A , який повинен бути більше одиниці:

$$A = \frac{mN}{S_0} > 1. \quad (4)$$

Цей критерій і буде характеризувати доцільність використання термоелектричного генератора в якості рекуператора відходів тепла та визначатиме термін його окупності.

Термін окупності термоелектричного рекуператора N_0 складатиме

$$N_0 = \frac{N}{A}. \quad (5)$$

Решту часу $(N - N_0)$ рекуператор буде приносити прибуток. Чистий прибуток P від

використання термоелектричного рекуператора визначатиметься

$$P = mW(N - N_0). \quad (6)$$

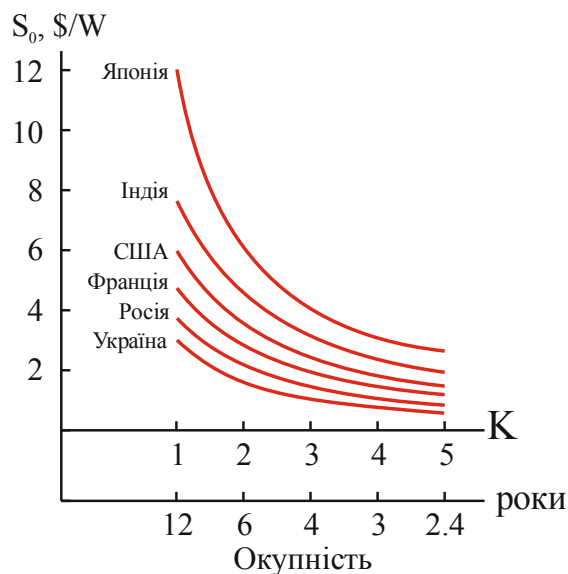


Рис. 2. Доцільна питома вартість ТЕГ у залежності від терміну окупності.

До прикладу, на рис. 2 наведено розрахунки доцільної питомої вартості термоелектричного рекуператора у залежності від часу окупності для різних країн. Питома вартість генератора визначалася, виходячи з ціни на електроенергію у тій чи іншій країні [7].

Як видно з рис. 2, на даний час для досягнення економічної доцільності застосування термоелектричних рекуператорів потрібно працювати у напрямку значного зниження його питомої вартості. Більш доцільним є використання термоелектричних генераторів у країнах, де електрична енергія є найдорожчою.

Висновки

1. Отримано універсальний критерій А ефективності термоелектричних рекуператорів, у яких використовують відходи тепла. Ним визначається економічна доцільність використання рекуператора, термін окупності та прибуток, отриманий завдяки його використанню.
2. Встановлено, що економічно доцільним використання термоелектричного генератора є тоді, коли критерій $A > 1$.
3. Показано, що для зменшення терміну окупності термоелектричного рекуператора, і відповідно, збільшення чистого прибутку, необхідно збільшувати критерій А, тобто працювати у напрямку зниження питомої вартості рекуператора та збільшення його ресурсу роботи.
4. Економічно ефективніше застосування термоелектричних рекуператорів у країнах, де електрична енергія дорожча.

Література

1. Neild Jr. A.B. "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.
2. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles. – 2017. – Vol. 6, № 2. – P. 1119-1124.
3. A. Heghmanns, S. Wilbrecht, M. Beitelshmidt, 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
4. 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.
5. R. Kuz Dreams and realities of the use of thermoelectric generators in automobile transport. XVII International Forum on Thermoelectricity. Belfast, May 15-18, 2017.
6. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. - Berlin: Expert Verlag, 2011, P. 191 - 208.
7. <http://worldwideenergy.com>

Надійшла до редакції 20.08.2020

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

¹Інститут термоелектричества НАН и МОН України,

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

e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,

Черновцы, 58012, Украина

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕПЛОВЫЕ ОТХОДЫ

В работе проведен анализ критерия эффективности термоэлектрических преобразователей энергии, использующих отходы тепла (термоэлектрических рекуператоров). Сделаны выводы, в каких случаях экономически целесообразно использование таких рекуператоров. Библ. 7, рис.2.

Ключевые слова: *термоэлектрический генератор, утилизация отходов тепла.*

L.I. Anatyshuk *acad. National Academy of
Sciences of Ukraine*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS
and MES of Ukraine,

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

e-mail: anatyshuk@gmail.com

EFFICIENCY CRITERION OF THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTERS USING WASTE HEAT

The paper analyzes the efficiency criterion of thermoelectric energy converters using waste heat (thermoelectric recuperators). Conclusions are drawn in which cases it is economically feasible to use such recuperators. Bibl/ 7, Fig. 2.

Key words: thermoelectric generator, waste heat recovery.

References

1. Neild Jr. A.B. (1963). *Portable thermoelectric generators*. Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A.
2. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. (2017). Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 6(2), 1119-1124.
3. Heghmanns A., Wilbrecht S., Beitelschmidt M., Geradts K. (2016). Parameter optimization and operating strategy of a TEG system for railway vehicles. *Journal of Electronic Materials*. DOI: 10.1007/s11664-015-4145-2
4. Bosch Henry (2016). From modules to a generator: An integrated heat exchanger concept for car applications of a thermoelectric generator (2016). *Journal of Electronic Materials*, 45(3). DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.
5. Kuz R. (2017). Dreams and realities of the use of thermoelectric generators in automobile transport. *XVII International Forum on Thermoelectricity* (Belfast, May 15-18, 2017).
6. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2011). Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. *Thermoelectrics goes automotive*. Berlin: Expert Verlag, P. 191 - 208.
7. <http://worldwideenergy.com>

Submitted 20.08.2020



Філін С.О.

Філін С.О., докт. техн. наук
Закшевський Б., докт. техн. наук

Західнопоморський технологічний
університет у Щецині аляя Піаст 17,
Щецін, 70-310, Польща;
e-mail: sergiy.filin@zut.edu.pl



Закшевський Б.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМА РОБОТИ ВЕНТИЛЯТОРА І МОДУЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА НАПОЇВ

На прикладі охолоджувача напоїв експериментально визначена залежність температури T_c камери (ємності) охолоджувача від напруги живлення U_f вентилятора на гарячій стороні агрегату при різних значеннях напруги живлення модуля U_m . Правильний вибір напруги живлення U_f цього вентилятора дозволяє не лише знизити споживану потужність виробу в цілому, а й на $1-6^\circ\text{C}$ знизити температуру камери охолоджувача, що автоматично призводить до підвищення його продуктивності. При зміні напруги живлення термоелектричного модуля U_m в діапазоні від 0,3-0,4 до 0,75-0,8 номінального значення спостерігається мінімум функції $T_c(U_f)$. Бібл. 14, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач напоїв, глибина охолодження, вентилятор, напруга живлення, експериментальні дослідження.

Вступ

Ряд попередніх авторських публікацій [1-5] був присвячений проектуванню термоелектричних охолоджувачів напоїв в оригінальній тарі, тобто в металевих банках і пластикових пляшках. В рамках проведених досліджень було проаналізовано ринок сучасних побутових і автомобільних термоелектричних охолоджувачів напоїв з точки зору їх швидкості охолодження. Показано, що швидкодія цих пристроїв не задовольняє запити споживачів. Запропоновано використання «мокрого» контакту для збільшення швидкодії охолоджувачів і показано ефективність цього рішення як розрахунковим шляхом, так і експериментально. Дана робота є продовженням попередніх досліджень. Черговий етап присвячений аналізу впливу різних чинників на основні технічні характеристики згаданих охолоджувачів.

Як видно з таблиці 1, вибір найважливіших технічних характеристик термоелектричного пристрою залежить від його призначення і режими роботи (постійна робота або епізодична). Для

холодильників і міні-барів такими характеристиками є середня споживана потужність P , добове або річне енергоспоживання E і створюваний перепад температур ΔT . Для охолоджувачів напоїв – це швидкість охолодження V , звана також швидкодією, і глибина охолодження ΔT .

Таблиця 1

Якісний аналіз ступеня впливу обраних конструктивних і експлуатаційних факторів на найважливіші технічні характеристики побутових термоелектричних приладів

Група виробів фактор	Холодильники міні-бари	Охолоджувачі напоїв	Льодогенератори	Кондиціонери
Робота (режим роботи)	Постійна	Епізодична	Епізодична	Сезонна
Найважливіші характеристики	P або E , ΔT	V , ΔT , \$	G , \$	E або P , ΔT , \$
Ефективність термоелектричного матеріалу і модулів	++	++	++	++
Загальна компоновка, форма	+	+	++	+
Умови теплообміну на радіаторах (теплообмінниках)	++	++	+	++
Ефективність термічної ізоляції камери (ємності, льодоформи)	++	+	0	0
К.к.д. джерела живлення AC/DC	+	+	+	+
Спосіб регулювання температури	++	+	0	+
Економічність допоміжного обладнання (освітлення камери, автоматика, вентилятори і т.п.)	+	+	0	++

де: E - енергоспоживання, [кВт • год / добу]; P - споживана потужність, [Вт]; ΔT - створювана різницю температур (для холодильника), глибина охолодження (для охолоджувача напоїв), [°C]; температурний діапазон роботи (для кондиціонера); V - швидкість охолодження, [°C / год]; G - продуктивність, [кг / год]; $\$$ - ціна [\\$].

++ - сильний вплив, + - помірний вплив, 0 - вплив відсутній або мізерно мало.

У табл. 1 представлені фактори, що впливають на характеристики обраних типів пристроїв. Досвід створення і експлуатації побутових термоелектричних виробів показує, що вдосконалення їх характеристик не зводиться тільки до підвищення ефективності термоелектричних матеріалів. Сумарний вплив інших факторів порівняний, а в ряді випадків істотніший від впливу ефективності матеріалів. Серед цих інших факторів слід виділити умови теплообміну на радіаторах по обидва боки термоелектричного модуля або модулів. Температури переохолодження холодного радіатора і перегріву гарячого радіатора безпосередньо впливають на холодопродуктивність і енергетичну ефективність термоелектричного модуля [6, 7]. Тому умови теплообміну на радіаторах виділені як фактор сильного впливу.

Короткий аналіз літератури, мета і об'єкт дослідження

Ефективність теплообміну на обох сторонах термоелектричного модуля залежить від продуктивності вентилятора, яка, в свою чергу, залежить від напруги його живлення. Отже, головним змінним параметром було вибрано напругу живлення вентилятора. При цьому слід пам'ятати, що в побутових приладах, що живляться від мережі змінного струму 220-230 В через випрямляч, просто реалізувати незалежне живлення модуля і вентилятора. Дослідження впливу напруги живлення вентилятора розміщеного в камері холодильника або вітрини на середню температуру в камері було проведено досить давно і описано у працях [8 – 10]. У той же час ще більший інтерес являє дослідження впливу режиму роботи вентилятора на гарячій стороні модуля на температурні характеристики термоелектричного виробу. Окрім праці [10], де подібні дослідження велися в дуже обмеженому обсязі, такі експериментальні роботи до теперішнього часу не проводилися. Останні роботи присвячені експериментальним дослідженням термоелектричних охолоджувачів [11 – 14] також не зачіпають ці питання. Метою дослідження було заповнення зазначеної прогалини.

Як об'єкт дослідження було обрано термоелектричний охолоджувач напоїв з «мокрим контактом» типу TSSN-0.5, представлений на рис. 1 і докладно описаний у працях [1 – 5]. Охолоджувач призначений для охолодження напоїв в металевих банках об'ємом 0.33 і 0.5 літра і в пластикових пляшках того ж обсягу. В охолоджувачі встановлений один термоелектричний модуль типу MT2-1.6-127, що контактує своєю холодною стороною з дном теплоізолюваної циліндричної ємності з алюмінію. Гаряча сторона модуля пов'язана з радіатором, який обдувається вентилятором марки Everflow тип R128025DM з номінальною напругою живлення

12 В постійного струму. У досліджуваному об'єкті передбачено незалежне електроживлення модуля і вентилятора.



Рис. 1. Прототип побутового термоелектричного охолоджувача напоїв TSSN-0.5 [3]: а - загальний вигляд, б - момент випробувань.

Метод дослідження, короткий опис експериментального стенду і методики випробувань

Для реалізації поставленої мети було обрано експериментальний шлях досліджень. Випробування проводилися в лабораторії термоелектричного охолодження кафедри кондиціонування та холодильного транспорту Західнопоморського технологічного університету в Щецині в період 2020-2021 рр.

Спрощена схема експериментального стенду і схема установки датчиків температури показані на рис.2. Для вимірювання температур використовувалися термодавачі опору ТСМ-100, які входять до складу вимірювального комплексу ІТ-10. Результати вимірювань реєструвалися з частотою 10 с. за допомогою програмного забезпечення Channel 2.0. Вимірювання температур дублювалося термопарами типу J , підключеними до 8-канального реєстратора AR206. Живлення модуля і вентилятора здійснювалося від зовнішнього двоканального джерела живлення типу M10-DP-305E з незалежним регулюванням вихідних електричних параметрів. Після стабілізації температури камери при черговому значенні напруги живлення вентилятора джерело живлення

переклюалося на таке саме значення напруги за сталої величини напруги живлення термоелектричного модуля. Типову динаміку зміни температури камери в ході випробувань представлено на рис. 3.

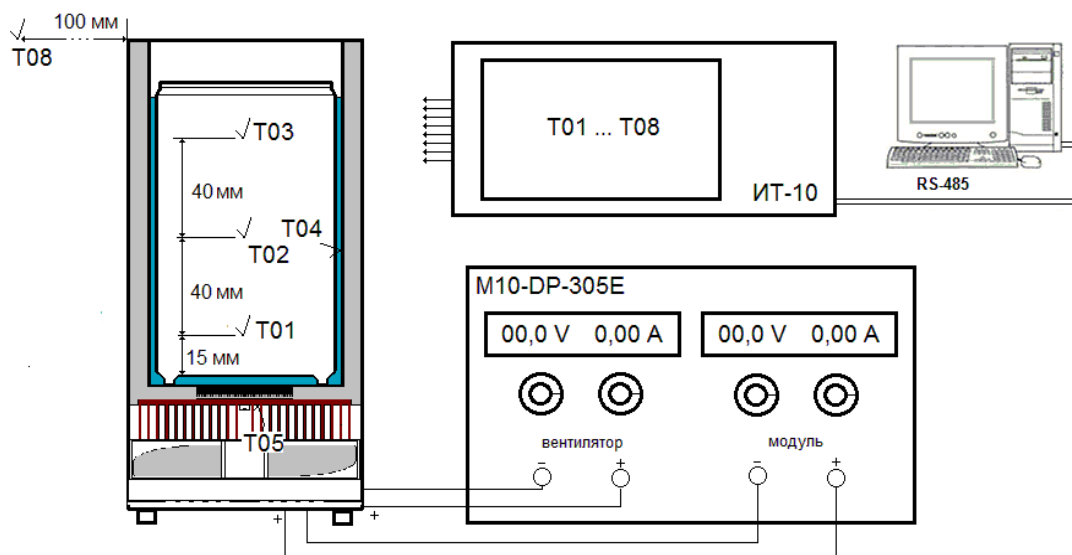


Рис. 2. Блок-схема експериментального стенду із зазначенням місць установки термопар.

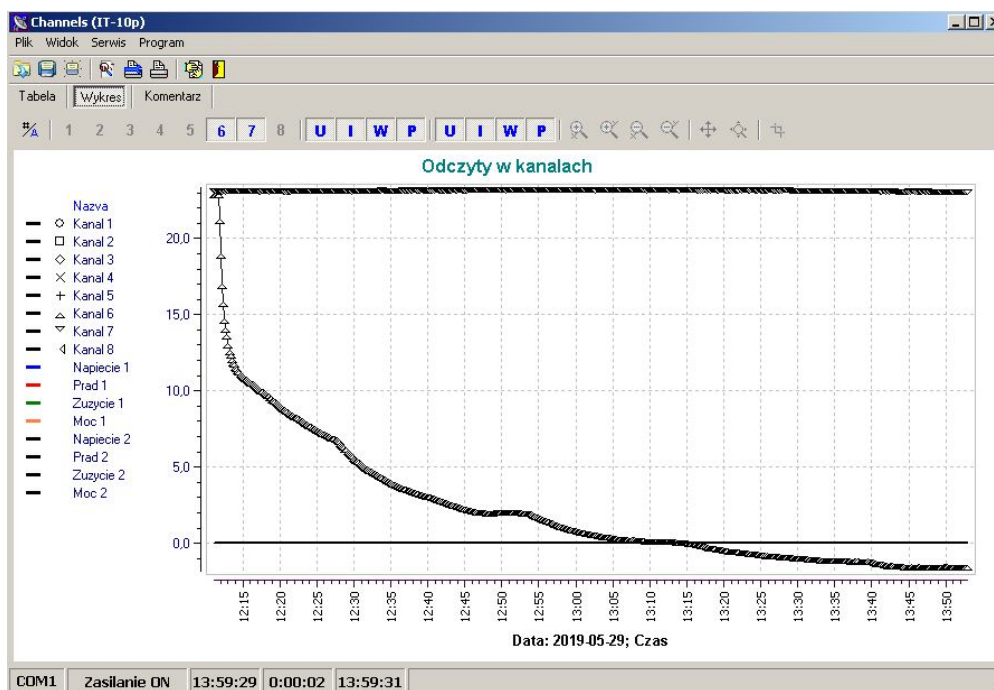


Рис. 3. Динаміка зміни температури камери T_c в ході випробувань при $U_m = 10$ В.

Випробування проводились за температури в приміщенні лабораторії $22 \pm 1^\circ\text{C}$, підтримуваної за допомогою побутового кондиціонера типу split. Випробування проведено для двох режимів роботи охолоджувача: з порожньою камерою (ємністю) і з напоєм в банці ємністю 0.33 літра (рис. 1б).

Результати випробувань і їх аналіз

Результати випробувань охолоджувача з металеві банкою в синтетичному вигляді представлено в табл. 2. Напруга живлення вентилятора регулювалась в діапазоні від 6 до 14 В, що впливає з багаторічного досвіду експлуатації осьових вентиляторів даного типу. Вони зберігають свою працездатність при зміні напруги живлення в діапазоні від 5 до 15 В. В експерименті ми обмежилися діапазоном 6-14 В з наступних причин. За напруги нижчої від 6В виникають проблеми зі стартом вентилятора, хоча при плавному зниженні напруги з 6 до 5 В він продовжує працювати на малих обертах. Напруга понад 14 В пов'язана зі збільшенням енерговитрат і підвищеним шумом.

Таблиця 2

Результати випробувань термоелектричного охолоджувача при змінних значеннях напруги харчування модуля U_m і вентилятора U_w

температури $^\circ\text{C} \rightarrow$	T_c			T_h			ΔT		
	напруги $U_m \rightarrow$								
	6 В	8 В	10 В	6 В	8 В	10 В	6 В	8 В	10 В
$\downarrow U_f$									
6 В	5.1	5.9	6.7	34.3	39.3	50.2	29.2	33.4	43.5
8 В	4.3	4.3	2.0	32.2	35.9	45.2	27.9	31.6	43.2
10 В	4.1	4.3	0.1	31.0	34.7	42.3	26.9	30.4	42.2
12 В	4.4	4.3	-1.0	30.3	32.7	40.4	25.9	28.4	41.4
14 В	4.6	5.4	-1.3	29.6	31.9	39.4	25.0	26.5	40.4

Діапазон змін напруги модуля було звужено до меж від 6 до 10 В, що впливало з попередніх експериментів [3]. Зміна температури гарячого радіатора T_h повністю відповідала нашим очікуванням: за кожного сталого значення напруги живлення модуля U_m (6, 8 і 10 В) зі збільшенням напруги живлення вентилятора U_f температура гарячого радіатора T_h зменшувалася, причому це зменшення було більш значимим за вищих значень U_m . Зовсім інакше ситуація виглядала на холодній стороні, де вимірювалася температура стінки ємності (камери), в якій знаходилася банка з напоєм. Тут спостерігалися мінімальні значення температури ємності T_c за напруги живлення $U_f = 10$ В при напрузі живлення модуля 6 В і 8 В, причому за $U_m = 8$ В мінімум був розмитий. За $U_m = 10$ В спостерігалася монотонне зниження температури T_c при збільшенні U_f (рис. 4).

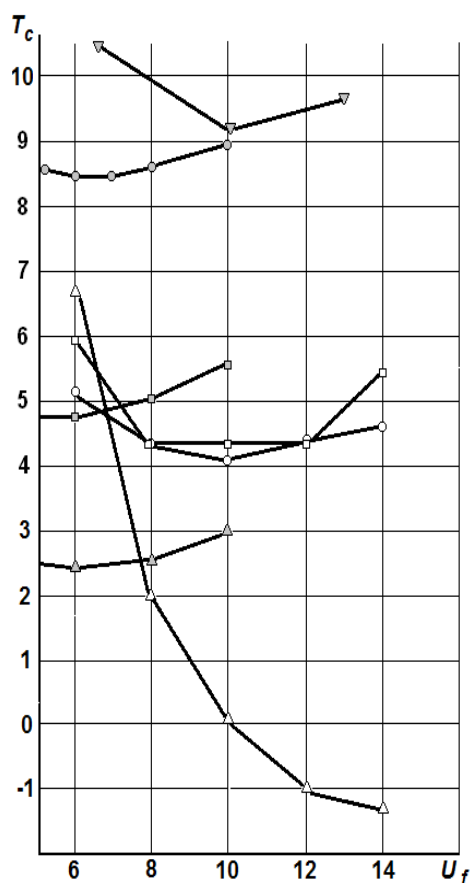


Рис. 4. Залежність температури ємності (камери) T_c від напруги живлення вентилятора U_f встановленого на гарячій стороні модуля при різних значеннях напруги його живлення, а саме: \circ - $U_m = 6$ В; \square - $U_m = 8$ В; \triangle - $U_m = 10$ В; інші графіки і позначення стосуються порівняння результатів з даними інших досліджень і пояснені в тексті

На рис. 4 також представлено порівняння отриманих результатів з результатами відомих, більш ранніх робіт. Символом ∇ позначено залежність температури в камері термоелектричної холодильної вітрини об'ємом 103 літри від напруги живлення вентиляторів на гарячій стороні агрегату [10], а символами \circ , \square , \triangle показано залежність температури в камері термоелектричного холодильника для напоїв обсягом 13.5 літра від напруги живлення вентилятора в камері, тобто на холодній стороні агрегату [8]. Перша зі згаданих залежностей (∇) має мінімум поблизу $U_f = 10$ В. Ця величина збігається з результатами даного дослідження. Чи впливає з цього універсальна рекомендація вибору U_f ?

Беручи до уваги, що на оптимальне значення U_f впливає не лише напруга живлення модуля, а й конструкція гарячого теплообмінника, тип вентилятора, спосіб регулювання температури і ряд інших факторів, остаточний висновок про це робити поки рано. У той же час можна з упевненістю зробити якісний висновок: існує оптимальна з точки зору зниження температури T_c в камері величина напруги живлення вентилятора на гарячій стороні, і вона менша за номінальну напругу живлення вентилятора. Ще один, не настільки очевидний, але важливий висновок: чим більшу поверхню теплообміну матиме гарячий радіатор, тим менше буде оптимальна величина напруги живлення вентилятора. У стаціонарних термоелектричних холодильниках та інших пристроях, в яких зниження маси не є пріоритетним завданням, використання радіатора з більшою поверхнею призводить до зростання собівартості холодильника в межах 5-6 %. При цьому відповідне зменшення напруги живлення вентилятора означає від 2 % до 4 % зниження споживаної потужності. Результат техніко-економічного аналізу залежить від частоти (інтенсивності) використання холодильника. Якщо стаціонарний холодильник або охолоджувач напоїв використовується в цілодобовому режимі більше 3 місяців на рік упродовж мінімум 5 років, економія експлуатаційних витрат є пріоритетною по відношенню до економії інвестиційних витрат. Результат техніко-економічного аналізу залежить від частоти (інтенсивності) використання холодильника. Якщо стаціонарний холодильник або охолоджувач напоїв використовується в цілодобовому режимі більше 3 місяців на рік упродовж мінімум 5 років, економія експлуатаційних витрат є пріоритетним по відношенню до економії інвестиційних витрат.

Аналогічна залежність T_c від U_f , але на цей раз по холодній стороні агрегату, також демонструє мінімум для різних величин U_m ($\circ - U_m = 6$ В; $\square - U_m = 8$ В; $\triangle - U_m = 10$ В), який відповідає мінімальному значенню напруги живлення вентилятора, тобто 6В. Фізичний сенс такої поведінки функції $T_c(U_f)$ полягає в наступному. При переході від природної конвекції до примусової, який спостерігається за $U_f = 5-6$ В, відбувається стрибкоподібне зниження середньої температури в камері холодильника. Однак подальше зростання напруги живлення вентилятора, чому відповідає збільшення швидкості циркуляції повітря в камері, призводить до того, що сумарний термічний опір теплообміну на стінках камери (з урахуванням нещільності ізоляції дверей) зменшується швидше, ніж опір на холодному радіаторі.

Висновки

Проведені дослідження в черговий раз показали важливе значення узгодження режимів роботи модуля (модулів) і вентиляторів, що використовуються в агрегатах різних термоелектричних виробів. На прикладі охолоджувача напоїв експериментально визначена залежність температури T_c камери (ємності) охолоджувача від напруги харчування U_f вентилятора на гарячій стороні агрегату при різних значеннях напруги харчування модуля U_m . Правильний вибір напруги живлення U_f цього вентилятора дозволяє не тільки знизити споживану потужність всього виробу, а й на 1-6°C знизити температуру камери охолоджувача, що автоматично призводить до підвищення його швидкодії. При зміні напруги живлення термоелектричного модуля U_m в діапазоні від 0.3-0.4 до 0.75-0.8 номінального значення спостерігається мінімум функції $T_c(U_f)$.

Література

1. Filin SO The influence of thermal contact between cooling surface and object on quick-speed thermoelectric coolers for beverages. Journal of Thermoelectricity, n.1, 2018, p. 66-77.
2. Filin SO Poprawa dynamicznych charakterystyk małych termoelektrycznych schładzaczy i podgrzewaczy napojów. Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja, n.12, 2018, s. 525-529. DOI: 10.15199 / 9.2018.12.9
3. Filin SO, Zakrzewski B. Експериментальні дослідження швидкодії термоелектричних охолоджувачів напоїв з мокрим контактом. Інженерно-фізичний журнал. (JEPTER). Том 94, вип.1. 2 021.
4. Filin SO Calculation of the cooling speed of the thermoelectric beverage cooler with "wet" contact. Journal of Thermoelectricity. n. 2, 2020 року, p. .
5. Filin S., Anatyshuk L. Termoelektryczne schładzaczce napojów. Zgłoszenie patentowe nr 426737 z dnia 22.08.2018.
6. Анатичук Л. І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: Довідник. Київ: Наукова думка, 1979. 768 с.
7. НАЕР В.А., Гарачук В.К. Теоретичні основи термоелектричного охолодження. Одеса: ОПИ, 1982. 112 с.
8. Filin S., Owsicki A. Badania wpływu parametrów pracy wentylatora w komorze na cechy eksploatacyjne chłodziarki termoelektrycznej, Chłodnictwo, tom XL, 4, 2005, s. 8-12,30.
9. Filin SO, Owsicki A. Experimental research of thermoelectric glass door refrigerators. Journal of Thermoelectricity, n. 2, 2006, p.68-73.
10. Zakrzewski B., Filin S., Owsicki A. Design and experimental research of glass door refrigeration of 100 l volume with thermoelectric cooling unit. Proceeding of 4-th Congress CEFood, 2006, Bulgarian, Sofia, may 22-24, 2006.
11. Fairuz Remeli M., Ezzah Bakaruddin N., Shawal S., Husin H., Fauzi Othman M., Singh B.

- Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 788 (1), 2020 року, 012 076, DOI: 10.1088 / 1757-899X / 788/1/012076.
12. Reid E., Barkes J., Morrison C., Ung A., Patel R., Rebarker C., Panchal P., Vasa S. Design and Testing of a Thermoelectrically- Cooled Portable Vaccine Cooler. Journal of Young Investigators 35 (2), 2018, pp. 50-55, DOI: 10.22186 / jyi.35.2.50-55.
13. Mirmanto Mirmanto, Syahrul Syahrul, Yusi Wirdan. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering Science and Technology an International Journal, 22 (1), 2018, DOI: 10.1016 / j.jestch.2018.09.006.
14. Yasser Abdulrazak Alghanima, Osama Mesalhy, Ahmed Farouk Abdel Gawad. Effect of position and design parameters of a fan-cooled cold-side heat-sink of a Thermoelectric cooling-module on the performance of a hybrid refrigerator. Proceedings of ICFD14: Fourteenth International Conference of Fluid Dynamics, 2-3 April, Cairo, 2021, Egypt.

Надійшла до редакції 17.09.2020

Филин С.О., докт. техн. наук
Закшевский Б., докт. техн. наук

Западнопоморский технологический университет у Щецине
алея Пиастив 17, Щецин, 70-310, Польша,
e-mail: e-mail: sergiy.filin@zut.edu.pl

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРА И МОДУЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ НАПИТКОВ

На примере охладителя напитков экспериментально определена зависимость температуры T_c камеры (емкости) охладителя от напряжения питания U_f вентилятора на горячей стороне агрегата при различных значениях напряжения питания модуля U_m . Правильный выбор напряжения питания U_f этого вентилятора позволяет не только снизить потребляемую мощность всего изделия, но и на $1-6^\circ\text{C}$ снизить температуру камеры охладителя, что автоматически приводит к повышению его производительности. При изменении напряжения питания термоэлектрического модуля U_m в диапазоне от 0.3-0.4 до 0.75-0.8 номинального значения наблюдается минимум функции $T_c(U_f)$. Библ. 14, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель напитков, глубина охлаждения, вентилятор, напряжение питания, экспериментальные исследования.

Filin S.O., *doctor Tech. Sciences*
Zakrzewski Bogusław, *doctor Tech. Sciences*

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

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE FAN AND MODULE OPERATING MODE ON THE CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC BEVERAGE COOLER

Using a beverage cooler as an example, the dependence of the temperature T_c of the chamber (container) of the cooler on the supply voltage U_f of the fan on the hot side of the unit was experimentally determined for various values of the supply voltage U_m of the module. The correct choice of the supply voltage U_f of this fan allows not only to reduce the power consumption of the entire product, but also to reduce the temperature of the cooler chamber by 1-6 ° C, which automatically leads to an increase in its speed. When the supply voltage of the thermoelectric module U_m changes in the range from 0.3-0.4 to 0.75-0.8 of the nominal value, a minimum of the $T_c(U_f)$ function is observed. *Bibl. 14, Fig 4, table 2.*

Key words: thermoelectric beverage cooler, cooling depth, fan, supply voltage, experimental studies.

References

1. Filin S.O. (2018). The influence of thermal contact between cooling surface and object on quick-speed thermoelectric coolers for beverages. *J. Thermoelectricity*, 1, 66-77.
2. Filin S.O. (2018). Poprawa dynamicznych charakterystyk małych termoelektrycznych schładzaczy i podgrzewaczy napojów. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja*, 12, 525-529. DOI: 10.15199/9.2018.12.9
3. Filin S.O., Zakrzewski B. (2021). Experimental studies of the performance of thermoelectric coolers of drinks with wet contact. *JEPTEP*, 94 (1).
4. Filin S.O. (2020). Calculation of the cooling speed of the thermoelectric beverage cooler with "wet" contact. *J. Thermoelectricity*, 2 .
5. Filin S., Anatyshuk L. Termoelektryczne schładzacz napojów. Zgłoszenie patentowe nr 426737 z dnia 22.08.2018.
6. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektryczne urządzenia: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
7. Naer V.A., Garachuk V.K. (1982). *Teoreticheskiye osnovy termoelektrycheskogo okhlazhdeniia [Theoretical foundations of thermoelectric cooling]*. Odessa: OPI [in Russian].

8. Filin S., Owsicki A. (2005). Badania wpływu parametrów pracy wentylatora w komorze na cechy eksploatacyjne chłodziarki termoelektrycznej. *Chłodnictwo*, XL, 4, 8-12,30.
9. Filin S.O, Owsicki A. (2006). Experimental research of thermoelectric glass door refrigerators. *J.Thermoelectricity*, 2, 68-73.
10. Zakrzewski B., Filin S., Owsicki A. (2006). Design and experimental research of glass door refrigeration of 100 l volume with thermoelectric cooling unit. *Proceedings of 4-th Congress CEFood* (Bulgaria, Sofia, May 22-24, 2006).
11. Fairuz Remeli M., Ezzah Bakaruddin N., Shawal S., Husin H., Fauzi Othman M., Singh B. (2020). Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 788(1), 012076, DOI: 10.1088/1757-899X/788/1/012076.
12. Reid E., Barkes J., Morrison C., Ung A., Patel R., Rebarker C., Panchal P., Vasa S. (2018). Design and testing of a thermoelectrically-cooled portable vaccine cooler. *Journal of Young Investigators*, 35(2), 50–55, DOI: 10.22186/jyi.35.2.50-55.
13. Mirmanto Mirmanto, Syahrul Syahrul, Yusi Wirdan. (2018). Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 22(1), DOI: 10.1016/j.jestch.2018.09.006.
14. Yasser Abdulrazak Alghanima, Osama Mesalhy, Ahmed Farouk Abdel Gawad. (2021). Effect of position and design parameters of a fan-cooled cold-side heat-sink of a thermoelectric cooling-module on the performance of a hybrid refrigerator. *Proceedings of ICFD14: Fourteenth International Conference of Fluid Dynamics* (Egypt, Cairo, April 2-3, 2021).

Submitted 17.09.2020

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

Пасєчнікова Н.В., *докт. мед. наук,
член-кореспондент НАМН України*³

Науменко В.О., *докт. мед. наук*³

Задорожний О.С., *докт. мед наук*³

Назаретян Р.Е.³, Гаврилюк М.В.^{1,2}

Тюменцев В.А.¹, Кобылянский Р.Р., *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}

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

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

³ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії
імені В.П. Філатова НАМН України», Одеса, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ОЧЕЙ ЛЮДИНИ

У роботі наведено результати розробки термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини. Прилад призначений для лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів ока. Розроблений термоелектричний медичний прилад дає можливість безконтактно охолоджувати структури ока, що дозволить розробити та впровадити технологію контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології. Наведено особливості конструкції приладу, принцип роботи та його технічні характеристики. Бібл. 22, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний прилад, безконтактне охолодження, гіпотермія ока людини.

Вступ

Терапевтична гіпотермія полягає в штучному зниженні температури тіла хворого шляхом примусового відведення тепла від поверхні тіла (загальна гіпотермія) або внутрішніх органів (локальна гіпотермія) з лікувальною метою.

Локальна терапевтична гіпотермія успішно застосовується в різних галузях медицини. Наприклад, холодова кардіоплегія застосовується для захисту тканин серця під час

кардіохірургічних операцій, які виконуються в умовах штучного кровообігу, що дозволяє рівномірно знизити температуру міокарда до $(+8 \div +10)^\circ\text{C}$ [1]. Краніоцеребральну гіпотермію застосовують з метою попередження гіпоксії структур головного мозку під час нейрохірургічних операцій, а також у новонароджених, які народилися у важкій асфіксії [2]. При реконструктивних хірургічних втручаннях на судинах нирок або трансплантації нирки локальна гіпотермія дозволяє захистити її тканини від гіпоксії та запобігти розвитку ниркової недостатності в післяопераційному періоді [3].

В офтальмології локальна гіпотермія структур ока також може бути застосована для вирішення деяких терапевтичних завдань. Так, J.M. Katsimpris пропонує використовувати локальне охолодження ока для боротьби з внутрішньоочним запаленням [4]. Локальна терапевтична гіпотермія може використовуватись з метою зменшення внутрішньоочного тиску [5]. Після локального охолодження в оці відбувається збільшення кровонаповнення судинного тракту, підвищення пульсового обсягу і швидкості кровотоку, що може бути використано з протиішемічною метою при офтальмологічних захворюваннях [6]. Локальна гіпотермія у процесі вітреоретинальної хірургії ока може приводити до зменшення продукції фібрину та зниження обсягу кровотечі [7].

Штучна локальна контактна гіпотермія є досить простим способом досягнення зниження внутрішньоочної температури та на відміну від загальної гіпотермії позбавлена ризику розвитку важких ускладнень з боку внутрішніх органів, і тому її використання виглядає перспективно. Існують різні способи локального охолодження ока. Під час внутрішньоочних хірургічних втручань локальну гіпотермію ока можна створювати шляхом зниження температури іригаційних розчинів [8]. Зниження температури внутрішньоочних середовищ ока можливе, як при охолодженні безпосередньо зовнішньої поверхні рогівки, так і при впливі холоду через закриті повіки. Для контактного охолодження структур ока можна використовувати, наприклад, міхур з льодом, накладаючи його на повіки [9]. Розробка для локального контактного охолодження ока спеціальних термоелектричних пристроїв дозволяє більш ефективно та контрольовано використовувати корисні ефекти терапевтичної гіпотермії для лікування офтальмологічних захворювань [10, 11].

Відомо, що віддача тепла поверхневими тканинами тіла людини, в тому числі структурами ока, в навколишнє середовище здійснюється переважно за допомогою радіаційного випромінювання у вигляді електромагнітних хвиль інфрачервоного діапазону спектра (довжина хвилі 3-50 мкм з піком в 9.6 мкм), тобто в області довгохвильового інфрачервоного випромінювання [12]. Так, в умовах кімнатної температури $(+21 \div +23)^\circ\text{C}$ і відносній вологості (в межах 40-60 %) близько 60 % тепла відводиться з організму людини шляхом випромінювання. Близько 20 % тепла відводиться шляхом випаровування і 15-20 % – шляхом конвекції. Кондукція є ситуативною і залежить від дотику тіла з предметами навколишнього середовища [13]. Таким чином, вищезазначені особливості тепловіддачі організму людини створюють певні можливості охолодження поверхневих структур тіла безконтактним шляхом. Необхідні подальші

дослідження в цьому напрямку для розробки технології штучної безконтактної контрольованої локальної гіпотермії ока та оцінки доцільності її використання в лікуванні і профілактиці офтальмологічних захворювань.

Тому метою даної роботи є розробка конструкції та виготовлення експериментального зразка термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини.

Конструкція і технічні характеристики приладу

В Інституті термоелектрики НАН та МОН України в рамках договору про співробітництво з ДУ "Інститут очних хвороб та тканинної терапії ім. В.П. Філатова НАМН України" було розроблено термоелектричний прилад для безконтактного охолодження очей людини (рис. 1). Технічні характеристики приладу наведено у таблиці 1.

Прилад призначений для лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів ока людини. Розроблений термоелектричний медичний прилад дає можливість локально безконтактно охолоджувати структури ока, що дозволить розробити та впровадити технологію безконтактної контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології [8, 14 – 20]. Такий прилад є оригінальним та не має світових аналогів.



Рис. 1. Експериментальний зразок термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини: 1 – термоелектричні модулі охолодження (ТЕМО), 2 – електронний блок керування та живлення

Таблиця

Технічні характеристики приладу

№	Технічні характеристики приладу	Значення параметрів
1.	Діапазон задання і підтримки робочих температур	(-25 ÷ +10) °С
2.	Похибка стабілізації температур, не більше	1 °С
3.	Похибка вимірювання температур, не більше	1 °С
4.	Охолодження гарячої сторони ТЕМО	рідинне, від водопровідної мережі
5.	Напруга живлення (мережа змінного струму 50 Гц)	220 ± 10 В
6.	Електрична потужність приладу, не більше	150 Вт
7.	Задання часу експозиції	(1 ÷ 10) хв
8.	Габаритні розміри охолоджуючого пристрою	(160 × 235 × 50) мм
9.	Габаритні розміри електронного блоку керування та живлення	(100 × 240 × 250) мм
10.	Можливість охолодження кожного ока окремо при загальній заданій температурі	+
11.	Наявність захисту від ураження мережевою напругою	+
12.	Довжина шлангів рідинного охолодження ТЕМО	3 м
13.	Вага приладу	1.5 кг
14.	Час виходу приладу на температурний режим	10 хв
15.	Час неперервної роботи приладу	48 год

Прилад складається з двох основних функціональних вузлів: охолоджуючого пристрою на основі термоелектричних модулів охолодження (ТЕМО) 1 та електронного блоку керування і живлення 2 (рис.1). Охолоджуючий пристрій виготовлений на основі термоелектричних модулів Пельтьє 1 [21, 22] і призначений для охолодження двох металевих поверхонь, що розташовуються у безпосередній близькості від поверхні очей людини. За рахунок обміну променистою енергією між цими поверхнями, поверхня очей людини охолоджується на кілька градусів Цельсія. Ступінь охолодження поверхні очей залежить від температури металевих теплообмінних поверхонь та часу дії процедури. Контроль температури поверхні ока при охолодженні здійснюється безконтактним термометром. Для покращення ефективності радіаційного теплообміну металеві охолоджувальні поверхні почорнені. Охолодження гарячих сторін ТЕМО здійснюється зовнішнім рідинним контуром, що підключається до водопровідної мережі. На задній панелі охолоджуючого пристрою розташовані рідинні теплообмінники (виготовлені з високотеплопровідного матеріалу – міді) зі штуцерами для підключення водопровідної мережі. Розхід води в контурі охолодження гарячих сторін ТЕМО невеликий – достатньо 2-3 л/хв при температурі води до 20°C. Крім того, охолоджуючий пристрій розміщено на штативі, що дає можливість регулювати його висоту і, відповідно, підбирати індивідуальне розміщення охолоджуючих поверхонь ТЕМО в безпосередній близькості до поверхонь очей людини.

Електронний блок 2 здійснює живлення і керування термоелектричними модулями з метою підтримки встановлених оператором значень температур, формує необхідні часові інтервали температурного впливу, здійснює вибір температурного впливу на очі пацієнта (праве око, ліве око, обидва ока), а також виконує захист пацієнта від ураження мережевою напругою в аварійній ситуації.

На передній панелі електронного блоку 2 розташовані тумблери «ВКЛ», «ПРАВЕ ОКО», «ЛІВЕ ОКО», програмований мікропроцесорний терморегулятор з електронним дисплеєм для задання та візуалізації значень температури, перемикач «ЧАС ВИТРИМКИ», кнопка «ПУСК».

На задній панелі електронного блоку 2 розташовані пристрій захисного відключення, роз'єм для підключення охолоджуючого пристрою, шнур для підключення до мережі 220 В, запобіжник 5 А.

Крім того, в конструкції приладу передбачено кріплення охолоджуючого пристрою на офтальмологічному столику. Після підключення води від водопровідної мережі до охолоджуючого пристрою і включення електронного блоку 2 в мережу 220 В прилад готовий до роботи.

В аварійній ситуації, якщо з'явиться мережева напруга на металевих деталях приладу, спрацює пристрій захисного відключення і прилад повністю відключиться від напруги. Після усунення аварійної ситуації, треба знову включити пристрій захисного відключення на задній панелі електронного блоку 2.

Блок-схема приладу

Блок-схему термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини

наведено на рис.2, де 1 – охолоджуючий пристрій, 2 – електронний блок керування і живлення, 3 – охолоджуюча поверхня, 4 – датчик температури, 5 – термоелектричний модуль охолодження (ТЕМО), 6 – рідинний теплообмінник, 7 – програмований мікропроцесорний терморегулятор, 8 – тумблер «ЛІВЕ ОКО», 9 – тумблер «ПРАВЕ ОКО», 10 – силовий блок керування ТЕМО, 11 – блок живлення, 12 – тумблер «МЕРЕЖА» – включення приладу в мережу 220 В, 13 – пристрій захисного відключення, 14 – перемикач «ЧАС ВИТРИМКИ», 15 – кнопка «ПУСК», 16 – таймер, 17 – звуковий сигналізатор.

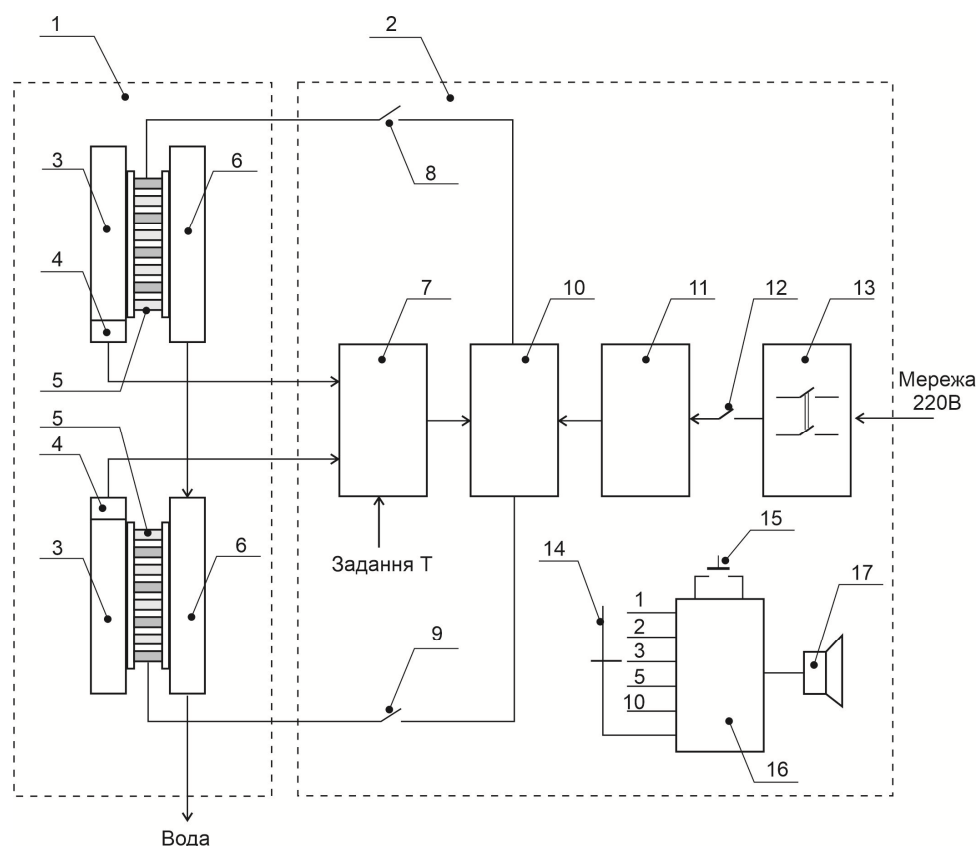


Рис. 2. Блок-схема термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини. 1 – охолоджуючий пристрій, 2 – електронний блок керування і живлення, 3 – охолоджуюча поверхня, 4 – датчик температури, 5 – термоелектричний модуль охолодження (ТЕМО), 6 – рідинний теплообмінник, 7 – програмований мікропроцесорний терморегулятор, 8 – тумблер «ЛІВЕ ОКО», 9 – тумблер «ПРАВЕ ОКО», 10 – силовий блок керування ТЕМО, 11 – блок живлення, 12 – тумблер «МЕРЕЖА» – включення приладу в мережу 220 В, 13 – пристрій захисного відключення, 14 – перемикач «ЧАС ВИТРИМКИ», 15 – кнопка «ПУСК», 16 – таймер, 17 – звуковий сигналізатор.

Принцип роботи приладу

Принцип роботи приладу полягає в безконтактному охолодженні очей людини з метою лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів.

Запропонований прилад працює наступним чином (рис. 2). Оператор підключає за допомогою шлангів рідинні теплообмінники 6 до водопровідної мережі, відкриває водопровідний кран і контролює протікання води через відповідні теплообмінники. Підключає електронний блок 2 до розетки з заземленням та включає його. Потім включає тумблер 12 «МЕРЕЖА». На цифровому індикаторі програмованого мікропроцесорного терморегулятора 7 червоним кольором буде відображатися поточна температура охолоджуючих поверхонь 3, а синім кольором – значення заданої температури. Кнопками на терморегуляторі оператор задає необхідну температуру охолодження (значення підбирається експериментально). Потім оператор тумблером 8 «ПРАВЕ ОКО» включає охолодження правого ока, або тумблером 9 «ЛІВЕ ОКО» – охолодження лівого ока, або вибирає охолодження обох очей разом. Тільки після вибору відповідних тумблерів 8, 9 охолоджуючі поверхні 3 почнуть охолоджуватися. Через 5-10 хвилин температура поверхонь 3 стабілізується і зрівняється із заданою температурою. Після цього, пацієнта розміщують перед охолоджуючим пристроєм 1 таким чином, щоб його очі були на відстані 1-5 см від охолоджуючих поверхонь 3. Потім оператор перемикачем 14 «ЧАС ВИТРИМКИ» вибирає необхідну витримку (час температурного впливу) і натискає кнопку 15 «ПУСК». Після закінчення часу витримки звучить звуковий сигнал від звукового сигналізатора 17. Процедура на цьому може бути закінчена або продовжена повторним натисканням кнопки «ПУСК». На корпусі охолоджуючого пристрою 1, зверху для наглядності, є світлодіодні індикатори роботи охолоджуючих поверхонь 3.

Вказаний прилад простий, компактний та надійний в експлуатації, що дає можливість лікарю або медичному працівнику користуватися ним без спеціальної підготовки, попередньо ознайомившись з інструкцією. Таким чином, до технічних переваг такого приладу слід віднести: безконтактне охолодження поверхні очей людини у режимі реального часу, можливість задання і підтримання необхідної температури з дискретністю ± 1 °C та безпеку використання приладу.

Впровадження такого приладу в медичну практику матиме надзвичайно важливу соціальну та економічну значимість, оскільки дозволить зменшити ризик виникнення офтальмологічних ускладнень, зберегти життєздатність структур очей пацієнтів та забезпечити надання висококваліфікованої допомоги як в спеціалізованих медичних закладах, так і в екстремальних умовах. Це, в свою чергу, забезпечить належні умови для збереження здоров'я людей, підвищить ефективність та якість надання медичної допомоги в системі охорони здоров'я і стане вагомим внеском у розвиток новітньої вітчизняної медичної термоелектричної апаратури.

Слід зазначити, що для підтвердження ефективності приладу, розробки методики лікування та проведення клінічних випробувань розроблений експериментальний зразок приладу для безконтактного охолодження очей людини було передано в ДУ "Інститут очних хвороб та

тканинної терапії ім. В.П. Філатова НАМН України" у рамках договору про співробітництво. Результати клінічних випробувань приладу будуть предметом наступних публікацій по даній тематиці.

Прилад призначений для лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів ока. Розроблений термоелектричний медичний прилад дає можливість локально безконтактно охолоджувати структури ока, що дозволить розробити та впровадити технологію контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології.

Висновки

1. Вперше розроблено конструкцію та виготовлено експериментальний зразок термоелектричного приладу для безконтактного охолодження очей людини. Прилад призначений для лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів ока людини. Запропонований прилад не має світових аналогів.
2. Розроблений термоелектричний медичний прилад дає можливість здійснювати безконтактне контрольоване охолодження поверхні очей людини в діапазоні температур (-25 ÷ +10) °C та в подальшому дозволить розробити і впровадити технологію штучної безконтактної контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології.

Література

1. Fisk R.L., Gelfand E.T., Callaghan J.C. Hypothermic coronary perfusion for intraoperative cardioplegia. *Ann Thorac Surg* 1977; 23: 58-61.
2. McDowall D.G. The current usage of hypothermia in British neurosurgery. *Br J Anaesth* 1971; 43: 1084 – 1087.
3. Wickham J.E., Hanley H.G., Joekes A.M. Regional renal hypothermia. *Br J Urol* 1967; 39: 727 – 743.
4. Katsimpris J. M. Effect of local hypothermia on the anterior chamber and vitreous cavity temperature: in vivo study in rabbits / J. M. Katsimpris, T. Xirou, K. Paraskevopoulos [et al.] // *Klin. Monbl. Augenheilkd.* – 2003. – Vol.220 (3). – P. 148-151.
5. Чанчиков Г.Ф. Влияние умеренной локальной гипотермии на офтальмотонус, зрительные функции и гидродинамику глаз больных глаукомой / Г.Ф. Чанчиков, З.П. Завольская, В.И. Березникова // *Офтальмол. журнал.* – 1978. – № 8. – С. 594-597.
6. Лазаренко В.И. Влияние умеренной локальной гипотермии на гемо- и гидродинамические показатели здоровых глаз/ В.И. Лазаренко, Г.Ф. Чанчиков, И.М. Корниловский, В.Г. Гайдабуря - *Офтальмологический журнал*, 1976. - №6. - С. 419-422.
7. Jabbour N.M. Local ocular hypothermia in experimental intraocular surgery / N.M. Jabbour, C.L. Schepens, S.M. Buzney // *Ophthalmology* – 1988. – Vol.95. – P. 1685-1690.

8. Anatyshuk L. Prospects of Temperature Management in Vitreoretinal Surgery / L. Anatyshuk, N. Pasyechnikova, V. Naumenko, R. Kobylanskyi, R. Nazaretyan, O. Zadorozhnyy // Ther. Hypothermia Temp. Manag. – 2020. <https://doi.org/10.1089/ther.2020.0019>
9. Шиф Л.В. Применение локальной гипотермии при остром приступе глаукомы и глаукоме в терминальной стадии, осложнившейся болевым синдромом / Л.В. Шиф, А.В. Таратынова, В.А. Нейман, Н.В. Ангелова // Офтальмол. журнал. – 1981. – № 3. – С. 187-188.
10. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Назаретян Р.Е., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для гіпотермії ока людини // Термоелектрика. – №3. – 2019. – С. 64-73.
11. Anatyshuk L. I., Pasechnikova N. V., Naumenko V. O., Zadorozhnyi O. S., Danyliuk S. L., Navryliuk M. V., Tiumentsev V. A., & Kobylanskyi R. R. (2020). Thermoelectric device for contact cooling of the human eye. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(1), 140-145.
12. Вайль Ю. С. Инфракрасные лучи в клинической диагностике и медико-биологических исследованиях / Ю. С. Вайль, Я. М. Варановский. – Л.: Медицина, 1969. – 239 с.
13. Аветисов С. Э. Применение термографии в офтальмологии / С. Э. Аветисов, И. А. Новиков, Е. Э. Луцевич, Е. С. Рейн // Вестник офтальмологии – 2017. – № 6. – с. 99-104.
14. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Задорожний О.С., Кобилянський Р.Р., Гаврилюк М.В., Назаретян Р.Е., Мирненко В.В. Термоелектричний прилад для вимірювання внутрішньоочної температури // Термоелектрика. – № 3. – 2015. – С. 31-40.
15. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Задорожний О.С., Назаретян Р.Э., Мирненко В.В., Кобилянський Р.Р., Гаврилюк Н.В. Оригинальное устройство и подходы к изучению распределения температуры в различных отделах глаза // Офтальмологический журнал. – № 6. – 2015. – С. 50-53.
16. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Кобилянський Р.Р., Гаврилюк Н.В., Науменко В.А., Мирненко В.В., Назаретян Р.Э., Задорожний О.С. Термоелектрические датчики для регистрации внутриглазной температуры // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології (Sensor Electronics and Microsystem Technologies). – Т. 13. – № 3. – 2016. – С. 30-38.
17. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Задорожний О.С., Кобилянський Р.Р., Назаретян Р.Э., Мирненко В.В., Гаврилюк Н.В. Устройство для интраокулярной термометрии и особенности распределения температуры в различных отделах глаза кролика // Журнал НАМН Украины. – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 103-108.
18. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Кобилянський Р.Р., Прибила А.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Назаретян Р.Е., Мирненко В.В. Комп'ютерне моделювання теплових процесів ока людини // Термоелектрика. – № 5. – 2017. – С. 41-58.
19. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Гаврилюк М.В., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей // Термоелектрика. – № 5. – 2018. – С.52-67.
20. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.А., Задорожний О.С., Кобилянський Р.Р.,

Гаврилюк Н.В. Термоэлектрическое устройство для офтальмотеплометрии и особенности регистрация плотности теплового потока глаза человека // Офтальмологический журнал. – №3. – 2019. – С. 45-51. <http://doi.org/10.31288/oftalmolz201934551>

21. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: / Л.И. Анатычук // Справочник. -К.: Наук. думка. - 1979. - 768 с.
22. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.

Надійшла до редакції 30.07.2020

Анатычук Л.И., *акад. НАН України*^{1,2}

Пасечникова Н.В., *докт. мед. наук,
член-корреспондент НАМН України*³

Науменко В.А., *докт. мед. наук*³

Задорожный А.С., *докт. мед наук*³

Назаретян Р.Э., *Гаврилюк Н.В.*^{1,2}

Тюменцев В.А.¹, Кобылянский Р.Р., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

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

²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина;

³ГУ «Институт глазных болезней и тканевой терапии
имени В.П. Филатова АМН Украины », Одесса, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГЛАЗ ЧЕЛОВЕКА

В работе приведены результаты разработки термоэлектрического прибора для бесконтактного охлаждения глаз человека. Прибор предназначен для лечения острых и хронических заболеваний глаза, снижение внутриглазного давления, уменьшение болевого синдрома и воспалительных процессов глаза. Разработанный термоэлектрический медицинский прибор дает возможность бесконтактно охлаждать структуры глаза, что позволит разработать и внедрить технологию контролируемой локальной терапевтической

гіпотермії в офтальмології. Приведені особливості конструкції приладу, принцип роботи і його технічні характеристики. Бібл. 22, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: термоелектричний прилад, безконтактне охолодження, гіпотермія глаза человека.

L.I. Anatyshuk *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2},
N.V. Pasechnikova *doc. med. sciences, Corresponding Member of the
National Academy of medical sciences of Ukraine*³,
V.O. Naumenko *doc. med. sciences*³,
O.S. Zadorozhnyi *cand. med. sciences*³,
Nazaretian P.E.³, **Havryliuk M.V.**^{1,2},
Tiumentsev V.A.¹, **R.R. Kobylanskyi** *cand. phys.-math. sciences*^{1,2}

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

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³State Institution "The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue
Therapy of the NAMS of Ukraine", Odesa, Ukraine

THERMOELECTRIC DEVICE FOR NON-CONTACT COOLING OF THE HUMAN EYES

The paper presents the results of the development of a thermoelectric device for non-contact cooling of the human eyes. The device is designed for the treatment of acute and chronic eye diseases, reducing intraocular pressure, reducing pain and inflammation of the eye. The developed thermoelectric medical device makes it possible to cool the eye structures without contact, which will allow developing and implementing the technology of controlled local therapeutic hypothermia in ophthalmology. The design features of the device, the principle of its operation and technical characteristics are described. Bibl. 22, Fig. 2, table. 1.

Key words: thermoelectric device, non-contact cooling, hypothermia of the human eye.

References

1. Fisk R.L., Gelfand E.T., Callaghan J.C. (1977). Hypothermic coronary perfusion for intraoperative cardioplegia. *Ann Thorac Surg*, 23, 58-61.
2. McDowall D.G. (1971). The current usage of hypothermia in British neurosurgery. *Br J Anaesth*, 43,

1084 – 1087.

3. Wickham J.E., Hanley H.G., Joeques A.M. (1967). Regional renal hypothermia. *Br J Urol*, 39, 727 – 743.
4. Katsimpris J. M., Xirou T., Paraskevopoulos K., et al. (2003). Effect of local hypothermia on the anterior chamber and vitreous cavity temperature: in vivo study in rabbits. *Klin. Monbl. Augenheilkd*, 220 (3), 148-151.
5. Chanchikov G.F., Zavolskaya Z.P., Bereznikova V.I. (1978). Vliianiie umerennoi lokalnoi hipotermii na ophtalmotonus, zritelnyie funktsii i gidrodinamiku glaz bolnykh glaukomoj [Influence of moderate local hypothermia on intralocular tension, visual functions and hydrodynamics of patients ill with glaucoma]. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 8, 594-597 [in Russian].
6. Lazarenko V.I., Chanchikov G.F., Kornilovskii I.M., Gaidabura V.G. (1976). Vliianiie umerennoi lokalnoi hipotermii na hemo- i hidrodinamicheskie pokazateli zdorovykh glaz [Influence of moderate local hypothermia on the hemo-and hydrodynamic parameters of healthy eyes]. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 6, 419-422 [in Russian].
7. Jabbour N.M., Schepens C.L., Buzney S.M. (1988). Local ocular hypothermia in experimental intraocular surgery. *Ophthalmology*, 95, 1685-1690.
8. Anatyshuk L., Pasechnikova N., Naumenko V., Kobyljanskyi R., Nazaretyan R., Zadorozhnyy O. (2020). Prospects of temperature management in vitreoretinal surgery. *Ther. Hypothermia Temp. Manag.* <https://doi.org/10.1089/ther.2020.0019>
9. Shif L.V., Taratynova A.V., Neiman V.A., Angelova N.V. (1981). Primeneniie lokalnoi gipotermii pri ostrom pristupe glaukomy i glaukome v terminalnoi stadii, oslozhnivsheisia bolevym sindromom [The use of local hypothermia in an acute attack of glaucoma and glaucoma in the terminal stage, complicated by pain]. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 3, 187-188 [in Russian].
10. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Nazaretian R.E., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A., Kobyljanskyi R.R. (2019). Thermoelectric device for hyperthermia of the human eye. *J. Thermoelectricity*, 3, 64-73.
11. Anatyshuk L. I., Pasechnikova N. V., Naumenko V. O., Zadorozhnyi O. S., Danyliuk S. L., Havryliuk M. V., Tiumentsev V. A., & Kobyljanskyi R. R. (2020). Thermoelectric device for contact cooling of the human eye. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(1), 140-145.
12. Vail Yu.S., Varanovskii Ya.M. (1969). *Infrakrasnyie luchy v klinicheskoi diagnostike i mediko-biologicheskikh issledovaniiah* [Infrared rays in clinical diagnostics and biomedical research]. Leningrad: Meditsina [in Russian].
13. Avetisov S.E., Novikov I.A., Lutsevich Ye.E., Reyn E.S. (2017). Primeneniie termografii v oftalmologii [The use of thermography in ophthalmology]. *Vestnik oftalmologii – Bulletin of Ophthalmology*, 6, 99-104 [in Russian].
14. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Zadorozhnyi O.S., Kobyljanskyi R.R., Havryliuk M.V., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V. (2015). Thermoelectric device for measurement of intraocular temperature. *J. Thermoelectricity*, 3, 31-40.

15. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Zadorozhnyi O.S., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V., Kobylanskyi R.R., Havryliuk N.V. (2015). Originalnoie ustroistvo i podkhody k izucheniiu raspredeleniia temperatury v razlichnykh otdelakh glaza [Original device and approaches to studying the temperature distribution in different parts of the eye]. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 6, 50-53 [in Russian].
16. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Kobylanskyi R.R., Havryliuk N.V., Naumenko V.A., Mirnenko V.V. Nazaretian R.E., Zadorozhnyi O.S. (2016). Termoelektricheskiie datchiki dlia registratsii vnutriglaznoi temperatury [Thermoelectric sensors for registration of intraocular temperature]. *Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnologii - Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 13(3), 30-38 [in Russian].
17. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Zadorozhnyi O.S., Kobylanskyi R.R., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V., Havryliuk N.V. (2016). Ustroistvo dlia intraokuliarnoi termometrii i osobennosti raspredeleniia temperatury v razlichnykh otdelakh glaza krolika [A device for intraocular thermometry and features of temperature distribution in various chambers of the rabbit's eye]. *Zhurnal Natsionalnoi Akademii Medychnykh Nauk Ukrainy - J. of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine*, 22(1), 103-108 (in Russian).
18. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Kobylanskyi R.R., Prybyla A.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V. (2017). Computer simulation of thermal processes in human eye. *J. Thermoelectricity*, 5, 41-58.
19. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Havryliuk M.V., Kobylanskyi R.R. (2018). Thermoelectric device for determination of heat flux from the surface of eyes. *J. Thermoelectricity*, 5, 52-67.
20. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.A., Zadorozhnyi O.S., Kobylanskyi R.R., Havryliuk N.V. (2019). Termoelektricheskoe ustroistvo dlia oftalmoteploimetrii i osobennosti registratsii plotnosti teplovogo potoka glaza cheloveka [Thermoelectric device for ophthalmothermometry and features of registration of heat flux density of the human eye]. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 3, 45-51 [in Russian]. <http://doi.org/10.31288/oftalmolzh201934551>
21. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiie ustroistva. Spravochnik (Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook)*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
22. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskiie prepobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters]*. Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].

Submitted 30.07.2020

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Прибила А.В. *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}
Кібак А.М.¹

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ КОНДИЦІОНЕРИ ДЛЯ СИДІНЬ АВТОТРАНСПОРТУ

У роботі розглядаються перспективи використання термоелектричного кондиціонування сидінь автотранспорту, якими може бути здійснена економія енергетичних ресурсів та покращення температурних умов перебування людини у транспортному засобі. Для визначення найбільш раціональних варіантів використання даних кондиціонерів здійснено їх класифікацію в залежності від способу термоелектричного кондиціонування. Бібл. 30, рис. 4.

Ключові слова: термоелектричний кондиціонер, термоелектричний тепловий насос, кондиціонування, теплові умови.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. В останні десятиліття кількість транспортних засобів стрімко зростає. За даними аналітичної компанії Navigant Research на сьогодні їх чисельність перевищила 1.2 млрд. одиниць, а до кінця 2035 року показник може досягнути 2 млрд [1]. При цьому через інтенсивність руху транспорту люди проводять в ньому все більшу частину свого часу. З цієї причини виникає необхідність у забезпеченні оптимального теплового комфорту людини при перебуванні у транспортному засобі, а отже і потреба у створенні кондиціонерів.

У роботах [2 – 8] розглядаються різні методи кондиціонування повітря у транспортних засобах, кожний із яких має свої переваги та недоліки. Так у роботі [8] було наведено порівняння використання компресійних та термоелектричних кондиціонерів та показано переваги кожного в залежності від кліматичних умов. Незважаючи на різні методи кондиціонування, спільним є те, що кондиціонування відбувається для всього об'єму транспорту. Це призводить до збільшення затрат електроенергії та виникнення проблеми пов'язаної із розподілом повітряного потоку, оскільки водії чи пасажери відчують комфорт для тих частин тіла, які безпосередньо звернені до випускного отвору кондиціонера. При цьому звичайні сидіння будуть виконувати функцію

ізолятора, зменшуючи охолодження тіла, запобігаючи випаровуванню поту та підвищуючи температуру шкіри при контакті з поверхнею сидіння [9].

Для вирішення вказаних проблем доцільно використовувати локальне кондиціонування, а саме кондиціонування сидіння автотранспорту. Такий варіант дозволить забезпечувати комфортні умови при менших затратах електроенергії та вирішити проблему пов'язаної із розподілом повітряного потоку.

У літературі наведені різні варіанти кондиціонування сидінь транспортних засобів [10 – 15], серед яких широкого використання набуло кондиціонування із використанням термоелектричних перетворювачів. Це пов'язано із наявністю у таких перетворювачів низки переваг, а саме: висока надійність, можливість забезпечення і охолодження і нагріву, відсутність шкідливих холодоагентів, низька вартість технічного обслуговування, можливість регулювання температури у широкому діапазоні [16]. При цьому особливий інтерес викликає можливість застосування термоелектричного кондиціонування операторів бронемашин, зокрема танків, що дозволить оптимізувати теплові умови перебування танкістів під час виконання бойових дій.

Зважаючи на викладене, є важливим розглянути відомі методи здійснення термоелектричного кондиціонування сидінь транспорту для подальшого виокремлення найбільш раціональних варіантів. Останнє зводиться до вивчення та аналізу відомих варіантів термоелектричних кондиціонерів для сидінь транспорту та їх класифікація за тепловою схемою.

Аналіз літератури. Роботи на створення термоелектричних кондиціонерів для сидінь автотранспорту вже активно проводяться у багатьох країнах світу. Так у [17] було розроблено сидіння із контрольованою температурою, що працює від вихлопної термоелектричної системи рекуперації тепла. Проведено серію експериментів, включаючи стендові та реальні випробування транспортного засобу, які показали, що термоелектрична система змогла знизити температуру поверхні сидіння на 14.59 %, після того, як сидіння з контрольованою температурою працювало протягом 10 хв.

У роботі [18] створена термоелектрична системи, яка використовувалася для кліматичного контролю сидінь автомобіля. Експериментальні результати показали, що система знижує температуру повітря, що перекачується до сидіння, приблизно на 9 °С при коефіцієнті продуктивності приблизно $\epsilon=0,41$, тоді як результати режиму нагріву показали, що пристрій може підвищити температуру повітря приблизно на 34 °С при $\epsilon=1,34$.

У [19] змодельований та сконструйований термоелектричний пристрій для регулювання температури поверхні автомобільного сидіння. Результати випробувань показали, що при напрузі 12 В термоелектрична система дозволяє знизити температуру сидіння приблизно на 18 °С в режимі охолодження та підвищити її на 22 °С в режимі нагріву.

У [20] розроблено автоматизовану систему охолодження сидінь для автомобілів із застосуванням термоелектричного пристрою, яка спрямована на запобігання загибелі та травматизму маленьких дітей, залишених без нагляду у припаркованих автомобілях, при високій температурі

навколишнього середовища. Експериментальна серія випробувань показала високу ефективність системи.

У [21] розроблено та випробувано сидіння із змінною температурою із використанням термоелектричного охолоджувача для підвищення теплового комфорту та зниження витрат палива. Експериментальні результати показали, що при температурі навколишнього середовища 27 °С така система може видаляти приблизно 33,3 Вт потужності з кондиціонованого повітря, що перекачується на сидіння.

У роботі [22] застосували оптимальний метод проектування для розробки термоелектричного кондиціонування повітря-рідина і змогли отримати коефіцієнт продуктивності 1,68 при однаковій вхідній потужності. Цей оптимальний метод проектування використовував розмірний аналіз для оптимізації поданого струму та геометричного співвідношення термоелемента (або кількості пар термоелементів) одночасно для заданого набору фіксованих параметрів.

У [23] розроблена та протестована термоелектрична система регулювання температури автомобільного сидіння для забезпечення швидкого охолодження та нагріву. Експериментальні випробування показали, що термоелектрична система дає перевагу у прискоренні охолодження автомобільного сидіння від 50 °С до приблизно 6 °С із значним часом відгуку.

Всі перераховані термоелектричні варіанти кондиціонування сидінь транспорту мають свої переваги та недоліки. Враховуючи те, що потреба у подальших дослідженнях пов'язаних із використанням термоелектричного кондиціонування буде тільки зростати, виникає необхідність у класифікації та систематизації відомих варіантів такого кондиціонування із наступним визначенням більш раціональних.

Мета пропонованої роботи - аналіз відомих варіантів термоелектричних кондиціонерів для сидінь автотранспорту та визначення їх найбільш раціональних варіантів.

Компанії, що займаються виготовленням серійних зразків кондиціонерів для сидінь автотранспорту

Одним із лідерів у сфері термоелектричного кондиціонування сидінь транспорту є американська компанія *Gentherm Incorporated*, у минулому *Amerigon* [24]. Компанія створила першу у світі систему сидінь із термоелектричним нагрівом та охолодженням для автомобільної промисловості. Розроблена система отримала назву «Клімат-контроль для сидіння» і була вперше прийнята у *Ford Motor Company* у якості опції модельного *Lincoln Navigator 2000*. Сьогодні ця система доступна у більше як 50 автомобілях, таких як *Ford*, *General Motors*, *Toyota* (*Lexus*), *Kia*, *Hyundai*, *Nissan* (*Infinity*), *Range Rover*, *Jaguar Land Rover* та ін.

В одній із запатентованих технологій компанії система клімат контролю включає термоелектричний прилад, основа якого металічна пластина, яка нагрівається із однієї сторони і охолоджується із іншої [14]. Здійснення теплообміну між теплом, що генерується або поглинається елементом Пельтьє і повітрям, що передається від вентилятора, відбувається

завдяки теплообмінникам. Корпус, в якому розміщені елементи Пельтьє і теплообмінник, включає в себе спеціальні частини, які з'єднанні із трубкою для подачі повітря від вентилятора в регулятор температури сидіння та для з'єднання із випускною трубою.

На сьогодні *Gentherm Incorporated* є провідною компанією у світі не тільки по термоелектричному охолодженню та нагріву сидіння автомобілів, а і однією із найкращих серед своїх конкурентів, які використовують інші шляхи кондиціонування. Компанія співпрацює із майже всіма відомими автомобільними виробниками, тому, в залежності від необхідності, має різноманітні варіанти своєї продукції. В даний час компанія володіє багатьма патентами на термоелектричне охолодження/нагрів сидіння автомобілів.

Індійська компанія *Dhama Innovations* розробила систему термоелектричного контролю температури для сидінь автомобілів [25]. Продукт отримав назву *Dhama Comfort* і представляє собою сидіння із регулюванням температури, яке підключається до батареї автомобіля. Користувач може регулювати рівень температури у будь-якому режимі. Робота *Dhama Comfort* заснована на технології *Climacon*, що представляє собою невеликі блоки, які складаються із термоелектричного модуля та спеціально розроблених радіаторів. Такі блоки розміщують у сидінні, що дозволяє забезпечити тепловий комфорт у будь-якому місці. На сьогодні сидіння компанії *Dhama Innovations* встановлено у багатьох легкових та вантажних автомобілів. Дослідження показали, що при застосуванні таких сидінь не тільки створюються оптимальні температурні умови, а також водії відчують меншу втоми, що дозволяє їм довше керувати транспортом.

Широкого використання набуло використання спеціальних чохлів (подушок) на сидіння автомобілів. Така продукція не потребує значних затрат і підходить до будь-яких типів автомобільних сидінь. Найбільшим попитом серед подушок користується продукція пекінської компанії *Huimao Cooling Equipment Co., Ltd* [26]. Компанія працює на світовому ринку із 1996 року і спеціалізується на дослідженнях, розробці та виготовленні термоелектричних модулів охолодження та комплектуючих деталей.

Американська компанія *Arizon Line-X* також розробляє подушки для сидіння водіїв [27]. Їх розробки дозволяють знизити споживання палива. За підрахунками компаній така економія, у майбутньому, зможе навіть відшкодувати затрати на придбання подушки для сидіння. У комплекті також є адаптер для розетки змінного струму, щоб його можна було використовувати в офісі або вдома.

Ще одна американська компанія *Tempronics* була заснована із винаходом **Climate Ribbon** [28]. Спочатку вона сфокусувалася на розробці та патентуванні технології, а далі перейшла на ринок. Головний продукт - персональна кліматична система *Tempronics, PCS 200*. Це термоелектрична технологія, що дозволяє підтримувати комфортну температуру у вигляді персонального чохла для охолодження чи нагріву, який використовується в автомобілях.

Класифікація термоелектричних кондиціонерів для сидінь автотранспорту

У пропонованій роботі класифікація термоелектричних кондиціонерів для сидінь автотранспорту здійснюється за двома головними ознаками: спосіб охолодження чи нагріву (повітряний або рідинний) та спосіб відведення небажаного відпрацьованого тепла (в кабінку автомобіля чи поза транспортним засобом).

Схема А. Перший варіант класифікації зображений на рис. 1. Розглядається термоелектричне кондиціювання сидіння із використанням повітряного охолодження при відведенні небажаного відпрацьованого тепла у кабінку автомобіля.

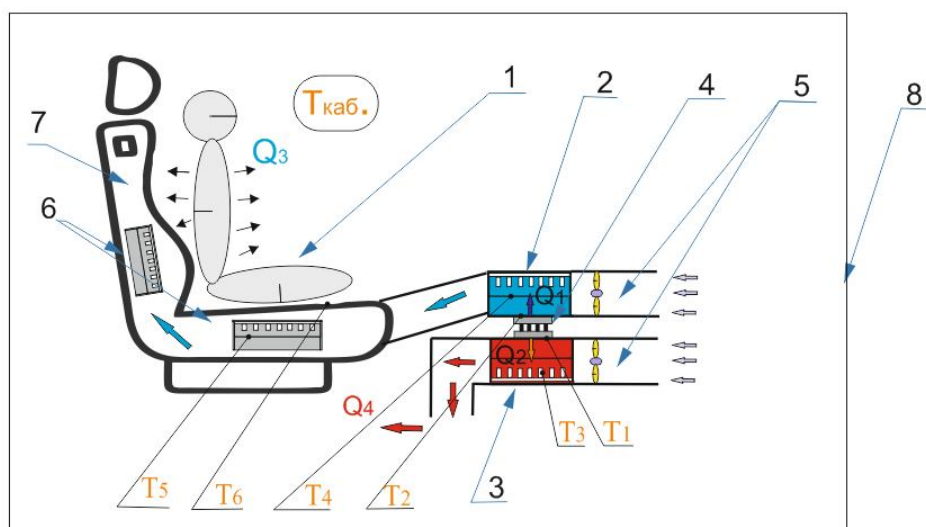


Рис. 1. Варіант термоелектричного кондиціювання сидіння із використанням повітряного охолодження при відведенні тепла у кабінку автомобіля: 1 – схематичне зображення пасажирів, 2 – радіатор холодного контуру, 3 – радіатор гарячого контуру, 4 – термоелектричні модулі, 5 – повітряні вентилятори, 6 – повітряні радіатори, 7 – схематичне зображення транспортного сидіння, 8 – схематичне зображення кабіни автомобіля.

$T_{каб}$ – температура всередині кабіни, T_1 – температура гарячої сторони модуля, T_2 – температура холодної сторони Т/І модуля, T_3 – температура на гарячому радіаторі, T_4 – температура на холодному радіаторі, T_5 – температура на повітряних радіаторах, T_6 – температура на поверхні сидіння, Q_1 – тепловий потік з холодної сторони т/І модуля, Q_2 – тепловий потік із гарячої сторони Т/І модуля, Q_3 – тепловий потік із тіла пасажирів, Q_4 – тепловий потік виділяється у кабінку.

Схема А працює у режимі охолодження. Для переходу у режим нагріву потрібно лише змінити напрямок подання електричного струму на термоелектричні модулі. У даному режимі вентилятори 5 нагнітають повітря через радіатори 2 та 3, які розсіюють холодний та гарячий

тепловий потік із термоелектричних модулів 4. Охолоджене повітря проходить через систему повітропроводів до сидіння 7, де через радіатори 6 виходить через поверхню сидіння охолоджуючи при цьому пасажира. Нагріте повітря відводиться через спеціальну систему каналів безпосередньо у кабіну. При цьому температура всередині кабіни не буде суттєво змінюватися, а ефект охолодження чи нагріву буде мати місце лише для людей, які знаходяться на сидінні.

У роботах [13 – 15] використано описаний метод здійснення кондиціонування сидінь, але із певними варіаціями самої конструкції термоелектричної системи. Так, наприклад, у [11] описано схему, яка складається із теплового насоса заднього сидіння, який регулює температуру повітря, що проходить через спинку сидіння, та теплового насоса нижнього місця сидіння для кондиціонування повітря, що проходить через нижню частину сидіння. Ці два насоси містять термоелектричний пристрій, основний теплообмінник та теплообмінники для відпрацьованого тепла. До одного кінця кожного основного теплообмінника приєднаний вихід з головного вентилятора, який служить для передачі кондиціонованого повітря до спинки чи нижньої частини сидіння. Випускний кінець кожного головного теплообмінника з'єднаний з повітропроводом, який, у свою чергу, з'єднаний з відповідним входом повітря на заднє сидіння або входом повітря в нижній частині сидіння. До одного кінця кожного теплообмінника для відпрацьованого тепла прикріплений вихід від вентилятора, який служить для передачі небажаного відпрацьованого тепла у зовнішнє середовище. До сторони основного теплообмінника у кожному тепловому насосі прикріплені температурні датчики. Кожен температурний датчик може містити електричну термопару.

Схема Б. Другий варіант класифікації зображений на рис. 2. Розглядається термоелектричне кондиціонування сидіння із використанням повітряного охолодження при відведенні небажаного відпрацьованого тепла у навколишнє середовище поза транспортним засобом.

Принцип роботи схеми Б аналогічний до схеми А і відрізняється лише тим, що небажане відпрацьоване тепло відводиться не у середину, а поза кабіну автомобіля. Також на вхідній стороні повітропроводу для небажаного тепла є можливість розміщення входу для подачі повітря поза транспортним засобом. Перевагою такого способу є те, що температура всередині транспорту може змінюватися, оскільки небажане тепло буде викидатися у навколишнє середовище. Незважаючи на це, серед розглянутої літератури зовсім невелика частина робіт використовує дану схему кондиціонування. В основному це пов'язано із складністю реалізації додаткових отворів.

У роботі [29] описано термоелектричний кондиціонер для сидіння транспортного засобу із використанням схеми Б. Одна з основних частин такого кондиціонера включає в себе електричний вентилятор та термоелектричний блок. Передбачено повітропровід та вентилятор. На вхідній стороні повітропроводу наявні входи для подачі повітря поза транспортним засобом і внутрішні впускні отвори для подачі повітря всередині транспортного засобу. Співвідношення

змішування зовнішнього і внутрішнього повітря перемикається відповідними демпферами. Описаний кондиціонер керується блоком управління, на який подаються сигнали від датчиків температури. В одному із аспектів застосування винаходу передбачений відвід небажаного відпрацьованого тепла поза транспортним засобом.



Рис. 2. Варіант термоелектричного кондиціонування сидіння із використанням повітряного охолодження при відведенні тепла у навколишнє середовище поза транспортним засобом: 1 – схематичне зображення пасажирів, 2 – радіатор холодного контуру, 3 – радіатор гарячого контуру, 4 – термоелектричні модулі, 5 – повітряні вентилятори, 6 – повітряні радіатори, 7 – схематичне зображення транспортного сидіння, 8 – схематичне зображення кабіни автомобіля. $T_{каб.}$ – температура всередині кабіни, T_1 – температура гарячої сторони модуля, T_2 – температура холодної сторони T/l модуля, T_3 – температура на гарячому радіаторі, T_4 – температура на холодному радіаторі, T_5 – температура на повітряних радіаторах, T_6 – температура на поверхні сидіння, Q_1 – тепловий потік з холодної сторони т/l модуля, Q_2 – тепловий потік із гарячої сторони T/l модуля, Q_3 – тепловий потік із тіла пасажирів, Q_4 – тепловий потік виділяється поза кабіну.

Схема В. Наступний варіант класифікації зображений на рис. 3. Розглядається термоелектричне кондиціонування сидіння із використанням рідинного охолодження при відведенні небажаного відпрацьованого тепла у кабіну автомобіля.

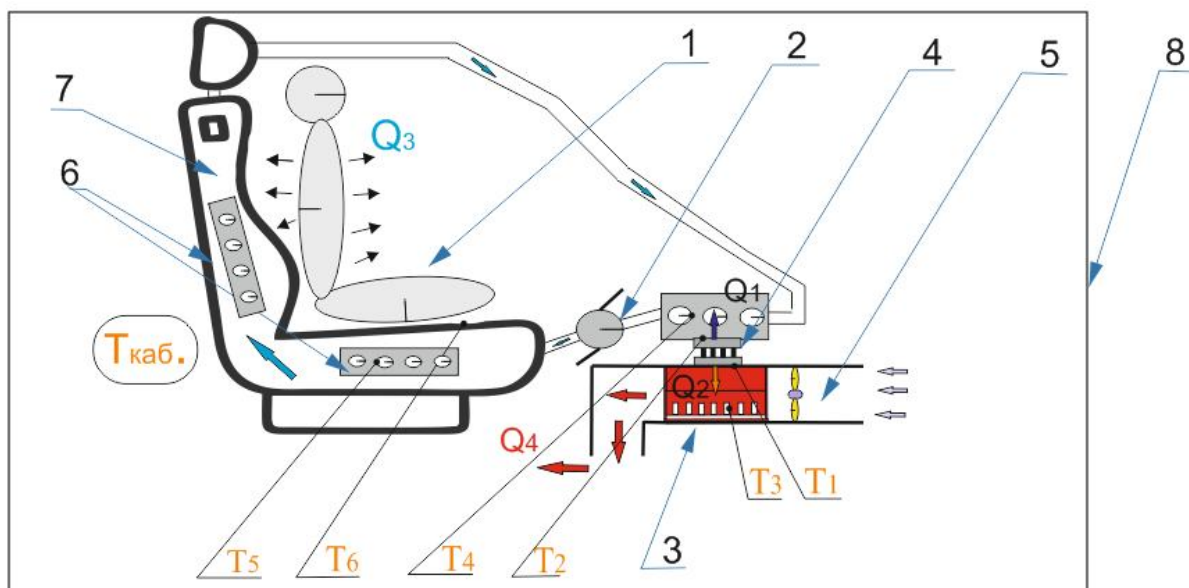


Рис. 3. Варіант термоелектричного кондиціонування сидіння із використанням рідинного охолодження при відведенні тепла у кабінку автомобіля: 1 – схематичне зображення пасажирів, 2 – рідинний насос, 3 – радіатор гарячого контуру, 4 – термоелектричні модулі, 5 – повітряний вентилятор, 6 – елементи системи охолодження, 7 – схематичне зображення транспортного сидіння. 8 – схематичне зображення кабінки автомобіля. $T_{каб.}$ – температура всередині кабінки, T_1 – температура гарячої сторони модуля, T_2 – температура холодної сторони Т/І модуля, T_3 – температура на гарячому радіаторі, T_4 – температура на холодному радіаторі, T_5 – температура на повітряних радіаторах, T_6 – температура на поверхні сидіння, Q_1 – тепловий потік з холодної сторони т/І модуля, Q_2 – тепловий потік із гарячої сторони Т/І модуля, Q_3 – тепловий потік із тіла пасажирів, Q_4 – тепловий потік відводиться у кабінку.

Різниця принципу дії такого кондиціонування, від розглянутих раніше, полягає у наявності рідинної системи охолодження. Термоелектричні модулі охолоджують (чи нагрівають) рідину, яка за допомогою рідинного насоса циркулює по замкненій системі. Охолоджена (або нагріта) рідина проходить через сидіння створюючи необхідні температурні умови для водіїв чи пасажирів. Небажане тепло відводиться у кабінку автомобіля.

У [30] описано спеціальну систему обігріву та охолодження для сидіння, яка працює подібним чином. Система складається із термоелектричного пристрою, який вибірково охолоджує чи нагріває теплообмінник, наповнений рідиною. Рідина всмоктується насосом через котушку на сидінні. Котушка передає тепло, проводячи його через сидіння до пасажирів.

Контролер дозволяє вибрати температуру нагріву чи охолодження. Вимикач визначає полярність напруги, поданої на термоелектричний прилад.

Схема Г. Останній варіант класифікації зображений на рис. 4. Розглядається термоелектричне кондиціювання сидіння із використанням рідинного охолодження при відведенні небажаного відпрацьованого тепла у навколишнє середовище поза транспортним засобом.

Принцип роботи схеми Г аналогічний до схеми В і відрізняється лише тим, що небажане відпрацьоване тепло відводиться поза кабіну автомобіля. Також на входній стороні повітропроводу для небажаного тепла є можливість розміщення входу для всмоктування повітря поза транспортним засобом. Такий варіант кондиціювання майже не розглядається у науковій літературі, незважаючи на те, що він є найбільш ефективним при кондиціюванні. В основному це пов'язано із складністю у процесі реалізації.

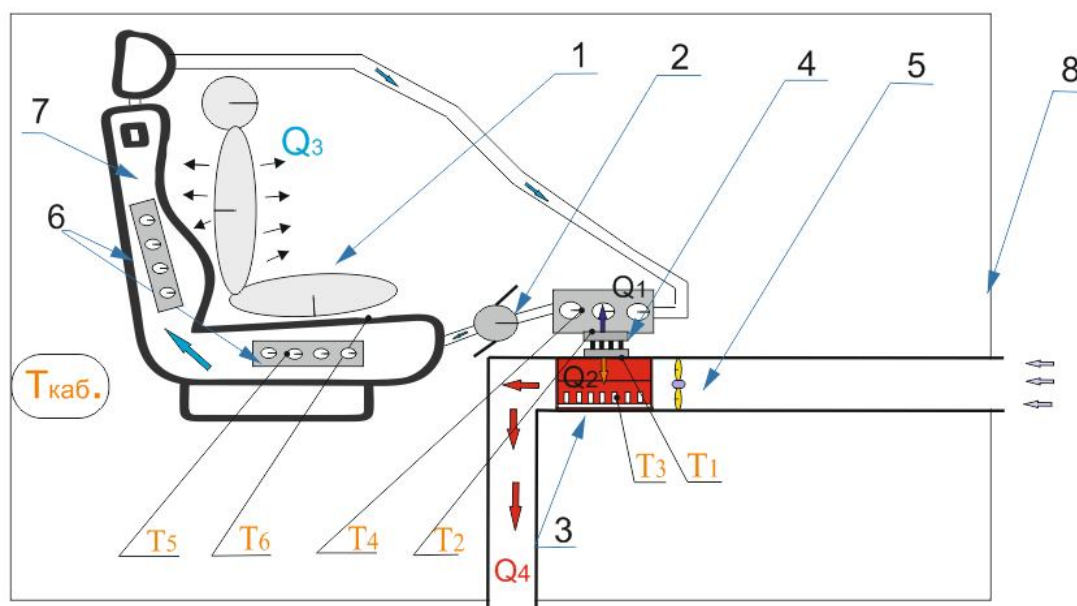


Рис.4. Варіант термоелектричного кондиціювання сидіння із використанням рідинного охолодження при відведенні тепла у навколишнє середовище поза транспортним засобом: 1 – схематичне зображення пасажирів, 2 – рідинний насос, 3 – радіатор гарячого контуру, 4 – термоелектричні модулі, 5 – повітряний вентилятор, 6 – елементи системи охолодження, 7 – схематичне зображення транспортного сидіння. 8 – схематичне зображення кабіни автомобіля. $T_{каб}$ – температура всередині кабіни, T_1 – температура гарячої сторони модуля, T_2 – температура холодної сторони т/л модуля, T_3 – температура на гарячому радіаторі, T_4 – температура на холодному радіаторі, T_5 – температура на повітряних радіаторах, T_6 – температура на поверхні сидіння, Q_1 – тепловий потік з холодної сторони т/л модуля,

Q_2 – теплової потік із арычої стороны T/l модуля, Q_3 – тепловий потік із тіла пасажира

Q_4 – тепловий потік виділяється поза кабіну.

Аналіз найбільш раціональних варіантів термоелектричних кондиціонерів для сидінь автотранспорту

Із аналізу літератури та класифікації схем термоелектричного кондиціонування, що описані у попередньому розділі, можна зробити ряд важливих висновків. Найбільш поширеним у використанні є варіант схеми А – термоелектричне кондиціонування сидіння із використанням повітряного охолодження при відведенні тепла у кабіну автомобіля. Це зумовлено простотою реалізації такої схеми, оскільки такий термоелектричний кондиціонер є універсальним і автономним та не потребує додаткових змін у конструкції автомобіля. Проте у такої схеми є і недоліки. Найбільший з них пов'язаний із тим, що загальна ефективність охолодження буде меншою ніж у варіантах схем Б та Г, оскільки відпрацьоване тепло не буде відводитися у оточуюче середовище, а призводитиме до невеликого зростання загальної температури всередині об'єму автомобіля.

Кондиціонер, який працює за варіантом схеми Г, має найбільшу ефективність. Його перевага над варіантом схеми В полягає у відведенні відпрацьованого тепла поза межі транспорту, а переваги над варіантами схеми А та Б у більшій ефективності вибраного способу охолодження. При цьому такий варіант є найбільш складним у реалізації, оскільки до габаритної системи рідинного охолодження потрібно ще додатково реалізовувати спеціальні отвори для відпрацьованого тепла. Тому на сьогодні такий спосіб кондиціонування комерційно не реалізований, хоча ведуться наукові дослідження для впровадження його у виробництво.

В залежності від самого процесу реалізації термоелектричного кондиціонування для сидінь автомобілів є два найбільш доцільних варіанти. Якщо пріоритетним при виробництві такого кондиціонера є його автономність і відсутність прив'язки до конкретної конструкції транспортного засобу, то найкращий варіант за схемою А. При цьому потрібно розуміти втрати у ефективності такого кондиціонера.

Найбільш доцільним з позиції енергетичної ефективності є варіант схеми Г, проте в такому випадку необхідно проводити конструювання і оптимізацію термоелектричного кондиціонера спільно із розробкою самого транспортного засобу.

Висновки

1. Визначено найбільш раціональні варіанти термоелектричних кондиціонерів для сидінь транспортних засобів.
2. Використання варіанту схеми А є найбільш раціональним при розробці автономної та універсальної системи кондиціонування, яка може бути використана для будь-якого сидіння існуючого автомобіля. Це дозволить забезпечити масове використання таких кондиціонерів.

3. Найбільш доцільним з позиції енергетичної ефективності є варіант схеми Г, проте в такому випадку необхідно проводити конструювання і оптимізацію термоелектричного кондиціонера спільно із розробкою самого транспортного засобу.

Література

1. <https://www.autonews.ru/news/5c9114d69a7947491f827c6e>
2. Lee M.Y. Lee, D.Y. (2013). Review on conventional air conditioning, alternative refrigerants and CO₂ 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. *Refrig. Air Cond.*, 14, 5–10
5. Qi Z.G. (2014). Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 38, 754–764.
6. 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.
7. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // Термоелектрика. – № 2. – 2003. – С. 52 – 56.
8. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про ефективність термоелектричних кондиціонерів для транспортних засобів // Термоелектрика - №1. - 2019. – С. 86 – 94.
9. Chuqi Su, Wenbin Dong, Yadong Deng, Yiping Wang. Numerical and Experimental Investigation on the Performance of a Thermoelectric Cooling Automotive Seat // *Journal of Electronic Materials* – 2017; DOI: 10.1007/s11664-017-5960-4
10. Pat US6119463A. - Thermoelectric heat exchanger / Lon E. Bell. – Pub. Date: 2001.
11. Pat US5524439A. - Variable temperature seat climate control system / David F. Gallup, David R. Noles, Richard R. Willis. – Pub. Date: 1993.
12. Pat US20050161193A1. - Seat heating and cooling system / Chris McKenzie, Danny Bates. – Pub. Date: 2004.
13. Pat US7827805B2. - Seat climate control system / Brian Comiskey, John Terech. – Pub. Date: 1998.
14. Pat US5924766A. - Temperature conditioner for vehicle seat / Hidenori Esaki, Tomohide Kudo, Takeshi Shiba. – Pub. Date: 1998
15. Pat US4923248A. - Cooling and heating seat pad construction / Steve Feher. – Pub. Date: 1988.
16. Pat US5921314A. - Conditioned seat / Ferdinand Schuller, Hans-Georg Rauh, Gunter Lorenzen, Michael Weiss. – Pub. Date: 1996.
17. H. Du, Y.P. Wang, X.H. Yuan, Y.D. Deng, C.Q. Su. Experimental Investigation of a Temperature-Controlled Car Seat Powered by an Exhaust Thermoelectric Generator // *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 3, 2016

18. Abdulmunaem Elarysi, Alaa Attar, Hosung Lee. Analysis and Experimental Investigation of Optimum Design of Thermoelectric Cooling/Heating System for Car Seat Climate Control (CSCC) // Journal of Electronic Materials – 2017; DOI: 10.1007/s11664-017-5854-5
19. H.S. Choi, S. Yun, and K.I. Whang, Appl. Therm. Eng. 27, 2841 (2007).
20. M. Vinoth and D. Prema, in 2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), vol. 188 (2014).
21. Steve Feher. Thermoelectric Air Conditioned Variable Temperature Seat (VTS) and Effect Upon Vehicle Occupant Comfort, Vehicle Energy Efficiency, and Vehicle Environmental Compatibility // SAE Technical Paper, 931111 (1993).
22. Alaa Attar, Housung Lee, Sean Weera. Experimental Validation of the Optimum Design of an Automotive Air-to-Air Thermoelectric Air Conditioner (TEAC) // Journal of Electronic Materials – 2015; DOI: 10.1007/s11664-015-3750-4
23. M. Menon, H. Harry Asada. Iterative Learning Control of Shape Memory Alloy Actuators with Thermoelectric Temperature Regulation for a Multifunctional Car Seat // Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006.
24. <https://www.gentherm.com/en/home>
25. <https://www.dhamainnovations.com/seating>
26. <http://www.huimao.com/about/show.php?lang=en&id=2>
27. <http://arizonaline-x.com/about.html>
28. <https://tempronics-pcs.com/>
29. Pat JP3637395B2. - Vehicle air conditioner and seat heating / cooling device / David Knolls, Yoshihiko Hotta. – Pub. Date: 1997.
30. Pat US5117638A. - Selectively cooled or heated seat construction and apparatus for providing temperature conditioned fluid and method therefor / Steve Feher. – Pub. Date: 1991.

Надійшла до редакції 13.08.2020

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

Прибила А.В. *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

Кібак А.М.¹

¹Інститут термоелектричества НАН и МОН України,

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

e-mail: anatysh@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет

им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,

Черновцы, 58012, Украина

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДИЦИОНЕРЫ ДЛЯ СИДЕНИЙ АВТОТРАНСПОРТА

В работе рассматриваются перспективы использования термоэлектрического кондиционирования сидений автотранспорта, при помощи которого могут быть осуществлены экономия энергетических ресурсов и улучшение температурных условий пребывания человека в транспортном средстве. Для определения наиболее рациональных вариантов использования данных кондиционеров осуществлена их классификация в зависимости от способа термоэлектрического кондиционирования. Библиография 30, рис. 4.

Ключевые слова: термоэлектрический кондиционер, термоэлектрический тепловой насос, кондиционирование, тепловые условия.

Anatychuk L.I., *Academician of the NAS of Ukraine*^{1,2}

Prybyla A.V., *Cand. of Phys. and Math. Sciences*^{1,2}

Kibak A.M.¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com;

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

THERMOELECTRIC AIR CONDITIONERS FOR VEHICLE SEATS

The paper discusses the prospects of thermoelectric air conditioning of vehicle seats, which can be used to save energy resources and improve the temperature conditions of a person's stay in a vehicle. To determine the most rational options for using these air conditioners, their classification was carried out depending on the method of thermoelectric air conditioning. Bibl. 30, Fig. 4.

Key words: thermoelectric air conditioner, thermoelectric heat pump, air conditioning, thermal conditions.

References

1. <https://www.autonews.ru/news/5c9114d69a7947491f827c6e>
2. Lee M.Y., Lee D.Y. (2013). Review on conventional air conditioning, alternative refrigerants and CO₂ 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. *Refrig. Air Cond.*, 14, 5–10
5. Qi Z.G. (2014). Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 38, 754–764.
6. 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.
7. Rozver Yu.Yu. (2003). Thermoelectric air conditioner for vehicles. *J. Thermoelectricity*, 2, 52 – 56.
8. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2019). On the efficiency of thermoelectric air conditioners for vehicles. *J. Thermoelectricity*, 1, 86 – 94.
9. Chuqi Su, Wenbin Dong, Yadong Deng, Yiping Wang. (2017). Numerical and experimental investigation on the performance of a thermoelectric cooling automotive seat. *Journal of Electronic Materials*; DOI: 10.1007/s11664-017-5960-4
10. Pat US6119463A (2001). Lon Bell. Thermoelectric heat exchanger.
11. Pat US5524439A (1993). David F. Gallup, David R. Noles, Richard R. Willis. Variable temperature seat climate control system
12. Pat US20050161193A1 (2004). Chris McKenzie, Danny Bates. Seat heating and cooling system.
13. Pat US7827805B2 (1998). Brian Comiskey, John Terech. Seat climate control system.
14. Pat US5924766A (1998). Hidenori Esaki, Tomohide Kudo, Takeshi Shiba. Temperature conditioner for vehicle seat.
15. Pat US4923248A (1998). Steve Feher. Cooling and heating seat pad construction.
16. Pat US5921314A (1996). Ferdinand Schuller, Hans-Georg Rauh, Gunter Lorenzen, Michael Weiss. Conditioned seat.
17. Du H., Wang Y.P., Yuan X.H., Deng Y.D., Su C.Q. (2016). Experimental investigation of a temperature-controlled car seat powered by an exhaust thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 45(3).
18. Elarysi Abdulmunaem, Attar Alaa, Lee Hosung. (2017). Analysis and experimental investigation of optimum design of thermoelectric cooling/heating system for car seat climate control (CSCC). *Journal of Electronic Materials*; DOI: 10.1007/s11664-017-5854-5
19. Choi H.S., Yun S., and Whang K.I. (2007). *Appl. Therm. Eng.* 27, 2841.
20. Vinoth M. and Prema D. (2014). *2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, vol. 188.
21. Feher Steve (1993). Thermoelectric air conditioned variable temperature seat (VTS) and effect upon vehicle occupant comfort, vehicle energy efficiency, and vehicle environmental compatibility. *SAE Technical Paper*, 931111.

22. Attar Alaa, Lee Hosung, Weera Sean (2015). Experimental validation of the optimum design of an automotive air-to-air thermoelectric air conditioner (TEAC). *Journal of Electronic Materials*; DOI: 10.1007/s11664-015-3750-4
23. Menon M., Asada H. Harry. (2006). Iterative learning control of shape memory alloy actuators with thermoelectric temperature regulation for a multifunctional car seat. *Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis* (Minnesota, USA, June 14-16, 2006).
24. <https://www.gentherm.com/en/home>
25. <https://www.dhamainnovations.com/seating>
26. <http://www.huimao.com/about/show.php?lang=en&id=2>
27. <http://arizonaline-x.com/about.html>
28. <https://tempronics-pcs.com/>
29. Pat JP3637395B2 (1997). David Knolls, Yoshihiko Hotta. Vehicle air conditioner and seat
30. heating / cooling device.
31. Pat US5117638A (1991). Steve Feher. Selectively cooled or heated seat construction and apparatus for providing temperature conditioned fluid and method therefor.

Submitted 13.08.2020

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

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

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

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

Подання рукопису до журналу

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

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

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

До рукопису додається:

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

Вимоги до оформлення статті

Стаття має бути структурована за такими розділами:

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

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

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

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

Статті в журналах

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

Книги

Анатичук Л.І. *Термоелементи и термоэлектрические устройства. Справочник*. 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 Міжнародного форуму по термоелектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновці, 2017. 64 с.

Автореферати дисертацій

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

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

Статті в журналах

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

Книги

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

Патенти

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

Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9th 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].