

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

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

№ 3

2019

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

Л.М. Вихор

Б.І. Стадник

В.В. Лисько

О.Я. Лусте

С.В. Мельничук

О.І. Рогачова

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

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

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

Редактори

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

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

Адреса редакції:

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

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

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

Підписано до друку: 26.07.2019 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

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

© Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України, 2019

ЗМІСТ

Загальні проблеми

- Ріферт В.Г., Анатичук Л.І., Барабаш П.О., Усенко В.І., Стрикун А.П., Соломаха А.С., Петренко В.Г., Серета В.В. Прибила А.В.* Еволюція системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 3. Аналіз локальних і інтегральних характеристик системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом 5

Теорія

- Горський П.В. Мицканюк Н.В.* Про температурні залежності і термоелектричних характеристик перехідного шару телурид вісмуту метал з урахуванням явища перколяції 21
- Снарський А., Юськевич П.* Теорія ефективного середовища для термоелектричних властивостей композитних матеріалів з різними порогами протікання 41

Конструювання

- Прибила А.В. Кібак А.М.* Експериментальне дослідження термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання 53
- Черкез Р.Г., Пожар Е.В., Жукова А.С., Хриков В.К.* Вплив числа каналів на Ефективність проникних термоелементів з метала на основі *Bi-Te-Se-Sb* 58

Термоелектричні вироби

- Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Назаретян Р.Е., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А.* Термоелектричний прилад для гіпотермії ока людини 64
- Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю.* Про деякі варіанти покращення параметрів термоелектричних перетворювачів 74
- Анатичук Л.І., Лисько В.В.* Про можливість використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей 80

УДК 537.32

Риферт В.Г., док. техн. наук¹
Анатичук Л.І., акад. НАН України^{2,3}
Барабаш П.О., канд. техн. наук¹
Усенко В.І., док. техн. наук¹
Стрикун А.П.¹
Соломаха А.С., канд. техн. наук¹
Петренко В.Г., канд. техн. наук¹
Середа В.В., канд. техн. наук¹
Прибила А.В., канд. физ.-мат. наук^{2,3}

¹НТУ «КПІ», вул. Політехнічна, 6, Київ, 03056, Україна;

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatyuch@gmail.com

³Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМИ ВІДЦЕНТРОВОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ ДЛЯ КОСМІЧНИХ МІСІЙ

Частина 3. Аналіз локальних і інтегральних характеристик системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом

У роботі описано методику розрахунків коефіцієнта теплопередачі й ефективності відцентрового дистилятора, а також визначення ефективності термоелектричного теплового насоса. Для цього використано результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів конденсації й випаровування на обертовій поверхні й результати дослідження процесів у рідинно-рідинному термоелектричному тепловому насосі (ТТН). Зроблено порівняння розрахункових значень середнього температурного перепаду $\Delta T_{\text{ср}}$ у ТТН і різниці температур на вході в ТТН ΔT_{in} з експериментальними даними, отриманими при випробуванні відцентрового дистилятора на воді й урині. Бібл. 33, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: термоелектрика, тепловий насос, дистилятор.

Вступ

У найближчі роки такі компанії як НАСА, Spacex, Боїнг та ін. планують довгочасні місії людей на Місяць і Марс. Очевидно, що пілотовані космічні місії за існуючого рівня розвитку космонавтики не можуть бути реалізовані без використання спеціальних систем регенерації води з різних стічних вод життєдіяльності членів екіпажу. Розробка надійних та ефективних систем регенерації води для пілотованих космічних об'єктів дозволить різко знизити витрати на

забезпечення космонавтів водою.

Відсутність земного притягання суттєво утруднює реалізацію багатьох традиційних технологічних процесів, у тому числі дистиляції. З цієї точки зору застосування відцентрових сил (відцентрові дистилятори) є перспективним напрямком для використання в системах життєзабезпечення пілотованих космічних місій. Системи, які ґрунтуються на цьому способі, можуть забезпечити регенерацію води із усіх відомих рідких продуктів життєдіяльності космонавтів (сеча, санітарно-гігієнічна вода, конденсат атмосферної вологи) із забезпеченням високої якості отриманого дистиляту.

В [1 – 7] наведено відомості про 3-х ступінчастий дистилятор з термоелектричним тепловим насосом. В [8-11] показані результати розробки п'ятиступінчастого відцентрового дистилятора (СМЕД з ТТН) і його випробувань на стендах виготовлювача дистилятора – компанії «Термодистиляція», Україна, і Замовника – Honeywell, США. Ці результати, а також деякі методи поліпшення характеристик системи CDS наведено у статтях [12, 13]. Більш докладний огляд праць, присвячених системі з відцентровим дистилятором наведено у 1-й частині статті [14], а опис процесу дослідження – в [15]. Опубліковані результати досить переконливо підтверджують унікальність системи, призначеної для життєзабезпечення пілотованих кораблів у тривалих космічних польотах і на МКС (ISS).

На основі експериментальних даних системи з відцентровим п'ятиступінчастим дистилятором і термоелектричним тепловим насосом (щодо продуктивності, потужності теплового насоса, обертів ротора дистилятора, ступеня концентрування та ін.) у даній праці обґрунтовано метод теоретичного розрахунку різниці температур на вході в ТТН $\Delta T_{in} = (T_{in\ h\ THP} - T_{in\ c\ THP})$ та ефективності ТТН (η_{THP}). Наведено алгоритм обчислення різниці температур на вході в ТТН, основою якого є метод розрахунку коефіцієнтів теплопередачі в кожному ступені дистилятора. Показано вплив різниці температур на вході в ТТН на точність розрахунків та вплив температурної депресії й переохолодження конденсату в холодному контурі на ефективність роботи всієї системи. Проаналізовано алгоритм обчислення $\Delta T_{av} = (T_{in\ h\ THP} + T_{out\ h\ THP})/2 - (T_{in\ c\ THP} + T_{out\ c\ THP})/2$ у ТТН.

Визначення коефіцієнта теплопередачі на щаблі дистилятора.

На рис. 1 наведено ескіз обертового ступеня п'ятиступінчастого дистилятора. Ступінь складається з п'яти частин: 1 – центральна частина, 2, 3 і 4 – диски, розташовані під різними кутами до вісі обертання; 5 – циліндричне кільце. Сумарна площа теплообміну становить 0.07 м². Усього таких ступенів в апараті п'ять.

При підведенні електричної потужності до ТТН рідина в гарячому контурі перегрівається відносно температури насичення й, повернувшись у зону випарювання першого ступеня, частково випаровується на внутрішній поверхні диска. Пара, утворена у першому ступені, пройшовши через сепараційні перегородки, надходить у зону конденсації на зовнішній стороні диску, де, контактуючи з теплообмінною поверхнею другого ступеня, конденсується, передаючи теплоту вихідної рідини до другого ступеня. У результаті частина рідини на внутрішній поверхні у другому ступені випаровується, а отримана пара конденсується на зовнішній стороні третього ступеня й далі, за такою ж схемою, до п'ятого ступеня. Пара в останньому, п'ятому ступені конденсується на стікаючій по поверхні обертового диска плівці технологічного дистиляту, який надходить в апарат з холодного контуру ТТН.

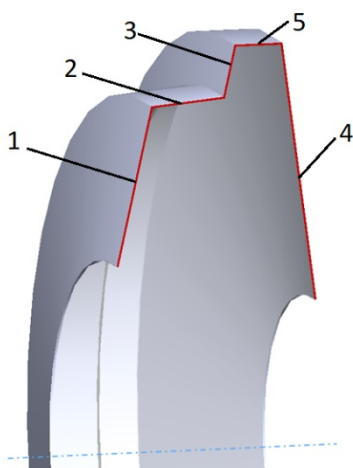


Рис. 1. Профіль теплообмінної поверхні одному щаблі відцентрового дистилятора

Конденсат, утворений в зонах конденсації кожного ступеня, під дією відцентрової сили через гідрозатвори стікає в кінцевий конденсатор, де змішується з охолоджуючим технологічним дистилятом.

Після виходу системи на стаціонарний режим роботи концентрація розчину у всіх ступенях дистилятора, окрім першої, залишається сталою. Концентрація солей у першому ступені буде змінюватися в процесі роботи від початкового значення до деякого граничного, після досягнення якого припиняється подача електроживлення до ТГН.

Ефективність роботи системи залежить від тепломасообмінних процесів, які протікають у дистиляторі схеми руху теплоносіїв, ефективності батареї та ін.

Загальний коефіцієнт теплопередачі окремого ступеня розраховується за формулою:

$$k = 1 / (1/\alpha_c + 1/\alpha_e + \delta_w/\lambda_w), \quad (1)$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари; α_e – коефіцієнт тепловіддачі при випаровуванні рідини; δ_w і λ_w – відповідно товщина та теплопровідність теплообмінної поверхні.

При цьому, вочевидь, значення коефіцієнтів тепловіддачі залежать ще й від характеру стікання плівки рідини по обертовій поверхні.

Таким чином, для розрахунків тепломасообмінних процесів у дистиляторі необхідне знання гідродинамічних характеристик плівки та коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації й випаровуванні рідини на обертовій поверхні.

Теплообмін при конденсації й випарі на обертовому щаблі

Основними гідродинамічними параметрами плівки рідини, яка тече по обертовій поверхні, є її середня товщина й швидкість течії. Дослідження процесу течії плівки рідини на обертовій поверхні детально проведене у праці [16]. В ході описаних там досліджень вдалося виділити характерні режими течії плівки рідини, які впливають на процес теплообміну. Дослідження конденсації на обертовій поверхні теплообміну експериментально вивчене в [17, 18]. У праці [19] зроблено огляд літератури щодо конденсації на обертовій поверхні й обґрунтовано метод розрахунку тепловіддачі.

На поверхнях 1 – 4 (див. рис. 1) при роботі дистилятора рідина, яка випаровується, тече у вигляді тонкої плівки під дією відцентрового прискорення $a \sim \omega^2 R \sin \beta$, де ω – кутова швидкість обертання ротора, R – радіус обертового вузла ступеня, β – кут між віссю обертання ротора й теплообмінною поверхнею. У кільцевій частині (5, мал.1) випаровування відбувається в умовах впливу вимушеною відцентровою конвекції.

Конденсація на зовнішній поверхні обертового щабля

На ділянках близьких до дискової геометрії (ділянки 1-4, крім 5 частини) локальний коефіцієнт тепловіддачі при конденсації (α_c) може бути розрахований по формулі

$$Nu = [\alpha_c (v^2/\omega^2 R \cos \beta)/\lambda]^{1/3} = 0.9 Re^{-1/3} \quad (2)$$

де v – швидкість руху рідини, ω – кутова швидкість обертання ротора, R – радіус обертового вузла ступеня, β – кут між віссю обертання й поверхнею теплообміну. Re – локальне число Рейнольдса, яке розраховується як $Re = G_d / 2\pi R \mu$, де G_d – кількість пари, яка конденсується за одиницю часу на локальній ділянці поверхні, μ – динамічна в'язкість конденсату.

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі α_c на кожній ділянці ступеня розраховується з урахуванням залежності площі обертової поверхні від радіуса диска.

Конденсація пари на плівці рідини

У кільцевому конденсаторі пар конденсується на плівці рідини, що надходить у зону конденсації після охолодження в ТТН і додатковому зовнішньому теплообміннику [20].

Аналіз цих даних дозволяє використовувати для розрахунків тепловіддачі метод, який запропоновано у праці [21] для випадку конденсації пари на плівці рідини в умовах земного тяжіння. У цьому випадку процес тепловіддачі розраховується з урахуванням наступної залежності:

$$Nu = 0.018 Re^{0.5} Pr^{0.7} \quad (3)$$

У цьому рівнянні в якості визначальної прийнято середню температуру плівки, а Re визначається за початковою витратою води в плівці.

Максимальна температура пари в останньому ступені $\approx 30^\circ\text{C}$, а температура охолоджуючої рідини $\approx 20^\circ\text{C}$. Розрахунки з урахуванням реальних розмірів диска, на якому конденсується пара в кінцевому конденсаторі, показує, що величина Re може мати значення в діапазоні 60...120, а $Pr = 3...6$. Теоретично розв'язок задачі про тепловіддачу в заданій області зміни чисел Re і Pr для визначення Nu отримано у працях [22, 23]. Ці розрахунки, як показано в статтях [24, 25], дають задовільне узгодження з експериментом, що дозволяє нам використовувати їх надалі.

Випаровування на внутрішній поверхні обертового ступеня (ділянки 1 – 4, рис. 1)

Коефіцієнт тепловіддачі α_{vap} при випаровуванні плівки рідини на обертовому диску був уперше виміряний у праці [18]. В [19] зроблено аналіз досліджень інших авторів і описано удосконалений метод розрахунків цього коефіцієнта із урахуванням впливу турбулентності в умовах плівкової течії.

Згідно [19] за $Re < 25$ коефіцієнт тепловіддачі необхідно розраховувати у відповідності з

формулою:

$$\text{Nu} = 1.47 \text{Re}^{-1/3} \quad (4)$$

Якщо $\text{Re} > 25$, то точніше використовувати графіки, отримані у працях [22, 23], при побудові яких враховано турбулізацію плівки рідини й відхилення процесу тепловіддачі від ламінарної теорії Нуссельта.

Випаровування рідини в кільцевому каналі (ділянка 5, мал.1)

У кільцевому каналі (ділянка 5, мал.1) має місце теплообмін при впливі на процес випаровування вільної конвекції, яка виникає при мікрогравітації через наявність відцентрового прискорення. Експериментальні дослідження випаровування під дією вільної конвекції в умовах наявності відцентрового прискорення було виконано в 70-х роках 20-го сторіччя у працях [26-28]. В [26] виміряно коефіцієнти тепловіддачі при випаровуванні води за значень перевантаження $\omega^2 R/g$ в діапазоні від 1 до 5250 і величини теплового потоку q в діапазоні від $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ Вт/м². За низьких теплових потоків ($q < 2 \cdot 10^4$ Вт/м²) які мають місце в СМЕД, вплив теплового потоку на теплообмін відсутній вже за $\omega^2 R/g > 102$ і коефіцієнт тепловіддачі можна визначати у відповідності із залежністю [27]:

$$\text{Nu} = 0.75(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0.25}, \quad (5)$$

де $\text{Nu} = \alpha \delta_n / \lambda$, $\text{Gr} = \omega^2 R \delta_n / 4\nu^2$; δ_n – товщина шару рідини в кільцевому каналі, R – віддаль від кільцевого каналу до вісі обертання.

Розрахунки загального перепаду температур пари в дистиляторі й різниці температур на вході в ТНР

У табл. 1 і 2 наведені дослідні дані залежно від часу τ : локальні температури, витрата продукту (дистиляту) G_d , витрата розчину в гарячому контурі, витрата дистиляту в холодному контурі. За цим даними розраховується число Рейнольдса для випадків течії плівки рідини на внутрішній і зовнішній робочих поверхнях СМЕД і далі відповідно до формул (1 – 5) – коефіцієнти тепловіддачі для кожної частини ступеня при випаровуванні й конденсації (див. рис. 1).

Загальний коефіцієнт теплопередачі розраховується за формулою (1).

Також коефіцієнт теплопередачі визначається для кожного ступеня із залежності:

$$K_{st} = Q_{st} / (F_{st} \cdot \Delta T_{st}), \quad (6)$$

де F_{st} – поверхня теплообміну, м²; ΔT_{st} – перепад температур на ступені.

Загальний тепловий потік у ступені $Q_{st} = G \cdot r$, де G – кількість пари, яка конденсується в щаблі, r – питома теплота конденсації пари.

Знаючи з експерименту продуктивність СМЕД по дистиляту G_d визначаємо $Q = \Sigma G_d \cdot r$ і далі для води для дистилятора в цілому $\Sigma \Delta T = (T_{in \ h \ \text{ТНР}} - T_{in \ c \ \text{ТНР}}) = Q / (k \cdot f)$

Після цього виконуємо порівняння розрахованого $\Sigma \Delta T$ і $\Sigma \Delta T = (T_{in \ h \ \text{ТНР}} - T_{in \ c \ \text{ТНР}})$, визначеного з експериментальних даних (таблиця 1).

Для дослідів з уриною необхідно враховувати наявність фізико-хімічної температурної депресії ΔT_{depr} . Її величина визначається із графіка $\Delta T_{depr} = f(C)$, де концентрація C урини залежить від ступеня добування води (recovery). Концентрація, у свою чергу, визначається за

щільністю розчину в гарячому контурі (див. рис. 2).

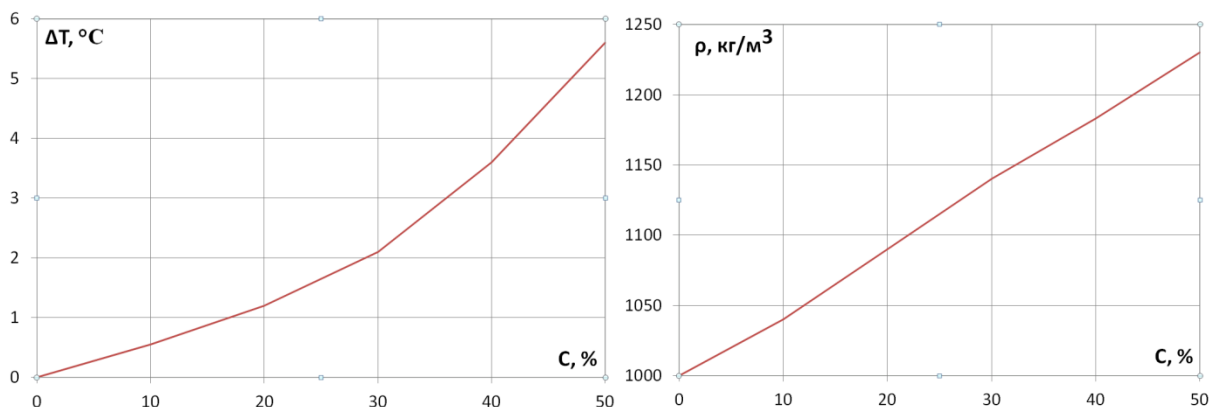


Рис. 2 Залежність фізико-хімічної температурної депресії й щільності розчину від концентрації урини (за даними НДІ «ХИММАШ», м. Москва)

Враховуючи ΔT_{depr} , перепад температур у першому шаблі $\Delta T_1 = T_{in} - \Delta T_{depr1}$. Далі за дослідними даними визначаємо підведену в гарячий контур теплову потужність $Q_h = c_p G_h (T_{in\ THP} - T_{out\ THP})$.

З теплового балансу ТНР можна визначити теплову потужність із холодної сторони $Q_c = Q_h - W_{TНР}$.

Теоретичне значення перепаду температур у холодному контурі

$$\Delta T_c = Q_c / (c_p \cdot G_c). \quad (7)$$

Розрахунки залежності коефіцієнта перетворення ТНР від різниці температур теплоносіїв

Очевидним є вимога, щоб параметри конструкції й струм живлення ТНР відповідали умові максимуму опалювального коефіцієнта K , обумовленого формулою

$$K = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c}, \quad (8)$$

де $W = Q_h - Q_c$ – споживана електрична потужність; Q_c , Q_h – зовнішні потоки тепла на холодній і гарячій поверхнях термоелектричного модуля, відповідно. Це забезпечить нагрівання теплоносія в робочому контурі теплового насоса при мінімальній витраті електроенергії.

Для оптимізації термоелектричних модулів успішно використовується теорія оптимального керування [28-33]. Цей метод легко узагальнюється й для розрахунків максимального опалювального коефіцієнта, яким характеризується режим теплового насоса.

Використовуючи методи теорії оптимального керування, ефективність роботи термоелектричного модуля в режимі нагрівання можна оцінити функціоналом

$$J = \ln \frac{Q_h}{Q_c} = \ln \frac{q_h}{q_c} = \ln q_h - \ln q_c, \quad (8)$$

де

$$q_h = \frac{Q_h}{n I}, \quad q_c = \frac{Q_c}{n I} \quad (9)$$

– відповідно питомі (віднесені до сили струму I) потоки тепла на гарячому й холодному спаях термопар, n – кількість термопар у батареї. Мінімум функціоналу J відповідає максимальному значенню опалювального коефіцієнта K .

Для обчислення густин теплових потоків q_c , q_h використовується система рівнянь нерівноважної термодинаміки, яка для гілок термоелементів n - і p -типів провідності має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{q}{\kappa} \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j^2}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + \frac{j^2}{\sigma} \end{aligned} \right\}_{n,p}, \quad (10)$$

де $j = \frac{I}{S}$ – питома щільність струму в гілках, S – переріз гілок, I – величина струму живлення.

Коефіцієнти термоЕРС, електропровідності й теплопровідності матеріалів гілок є функціями температури: $n,p = n,p(T)$ і можуть бути задані на основі апроксимації експериментальних даних вимірювання характеристик термоелектричних матеріалів.

Розв'язок системи (10) за граничних умов

$$T_n(0) = T_p(0) = T_h, \quad T_n(l) = T_p(l) = T_c \quad (11)$$

дасть можливість розрахувати теплові потоки q_c , q_h , використовуючи співвідношення

$$\begin{aligned} q_c &= -\sum_{n,p} [q(l) + j^2 r_0], \\ q_h &= -\sum_{n,p} [q(0) - j^2 r_0], \end{aligned} \quad (12)$$

де l – висота гілок термоелементів, r_0 – величина контактного опору на спаях термоелементів.

Зі співвідношень (12) випливає, що q_c , q_h залежать від параметрів щільності струму в галузях термоелементів j і від величини контактної опору. Відповідно до теорії оптимального керування значення $j_{n,p}$, що забезпечують мінімум функціоналу J (8), повинні задовольняти наступним умовам оптимуму

$$-\frac{\partial J}{\partial j} + \int_0^l \frac{\partial H(\psi, T, q, j)}{\partial j} dx = 0, \quad (13)$$

де функція Гамільтона H має вигляд

$$H = \sum_{n,p} (\psi_1 f_1 + \psi_2 f_2), \quad (14)$$

$(f_1, f_2)_{n,p}$ – праві частини рівнянь (4); $\psi = (\psi_1, \psi_2)_{n,p}$ – вектор імпульсів, метод визначення якого викладений в [1, 2].

Співвідношення (8)–(14) є основою для комп'ютерного проектування оптимальних

конструкцій і розрахунків оптимальних параметрів термоелектричних модулів у режимі нагрівання для теплових насосів.

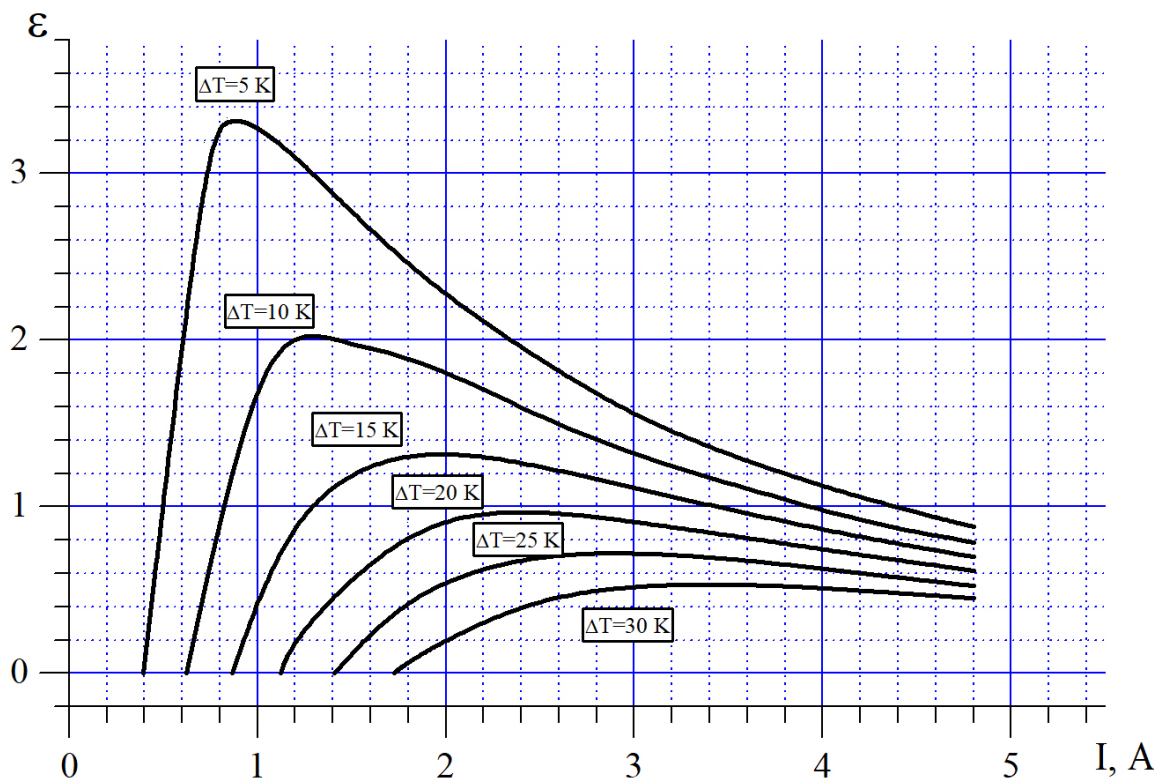


Рис.3 Залежність коефіцієнта перетворення ТНР від струму живлення для різних значень перепаду температур між теплоносіями

Алгоритм розрахунків максимального опалювального коефіцієнта реалізується чисельними методами за допомогою засобів комп'ютерного моделювання. При цьому розраховуються оптимальні щільності струму в гілках термоелементів j і теплові потоки q_c , q_h , які їм відповідають, і визначається максимальне значення опалювального коефіцієнта.

На основі наведеної теорії проведено розрахунки залежності коефіцієнта перетворення ТНР від струму живлення для різних значень перепаду температур між теплоносіями (рис. 3).

Як випливає з мал.3 коефіцієнт перетворення ТНР сильно залежить від перепаду температур між теплоносіями системи дистиляції води. Крім того, при проектуванні дистилятора важливим є режим роботи ТНР, а саме забезпечення оптимального режиму живлення термоелектричних перетворювачів енергії.

Результати

Випаровування води

У таблиці 1 наведені експериментальні дані дослідження роботи дистилятора на дистильованій воді, тривалість роботи склала 50 хвилин, середня потужність теплового насоса 100 Вт, при цьому середня продуктивність склала 2.45 кг/годину.

Таблиця 1

Експериментальні дані (вода, $n = 1100$ про/хв)

Час	Привід дистилятора			ТТН	Вага		TDS	Потік		Продуктивність	SPC	Температура			
	U	I	W		W	Вх		Вых	гар			хол	Гар. вх ТТН	Гар. вих ТТН	Хол.вх ТТН
хв.	B	A	Вт	Вт	г		мг/л	л/год		л/год	Вт/кг	°C			
10	20,6	3,3	68,0	101	224	152	5	90	88	2,18	77,5	25,5	29,6	22,6	19,5
30	20,6	3,3	68,0	99	1000	902	5	90	88	2,42	69,0	26,3	30,1	22,8	20,0
40	20,6	3,3	68,0	100	1438	1326	4	90	88	2,58	65,1	25,5	29,0	22,0	19,5
50	20,6	3,3	68,0	100	1838	1710	5	90	88	2,60	64,6	25,5	28,7	22,0	19,6
Average	20,	3,3	68,0	100			5			2,45	69,1				
Total					1838	1710									

де TDS – загальна кількість розчинених твердих речовин.

У процесі розрахунків була виконана тільки коректування температури пари в останньому щаблі:

1-й крок: по відомих температурах на вході й виході в термоелектричний тепловий насос у гарячому контурі, витраті визначаємо реальну теплову потужність, яка підводиться у гарячому контурі: $Q_h = c_p G_h (T_{in h \text{ ТНР}} - T_{out h \text{ ТНР}})$;

2-й крок: з балансу теплового насоса визначаємо теплову потужність на холодній стороні теплового насоса: $Q_c = Q_h - W_{ТНР}$;

3-й крок: визначаємо розрахункову різницю температур у холодному контурі:

$$\Delta T_c = (T_{in c \text{ ТНР}} - T_{out c \text{ ТНР}}) = Q_c / c_p \cdot G_c .$$

Відхилення ΔT_c , отриманого в результаті розрахунків, від експериментальних даних не перевищує 0,1 °C.

У деяких окремих випадках теоретичні розрахунки сумарного перепаду температур на дистиляторі $\Sigma \Delta T$ і $\Delta T_{in} = (T_{in h \text{ ТНР}} - T_{in c \text{ ТНР}})$ показали, що має місце відхилення значення ΔT_{in} , яка на кілька градусів вище розрахункової. Це відбувалося через переохолодження дистиляту в холодному контурі теплового насоса, що призводило до істотного збільшення сумарної різниці температур $\Sigma \Delta T$ на тепловому насосі і, отже, зменшення його ефективності. Додатковий експеримент, в рамках якого спеціально контролювався ступінь охолодження конденсату в кінцевому конденсаторі, показав, що можна суттєво знизити відмінність розрахункової та спостережуваної температур на вході в тепловий насос з холодного боку. При цьому зростає ефективність теплового насоса $\eta_{ТНР}$, яка стає рівною теоретичній. Це, у деяких випадках, дає зменшення питомого споживання енергії SPC на 10-15%.

Випаровування урини

У табл. 2 наведено результати дослідження роботи дистилятора на урині, тривалість роботи склала 107 хвилин, середня потужність теплового насоса 203 Вт, при цьому середня продуктивність склала 3.35 кг/година.

Таблиця 2

Експериментальні дані (урина, $n = 1100$ про/хв)

Час	Привід			ТТН	Вага		TDS	Потік		Продуктивність	SPC	Температура				
	U	I	W		W	вх.		вих.	гар.			хол.	гар. вх. ТТН	гар. вих. ТТН	хол. вх. ТТН	хол. вих. ТТН
хв	В	А	Вт	Вт	г		мг/л	л/год		кг/год	Вт-год/кг	°С				
5	20,8	3,35	69,7	202	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	20,8	3,35	69,7	202	680	710	37	89	90	3,50	77,6	33,1	38,2	25,5	22,5	
25	20,8	3,40	70,7	202	1366	1416	60	89	89	3,53	77,3	32,9	37,9	25,1	22,0	
47	20,8	3,43	71,3	201	2024	2098	79	90	89	3,41	79,9	33,4	38,5	25,4	22,3	
59	20,8	3,43	71,3	199	2674	2770	84	89	89	3,36	80,4	34,3	39,6	25,8	22,8	
71	20,9	3,45	72,1	211	3324	3444	90	89	89	3,37	84,0	34,9	40,2	26,0	23,1	
83	20,9	3,47	72,5	205	3360	4106	94	90	89	3,31	83,8	35,6	41,1	26,4	23,6	
95	20,9	3,50	73,1	205	4572	4734	96	89	89	3,14	88,6	36,6	42,0	27,0	24,2	
107	20,9	3,50	73,1	201	5170	5362	97	89	89	3,14	87,2	36,5	41,7	26,0	23,4	
Середнє	20,8	3,44	71,7	203						3,35	115,1					
Загальна					5170	5362										

З таблиці 2 видно, що з часом зростає різниця температур на тепловому насосі, і, як наслідок, падає продуктивність системи й зростає питоме споживання енергії.

Для випадку переробки урини при обчисленні загальної різниці температур на термоелектричному тепловому насосі $\Sigma\Delta T = (T_{in\ h\ THP} - T_{in\ c\ THP})$ необхідно враховувати також вплив температурної депресії, яка зростає зі збільшенням концентрації урини, тобто зі збільшенням часу роботи дистилятора.

При проведенні експериментів окремо не стежили за температурою води, яка подається в додатковий теплообмінник для охолодження дистиляту «холодного контуру» теплового насоса.

У результаті основні показники системи (продуктивність і енергоспоживання) при роботі на дистиляті, за інших рівних умов, суттєво краще, чим при переробці урини.

Висновки

1. У статті показано, що багатоступінчастий відцентровий дистилятор являє собою складну конструкцію, у якій окремі ступені дистилятора мають теплообмінну поверхню, складену з елементів, кут нахилу яких відносно вектора відцентрового прискорення змінюється від 0° до 90° .
2. Для виконання адекватного теплового розрахунку такого апарата підібрані й обґрунтовані залежності для розрахунків тепловіддачі при випаровуванні та конденсації, а також коефіцієнта теплопередачі на окремих складових поверхні теплообміну.
3. Показаний вплив фізико-хімічної температурної депресії й переохолодження технічного дистиляту в холодному контурі термоелектричного теплового насоса на енергетичну ефективність дистиляційної системи
4. Експериментальні й теоретичні результати, отримані в даній статті й у попередніх частинах [14-15] буде використано для створення математичної моделі системи регенерації (дистиляції) води. Математична модель необхідна для оптимізації режимів роботи та геометричних параметрів системи у відповідності з конкретними умовами експлуатації.

Література

1. V.Rifert, P. Barabash, N.Goliad, "Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems", SAE Paper 901249, 20th Intersociety Conference on Environmental Systems, Williamsburg, July 1990.
2. N.Samsonov, L.Bobe, V.Novikov, V.Rifert and others "Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station", SAE Paper 941536, 24th International society Conference on Environmental Systems, June, 1994.
3. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., Barabash, P.A et al., "Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations," SAE Paper 951605, the 25th International Conference on Environmental Systems, San Diego, July 1995.
4. Samsonov, N. M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al., "Updated systems for water recovery from humidity condensate and urine for the International space station" SAE Paper 972559, the 27th International Conference on Environmental Systems, Nevada, July 1997.
5. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al., "Development and testing of a vacuum distillation subsystem for water reclamation from urine" SAE Paper 1999-01-1993, the 29th International Conference on Environmental Systems, 1999.
6. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight, A. Lubman. Comparison Of Secondary Water Processors Using Distillation For Space Applications. - SAE Paper 99-70466, 29th International Conference on Environmental Systems, Denver, July 1999.
7. Rifert V., Stricun A., Usenko V. Study of dynamic and extreme performances of multistage centrifugal distiller with the thermoelectric heat pump. SAE Technical Papers 2000. 30th International Conference on Environmental Systems; Toulouse; France; 10-13 July 2000.
8. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman, "Design Optimisation of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 2001-01-2248, the 31st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001.
9. Rifert, V. G., V. I. Usenko, I. V. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman, "Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space", SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems. Orlando, July 2003.
10. Lubman A, MacKnight A, Rifert V, Zolotukhin I and Pickering K., "Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem. Design and Evaluation". SAE International, 2006-01-2273. July 2006.
11. A. Lubman, A. MacKnight, V.Rifert, and P. Barabash, "Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing". SAE International, 2007-01-3177, July 2007.
12. Риферт В.Г. Анатичук Л.И., Барабаш П.А., Усенко В.И., Стрикун А.П., Прибыла А.В. Улучшение методов дистиляции при использовании центробежных сил для регенерации воды во время космических полетов. // Термоэлектричество. – 2017. – №1. – С 88 – 104.
13. Vladimir G. Rifert, Petr A. Barabash, Vladimir Usenko, Andrii S. Solomakha, Lukyan I. Anatychuk, A.V. Prybyla. Improvement the cascade distillation system for long-term space flights. 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17-A1.IP.25.
14. Риферт В.Г. Анатичук Л.И., Барабаш, П.О. Усенко В.И. Стрикун А.П., Соломаха А. С., Петренко В. Г., Прибыла А. В. Эволюция системы центробежной дистиляции с термоэлектрическим тепловым насосом для космических миссий. Часть 1. Обзор публикаций по центробежной дистиляции в период 1990 – 2017 гг.

15. Риферт В.Г. Анатычук Л.И., Барабаш, П.О. Усенко В.И. Стрикун А.П., Соломаха А. С., Петренко В. Г., Прибыла А. В. Эволюция системы центробежной дистиляции (waster water) с термоэлектрическим тепловым насосом для космических миссий (deep space mission) Часть 2. Исследование переменных характеристик системы многоступенчатой дистиляции (СМЕД) с термоэлектрическим тепловым насосом (ТНР)
16. Muzhilko, A.A., Rifert, V.G., Barabash, P.A. Flow of liquid film over the surface of a rotating disk // Heat transfer. Soviet research, 1985.
17. Butuzov, A.I., Rifert, V.G. "An Experimental Study of Heat Transfer during Condensation of Steam at a Rotating Disk", Heat Transfer-Soviet Research, Vol.4, No. 6, November-December 1972.
18. Butuzov, A.I. and Rifert, V.G. "Heat Transfer in Evaporation of Liquid from a Film on a Rotating Disk," Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 5, No. 1, January-February 1973.
19. V.G. Rifert, P.A. Barabash, A.S. Solomakha, V. Usenko, V.V. Sereda, V.G. Petrenko. Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator // Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue K. – 2018. – pp.49-57.
20. Rifert V.G., Barabash P.A., Goliyad N.N. Condensation of steam on a water film falling down a rotating surface. Heat transfer. Soviet research 16 (3), pp. 132-137.
21. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Монография. Вильнюс, 1988, 233 с.
22. S. Bae, J. S. Maulbetsch, W. M. Rohsenow Refrigerant forced-convection condensation inside horizontal tubes. Report No. DSR-79760-64. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1969, p. 120.
23. D. P. Traviss, A. B. Baron, W. M. Rohsenow. Forced-convection condensation inside tubes. Report No. DSR-72591-74. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1971, p. 105.
24. V. G. Rifert, V. V. Sereda, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A. S. Solomakha Restoration of correctness and improvement of a model for film condensation inside tubes. Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue K, 2018, pp. 58-69.
25. Rifert, V., Sereda, V., Solomakha, A. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of theoretical research. Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung, 2019.
26. Usenko, V.I., Fainzilberg, S.N. Effect of acceleration on the critical heat load with the boiling of freons on elements having small transverse dimensions. High Temperature, 1974.
27. Usenko, V.I., Podgoretskiy, V.M., Kudelya, P.P. Nucleate boiling heat transfer from freon-11 and 12 at very high «g». Heat transfer. Soviet research, 1985.
28. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость-жидкость для приборов очистки воды космического назначения. // Термоэлектричество. – 2015. – №4. – С 41 – 47.
29. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2015. – №6. – С 59 – 64.
30. Анатычук Л.И., Розвер Ю.Ю., Прибыла А.В. Экспериментальное исследование термоэлектрического теплового насоса жидкость – жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №3. – С. 46 – 52.
31. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О предельных возможностях термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №4. – С. 50 – 55.

32. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. О влиянии качества теплообменников на свойства термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №5. – С. 39 – 44.
33. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. О холодильном коэффициенте термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость с учетом энергии на перемещение теплоносителя // Термоэлектричество. – 2017. – №6. – С. 34 – 40.

Надійшла до редакції 05.06.2019

Риферт В.Г., док. техн. наук¹
Анатичук Л.И., акад. НАН України^{2,3}
Барабаш П.О., канд. техн. наук¹
Усенко В.И., док. техн. наук¹
Стрикун А.П.¹
Соломаха А. С. канд. техн. наук¹
Петренко В. Г. канд. техн. наук¹
Середа В.В. канд. техн. наук¹
Прибыла А. В., канд. физ.-мат. наук^{2,3}

¹НТУ «КПИ», ул. Политехническая, 6,
Киев, 03056, Украина;

²Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyck@gmail.com;

³Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТЕПЛОМ НАСОСОМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

Часть 3. Анализ локальных и интегральных характеристик системы центробежной дистиляции с термоэлектрическим тепловым насосом

В работе описана методика расчета коэффициента теплопередачи и эффективности центробежного дистилятора, а также определение эффективности термоэлектрического теплового насоса. Для этого использованы результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов конденсации и испарения на вращающейся поверхности и исследование процессов в жидкостно-жидкостном термоэлектрическом тепловом насосе (ТНР). Сделано сравнение расчетных значений среднего температурного перепада $\Delta T_{ср}$ в ТНР и разницы температур на входе в ТНР $\Delta T_{вх}$ с экспериментальными данными, полученными при испытании центробежного дистилятора на воде и урине. Библ. 33, рис. 3, табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектричество, тепловой насос, дистилятор.

Rifert V.G., *doct. techn. Sciences*¹
Anatychuk L.I., *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*²
Barabash P.O., *cand. techn. Sciences*¹,
Usenko V.I., *doct. techn. Sciences*¹
Strikun A.P.¹
Solomakha A.S., *candidate of Technical Sciences*^{1,2}
Petrenko V.G., *candidate of Technical Sciences*¹
Sereda V.V. *cand. techn. sciences*¹,
Prybyla A.V., *cand. Phys. - math. Sciences*²

INTUU KPI, 6 Politekhnikeskaya str, Kyiv, 03056, Ukraine;
²Institute of Thermoelectricity, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine
e-mail: anatych@gmail.com

EVOLUTION OF CENTRIFUGAL DISTILLATION SYSTEM WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP FOR SPACE MISSIONS

Part 3. Analysis of local and integral characteristics of centrifugal
distillation system with a thermoelectric heat pump

The paper describes a method for calculating the heat transfer coefficient and the efficiency of a centrifugal distiller, as well as determining the efficiency of a thermoelectric heat pump. For this, the results of theoretical and experimental studies of condensation and evaporation processes on a rotating surface and the study of processes in a liquid-liquid thermoelectric heat pump (THP) were used. A comparison was made of the calculated values of the average temperature difference ΔT_{av} in THP and the temperature difference at the inlet to THP ΔT_{in} with the experimental data obtained when testing the centrifugal distiller on water and urine. Bibl. 33, Fig. 3, Tabl. 2.

Key words: thermoelectricity, heat pump, distiller

References

1. Rifert V., Barabash P., Goliad N. (1990). Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems. *SAE Paper 901249, 20th Intersociety Conference on Environmental Systems (Williamsburg, July 1990).*
2. Samsonov N, Bobe L., Novikov V., Rifert V., et al. (1994). Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station. *SAE Paper 941536, 24th International society Conference on Environmental Systems (June, 1994).*
3. Samsonov N.M., Bobe L.S., Novikov V., Rifert V.G., Barabash P.A, et al.. (1995). Development of urine processor distillation hardware for space stations. (1995). *SAE Paper 951605, 25th International Conference on Environmental Systems (San Diego, July 1995).*
4. Samsonov N.M., Bobe L.S, Novikov V., Rifert V.G., et al.(1997). Updated systems for water recovery from humidity condensate and urine for the International space station. *SAE Paper 972559, 27th International Conference on Environmental Systems (Nevada, July 1997).*
5. Samsonov N.M., Bobe L.S, Novikov V., Rifert V.G., et al. (1999). Development and testing of a vacuum distillation subsystem for water reclamation from urine. *SAE Paper 1999-01-1993, 29th*

International Conference on Environmental Systems, 1999.

6. Rifert V., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A., Lubman A. (1999). Comparison of secondary water processors using distillation for space applications. *SAE Paper 99-70466, 29th International Conference on Environmental Systems (Denver, July 1999).*
7. Rifert V., Strikun A., Usenko V. (2000). Study of dynamic and extreme performances of multistage centrifugal distiller with the thermoelectric heat pump. *SAE Technical Papers 2000. 30th International Conference on Environmental Systems (Toulouse; France; 10-13 July 2000).*
8. Rifert V., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A. and Lubman A. (2001). Design optimisation of cascade rotary distiller with the heat pump for water reclamation from urine. *SAE Paper 2001-01-2248, 31st International Conference on Environmental Systems (Orlando, July 2001).*
9. Rifert V. G., Usenko V.I., Zolotukhin I.V., MacKnight A. and Lubman A. (2003). Cascaded distillation technology for water processing in space. *SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems (Orlando, July 2003).*
10. Lubman A., MacKnight A., Rifert V., Zolotukhin I. and Pickering K. (2006). Wastewater processing cascade distillation subsystem. design and evaluation. *SAE International, 2006-01-2273. July 2006.*
11. Lubman A., MacKnight A., Rifert V., and Barabash P. (2007). Cascade distillation subsystem hardware development for verification testing. *SAE International, 2007-01-3177, July 2007.*
12. Rifert V.G., Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Usenko V.I., Strikun A.P., Prybyla A.V. (2017). Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight applications. *J. Thermoelectricity, 1, 71-83.*
13. Rifert Vladimir G., Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Solomakha Andrii S., Anatyshuk Lukyan I., Prybyla A.V. (2017). Improvement the cascade distillation system for long-term space flights. *68th International Astronautical Congress (IAC) (Adelaide, Australia, 25-29 September 2017). IAC-17-A1.IP.25.*
14. Rifert V.G., Anatyshuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019). Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. Part 1. Review of publications on centrifugal distillation in the period of 1990 – 2017. *J. Thermoelectricity, 1*
15. Rifert V.G., Anatyshuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019). Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. Part 2. Study of the variable characteristics of a multi-stage distillation system with a thermoelectric heat pump. *J. Thermoelectricity, 2*
16. Muzhilko A.A., Rifert V.G., Barabash P.A. (1985) Flow of liquid film over the surface of a rotating disk. *Heat transfer. Soviet research.*
17. Butuzov A.I., Rifert V.G. (1972). An experimental study of heat transfer during condensation of steam at a rotating disk. *Heat Transfer-Soviet Research, 4(6).*
18. Butuzov A.I. and Rifert V.G. (1973). Heat transfer in evaporation of liquid from a film on a rotating disk. *Heat Transfer-Soviet Research, 5(1).*
19. Rifert V.G., Barabash P.A., Solomakha A.S., Usenko V., Sereda V.V., Petrenko V.G. (2018). Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator. *Bulgarian Chemical Communications, 50, Special Issue K, 49-57.*
20. Rifert V.G., Barabash P.A., Goliyad N.N. Condensation of steam on a water film falling down a rotating surface. *Heat transfer. Soviet research, 16 (3), 132-137.*
21. Gimbutis G. (1988). *Heat exchange with gravitational flow of liquid film.* Monograph. Vilnus.

22. Bae S., Maulbetsch J.S., Rohsenow W.M. (1969). *Refrigerant forced-convection condensation inside horizontal tubes. Report No. DSR-79760-64.* Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA).
23. Traviss D.P., Baron A.N., Rohsenow W.M. (1971). *Forced-convection condensation inside tubes. Report No. DSR-72591-74.* Massachusetts Institute of Technology. (Cambridge, MA)
24. Rifert V.G., Sereda V.V., Gorin V.V., Barabash P.A., Solomakha A.S. (2018). Restoration of correctness and improvement of a model for film condensation inside tubes. *Bulgarian Chemical Communications, 50, Special Issue K, 58-69.*
25. Rifert V., Sereda V., Solomakha A. (2019). Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of theoretical research. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung, 2019.*
26. Usenko V.I., Fainzilberg S.N. (1974). Effect of acceleration on the critical heat load with the boiling of freons on elements having small transverse dimensions. *High Temperature.*
27. Usenko V.I., Podgoretskiy V.M., Kudelya P.P. (1985). Nucleate boiling heat transfer from freon-11 and 12 at very high «g». *Heat transfer. Soviet research.*
28. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of thermal connections in thermoelectric liquid-liquid heat pumps for water purification systems of space application. *J. Thermoelectricity, 4, 45 – 51.*
29. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity, 6, 53 – 58.*
30. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity, 3, C. 33 – 39.*
31. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity, 4, 33 – 39.*
32. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J. Thermoelectricity, 5, 33 – 39.*
33. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. (2017). On the coefficient of performance of thermoelectric liquid-liquid heat pumps with regard to energy loss for heat carrier transfer. *J. Thermoelectricity, 6, 33 – 39.*

Submitted 05.06.2019

УДК 537.32



Горський П.В.

Горський П.В. док. фіз.-мат. наук^{1,2}
Мицканюк Н.В.^{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, 58000, Україна



Мицканюк Н.В.

ПРО ТЕМПЕРАТУРНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХІДНОГО ШАРУ ТЕЛУРИД ВІСМУТУ МЕТАЛ З УРАХУВАННЯМ ЯВИЩА ПЕРКОЛЯЦІЇ

Розрахунковим шляхом отримано основні співвідношення, які визначають температурні залежності термоелектричних характеристик перехідних контактних шарів термоелектричний матеріал-метал з урахуванням явища перколяції. Конкретні кількісні результати та графіки температурних залежностей електричного та теплового контактних опорів, термоЕРС, фактору потужності та безрозмірної термоелектричної ефективності перехідного контактного шару наведено для контактної пари телурид вісмуту – нікель. Встановлено, що у температурному інтервалі 200-400 К за умови збереження нерівномірного розподілу частинок металу у перехідному шарі і його товщини в діапазоні 20-150 мкм електричний контактний опір змінюється від $7 \cdot 10^{-7}$ до $1.9 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², тепловий контактний опір – від 0.052 до 0.98 К·см²/Вт, термоЕРС – від 155 до 235 мкВ/К, фактор потужності – від $4.2 \cdot 10^{-5}$ до $6.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К²), безрозмірна термоелектрична ефективність – від 0.35 до 1.08. Після вирівнювання концентрації електричний контактний опір спадає у 1.12 – 3.6 рази, тепловий контактний опір спадає у 1.15 – 2.08 рази, термоЕРС практично не змінюється, фактор потужності зростає у 1.19 – 2.79 рази, безрозмірна термоелектрична ефективність зростає максимально у 1.2 рази. Бібл. 14, рис. 21.

Ключові слова: контакт термоелектричний матеріал – метал, приконтактний перехідний шар, електричний контактний опір, тепловий контактний опір, термоЕРС, теорія протікання.

Вступ

Ефективність термоелектричних модулів за їх достатньо великих розмірів в основному визначається добротністю термоелектричних матеріалів гілок термоелементів. Однак зі зменшенням розміру термоелектричних гілок у напрямку градієнту температури ця ефективність починає дедалі істотніше залежати від електричного та теплового контактних опорів термоелектричний матеріал (ТЕМ) – метал, зокрема, внаслідок виділення тепла Джоуля у контактних опорах. Ці опори повинні бути істотно меншими за опори власне термоелектричних гілок [1-3]. Ця обставина кладе межу мініатюризації термоелектричних перетворювачів енергії – генераторів та охолоджувачів.

Справді, нехай, наприклад, r_{se} – питомий, тобто віднесений до одиниці площі контакту, електричний контактний опір. Тоді, якщо ρ_s – питомий електричний опір ТЕМ, а l_s – довжина термоелектричної гілки у напрямку градієнту температури, то умова малості впливу контактного опору на ефективність термоелектричного перетворювача енергії має вигляд:

$$l_s \gg r_{ce} / \rho_s, \quad (1)$$

звідки видно, що чим меншим є питомий контактний опір, тим коротші (у напрямку градієнту температури) термоелектричні гілки можна виготовляти. Більше того, виявлено, що при виготовленні термоелектричних гілок бажано підтримувати оптимальне відношення l_s/S_s , де S_s – площа поперечного перерізу гілки, внаслідок чого зниження питомого електричного контактного опору у K разів за інших рівних умов веде до зменшення витрати ТЕМ у K^2 разів. А ТЕМ, як відомо, є найдефіцитнішою і найбільш дороговартісною частиною термоелектричного перетворювача енергії. Але ще важливішим чинником, який зумовлює актуальність завдання мініатюризації термоелектричних перетворювачів енергії, є необхідність їх застосування для створення сприятливих температурних режимів роботи мікроелектронних компонентів електронної апаратури різного призначення.

Однак для проектування термоелектричних перетворювачів енергії та правильної оцінки їх ефективності принципове значення має знання температурних залежностей термоелектричних характеристик перехідних контактних шарів, а вони дотепер в теорії термоелектричного перетворення енергії розглядалися лише частково і при проектуванні термоелектричних перетворювачів енергії враховувались недостатньо повно, хоча експериментальні дані щодо температурних залежностей, наприклад, електричних контактних опорів ТЕМ-метал, існують [4 – 7].

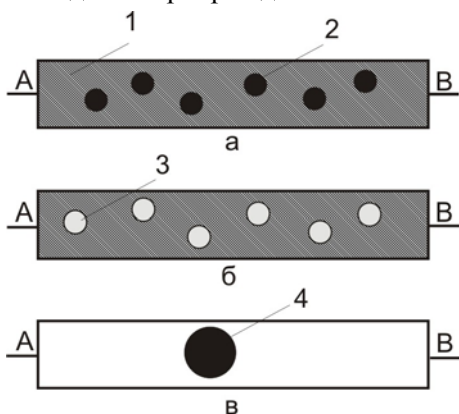
Тому мета цієї роботи – розробити модель структури перехідного контактного шару ТЕМ-метал з урахуванням теорії протікання і на її основі розрахувати температурні залежності термоелектричних характеристик перехідних контактних шарів.

Фізична модель перехідного шару ТЕМ-метал з урахуванням явища перколяції та її математичний опис

Електричний опір перехідного шару у випадку, якщо контактний метал або припій не утворює інтерметалідів з ТЕМ і не слугує легуючою домішкою для нього, що, наприклад, справедливо для контактних структур з антидифузійними шарами [8], можна вважати таким, що складається з трьох частин:

1. зумовленої дифузією частинок металу у ТЕМ без зміни хімічного складу та макроскопічних характеристик металу і ТЕМ;
2. зумовленої відхиленням поверхні ТЕМ від ідеальної площини;
3. зумовленої власне межею поділу між металом і ТЕМ, зокрема потенціальним бар'єром на цій межі. У даній статті ми розглядатимемо лише першу частину. При цьому розгляд будемо вести з урахуванням явища перколяції [9,10].

Спочатку розглянемо фізичну модель, яка ілюструє необхідність урахування явища перколяції при розгляді електропровідності та теплопровідності перехідного шару, який являє собою термоелектричний матеріал з частинками металу, які дифундували у нього. Цю модель зображено на рис. 1.



матеріал з частинками металу, які дифундували у нього. Цю модель зображено на рис. 1.

Рис. 1. Фізична модель, яка ілюструє необхідність застосування теорії протікання: а) брусок ТЕМ з частинками металу; б) брусок ТЕМ з вакуумними порожнинами (порами); в) гіпотетичний вакуумований або ідеально діелектричний об'єм, в якому міститься єдина провідна частинка, А,В – електричні контакти, 1-ТЕМ, 2- частинки металу, 3-вакуумні порожнини, 4-єдина провідна частинка

Перед розглядом принагідно зауважимо, що до створення

теорії протікання електропровідність та теплопровідність двофазної системи ТЕМ-метал, зображеної на рис. 1, розраховувались через об'ємну частку v_m металу в ній за так званими «формулами змішування», які для цього випадку мають вигляд [11]:

$$\sigma(v_m) = \sigma_s(1 - v_m) + \sigma_m v_m. \quad (2)$$

$$\kappa(v_m) = \kappa_s(1 - v_m) + \kappa_m v_m. \quad (3)$$

Обмежену застосовність цієї формули можна побачити з наступних фізичних міркувань. Уявимо, що спочатку наша система складається з ТЕМ, і частина матеріалу в ній поступово замінюється вакуумними порожнинами (порами) (рис. 1). З традиційних формул типу (2) та (3) випливає, що електропровідність та (або) теплопровідність цієї системи перетворюються на нуль лише тоді, коли весь ТЕМ або інший електропровідний (і, отже, теплопровідний) матеріал буде замінено вакуумом або іншою ідеально непровідною для електрики та (або) тепла фазою. Але з іншого боку ясно, що електропровідність та (або) теплопровідність «гіпотетичної» системи, зображеної на рис. 1в, у якій в об'ємі непровідної фази є, наприклад, єдина провідна частинка, що не торкається електродів, також дорівнюватиме нулеві (для електропровідності це вірно, якщо ми не розглядаємо явища пробою діелектрика чи струму у вакуумі, а для теплопровідності – якщо ми не розглядаємо передачі тепла випромінюванням). Звідси зрозуміло, що якщо провідна фаза не утворює наскрізних зв'язних областей, повинна існувати критична об'ємна частка вакуумних пор, або іншої непровідної фази, за умови перевищення якої електропровідність та теплопровідність системи перетворюються на нуль. Це явище називається явищем перколяції. Його враховує так звана теорія протікання. У відповідності з нею електропровідність та теплопровідність двофазної тривимірної системи «ТЕМ-метал» визначається наступними формулами [9,10]:

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

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

де v_m – об'ємна частка металу у перехідному шарі.

Справді, припустимо, що одна з фаз абсолютно не проводить електрики та тепла, тобто, покладемо, що $\sigma_s = 0$ та $\kappa_s = 0$. Тоді формули (4) та (5) набудуть вигляду:

$$\sigma = 0.5\sigma_m(3v_m - 1), \quad (6)$$

$$\kappa = 0.5\kappa_m(3v_m - 1). \quad (7)$$

Характерною особливістю формул (6), (7) є те, що у відповідності з ними не лише $\sigma = \sigma_m$ та $\kappa = \kappa_m$ за $v_m = 1$, що, вочевидь, повинно виконуватись, але й, на відміну від традиційних формул (2) та (3), $\sigma = 0$ та $\kappa = 0$ за $0 < v_m \leq 1/3$. Отже, критична об'ємна частка абсолютно непровідної фази, яка дорівнює $2/3$ і за досягнення або перевищення якої електропровідність та теплопровідність двофазної системи з такою фазою перетворюються на нуль, справді існує, як про це згадувалось вище. Тому зрозуміло, що внаслідок явища перколяції теоретично передбачувані значення

електричного та теплового контактних опорів повинні бути більшими, ніж за традиційною теорією композитів. Зазначимо, що граничні значення електропровідності та теплопровідності двофазної системи за формулами (4), (5) є такими самими, як і за формулами (2), (3).

Об'ємна частка металу $v_m(y)$, яка, взагалі кажучи, залежить від нормованої на товщину шару d_0 безрозмірної координати $0 \leq y \leq 1$ і задовольняє граничним умовам $v_m(0) = 1$, $v_m(1) = 0$, визначається з рівняння дифузії типу [12] зі сталою інтенсивністю джерела металевих часток типу таким чином:

$$v_m(y) = \frac{(A_m/\gamma_m)[1-(1-A)y - Ay^2]}{(A_m/\gamma_m)[1-(1-A)y - Ay^2] + (A_s/\gamma_s)[(1-A)y + Ay^2]}, \quad (8)$$

де A_m , A_s , γ_m , γ_s – відповідно атомні (молекулярні) маси металу і ТЕМ та їх густини. Безрозмірний параметр A залежить від режиму створення контакту і визначається так:

$$A = Qd_0^2 / 2Dn_0, \quad (9)$$

де Q – інтенсивність надходження часток металу у перехідний шар, D – коефіцієнт дифузії часток металу у ТЕМ, n_0 – атомна концентрація металу.

Якщо нерівномірний розподіл часток металу у перехідному шарі зберігається, то електропровідність $\sigma_l(y)$ та теплопровідність $\kappa_l(y)$ такого шару у відповідності зі співвідношеннями (4),(5),(8) залежать від нормованої координати y , і, отже, величини електричного та теплового контактних опорів такого шару можна оцінити за формулами:

$$r_{ce} = d_0 \int_0^1 \frac{dy}{\sigma_l(y)}, \quad (10)$$

$$r_{ct} = d_0 \int_0^1 \frac{dy}{\kappa_l(y)}, \quad (11)$$

а величину термоЕРС за формулою:

$$\alpha = \frac{\int_0^1 \{(\alpha_m/\kappa_m)v_m(y) + (\alpha_s/\kappa_s)[1-v_m(y)]\} dy}{\int_0^1 \{\kappa_m^{-1}v_m(y) + \kappa_s^{-1}[1-v_m(y)]\} dy}. \quad (12)$$

Якщо ж відбулось вирівнювання розподілу частинок металу у перехідному шарі, то залежні від нормованої координати електропровідність $\sigma_l(y)$ та теплопровідність $\kappa_l(y)$ в цьому випадку слід замінити на їх усталені значення σ_{la} та κ_{la} , які отримуються за формулами (4) та (5) після підстановки в них замість залежної від координати об'ємної частки металу $v_m(y)$ її усталеного значення v_{ma} , яке визначається так:

$$v_{ma} = \int_0^1 \frac{(A_m/\gamma_m)[1-(1-A)y - Ay^2]}{(A_m/\gamma_m)[1-(1-A)y - Ay^2] + (A_s/\gamma_s)[(1-A)y + Ay^2]} dy. \quad (13)$$

Отже, формули (10) – (12) набудуть такого вигляду:

$$r_{ce} = \frac{d_0}{\sigma_{la}}, \quad (14)$$

$$r_{ct} = \frac{d_0}{\kappa_{la}}, \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{(\alpha_m / \kappa_m) v_{ma} + (\alpha_s / \kappa_s) (1 - v_{ma})}{\kappa_m^{-1} v_{ma} + \kappa_s^{-1} (1 - v_{ma})}. \quad (16)$$

Порядок розрахунку характеристик перехідного контактного шару

Розрахунок починається з теоретичної апроксимації температурних залежностей кінетичних коефіцієнтів ТЕМ та металу.

Апроксимуємо кінетичні коефіцієнти ТЕМ. Нехай за деякої температури T_0 нам відомі його термоелектричні параметри, а саме термоЕРС α_{s0} , електропровідність σ_{s0} та теплопровідність κ_{s0} . Для побудови їх температурних залежностей за цими даними зробимо наступні модельні припущення:

1. зонний спектр носіїв заряду у ТЕМ є параболічним та ізотропним з незалежною від температури ефективною масою;
2. квазіпружне розсіювання носіїв заряду в актуальній температурній області відбувається на деформаційному потенціалі акустичних фононів з незалежним від енергії перерізом і довжиною вільного пробігу, обернено пропорційною до температури;
3. ґраткова частина теплопровідності напівпровідника визначається розсіюванням фононів одного на одному з перекиданням і є обернено пропорційною до температури.

За умови справедливості цих припущень показник розсіювання носіїв заряду $r = -0.5$. З врахуванням його значення побудова необхідних температурних залежностей на основі відомих загальних співвідношень [13] здійснюється у наступному порядку.

Зі співвідношення для термоЕРС

$$\alpha_{s0} = \frac{k}{e} \left[\frac{2F_1(\eta_0)}{F_0(\eta_0)} - \eta_0 \right] \quad (17)$$

знаходимо зведений хімічний потенціал η_0 газу носіїв заряду за температури T_0 .

Використовуючи умову сталості концентрації носіїв заряду та їх ефективної маси, з рівняння

$$\frac{T^{1.5} F_{0.5}(\eta)}{T_0^{1.5} F_{0.5}(\eta_0)} = 1 \quad (18)$$

визначаємо температурну залежність зведеного хімічного потенціалу η газу носіїв заряду від температури T у заданому інтервалі температур.

Зі співвідношення

$$\alpha_s = \frac{k}{e} \left[\frac{2F_1(\eta)}{F_0(\eta)} - \eta \right] \quad (19)$$

визначаємо температурну залежність термоЕРС ТЕМ.

Зі співвідношення

$$L_s(\eta) = \left(\frac{k}{e}\right)^2 \left[\frac{3F_2(\eta)}{F_0(\eta)} - \frac{4F_1^2(\eta)}{F_0^2(\eta)} \right] \quad (20)$$

визначаємо температурну залежність числа Лоренца ТЕМ.

Температурна залежність електропровідності ТЕМ за зазначених вище модельних припущень визначається так:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{F_0(\eta)F_{0.5}(\eta_0)}{F_{0.5}(\eta)F_0(\eta_0)}. \quad (21)$$

Температурна залежність теплопровідності ТЕМ з врахуванням усього, сказаного вище, визначається так:

$$\kappa_s = \sigma_s L_s(\eta) T + [\kappa_{s0} - \sigma_{s0} L_s(\eta_0) T_0] \frac{T_0}{T}. \quad (22)$$

У формулах (17) – (21) через $F_m(\eta)$ позначено інтеграли Фермі, які визначаються наступним співвідношенням:

$$F_m(\eta) = \int_0^{\infty} x^m [\exp(x - \eta) + 1]^{-1} dx. \quad (23)$$

Співвідношення (17) – (22) з урахуванням (23) повністю визначають температурні залежності термоЕРС, електропровідності та теплопровідності ТЕМ.

Апроксимація температурних залежностей електропровідності, теплопровідності та термоЕРС металу здійснюється так. Вважаємо, що в металі, так само, як і в ТЕМ, розсіювання вільних носіїв заряду відбувається на деформаційному потенціалі акустичних фононів, причому, в актуальній області температур довжина вільного пробігу носіїв заряду є обернено пропорційною до температури. Тоді, враховуючи сильне виродження носіїв заряду у металі, температурну залежність його електропровідності визначатимемо так [14]:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \cdot (T_0/T), \quad (24)$$

і, отже, враховуючи співвідношення Відемана-Франца, теплопровідність металу κ_m будемо вважати незалежною від температури. Незалежною від температури у досліджуваному інтервалі температур будемо вважати і термоЕРС металу α_m . Далі, знаючи згадані температурні залежності, ми зі співвідношень (8) – (16) знайдемо температурні залежності характеристик перехідного контактного шару.

Результати розрахунку та їх обговорення

Температурні залежності електричного та теплового контактних опорів, термоЕРС, фактору потужності та безрозмірної термоелектричної ефективності перехідного контактного шару «ТЕМ-метал» для пари телурид вісмуту-нікель, отримані в рамках описаної вище методики розрахунку за

умови, що нерівномірний розподіл атомів металу у товщі перехідного шару зберігається, наведено на рис. 1 – 7.

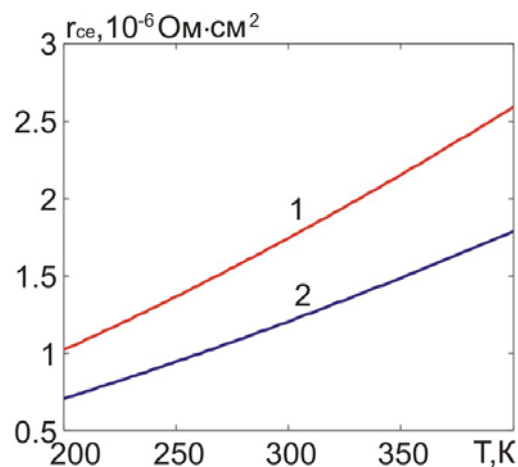


Рис. 1. Температурні залежності електричного контактного опору з урахуванням явища перколяції за товщини перехідного шару, рівної 20 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

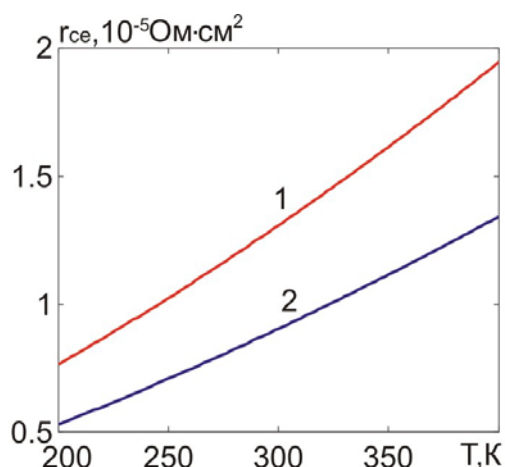


Рис. 2. Температурні залежності електричного контактного опору з урахуванням явища перколяції за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

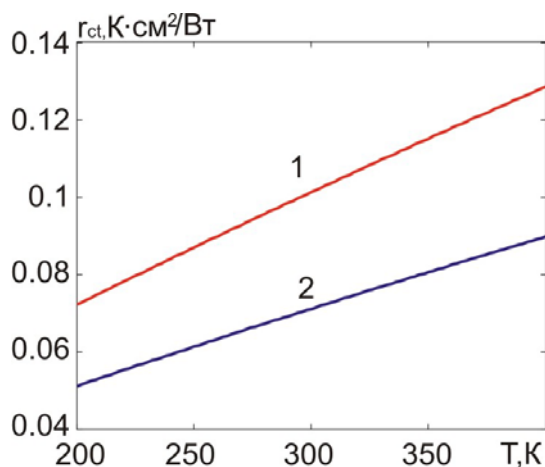


Рис. 3. Температурні залежності теплового контактного опору з урахуванням явища перколяції за товщини перехідного шару, рівної 20 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

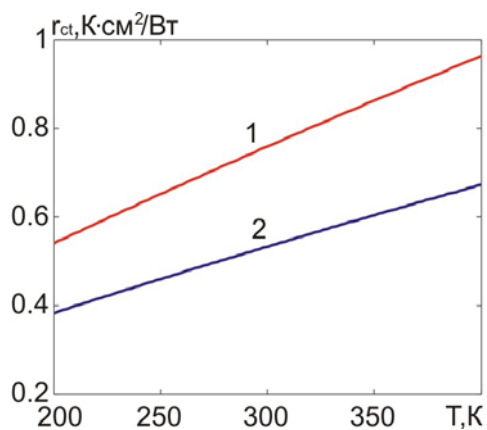


Рис. 4. Температурні залежності теплового контактного опору з урахуванням явища перколяції за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

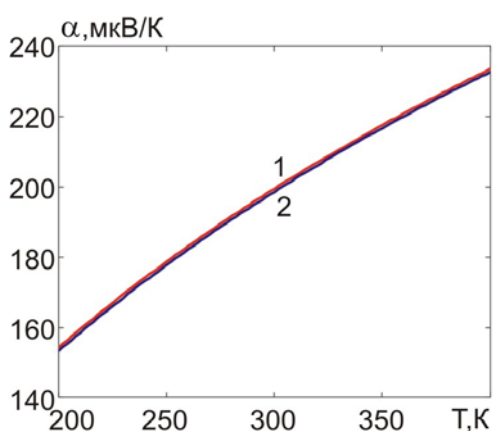


Рис. 5. Температурні залежності термоЕРС перехідного шару: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

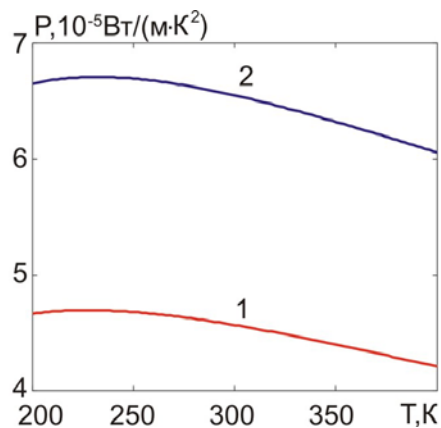


Рис. 6. Температурні залежності фактору потужності перехідного шару з урахуванням явища перколяції: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

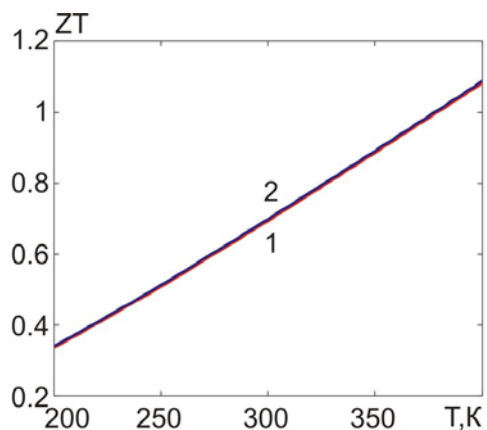


Рис. 7. Температурні залежності безрозмірної термоелектричної ефективності перехідного шару з урахуванням явища перколяції 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

Аналогічні температурні залежності після вирівнювання концентрації металу у перехідному шарі наведено на рис. 8 – 14.

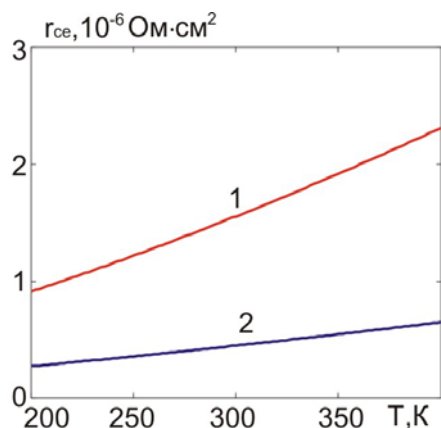


Рис. 8. Температурні залежності електричного контактного опору з урахуванням явища перколяції після вирівнювання концентрації металу за товщини перехідного шару, рівної 20 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

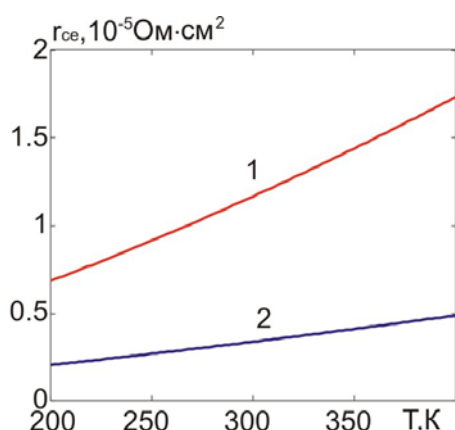


Рис. 9. Температурні залежності електричного контактного опору з урахуванням явища перколяції після вирівнювання концентрації металу за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

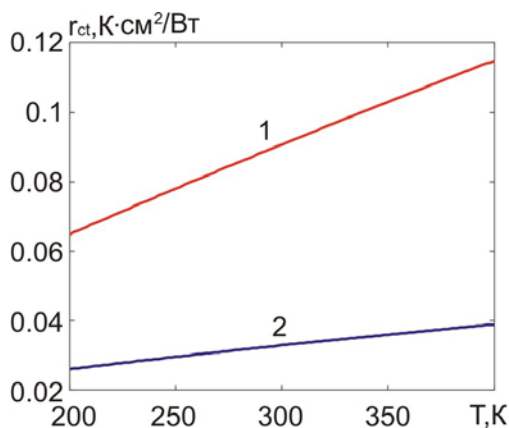


Рис.10. Температурні залежності теплового контактного опору з урахуванням явища перколяції після вирівнювання концентрації металу за товщини перехідного шару, рівної 20 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

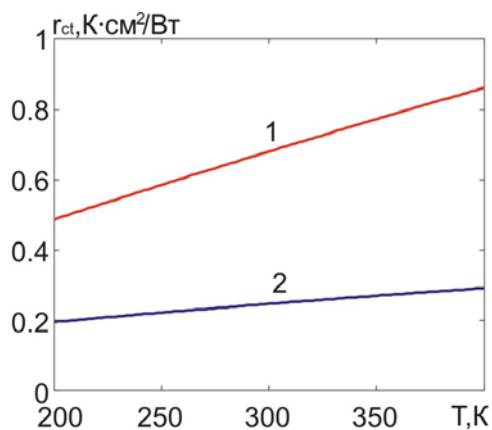


Рис.11. Температурні залежності теплового контактного опору з урахуванням явища перколяції після вирівнювання концентрації металу за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

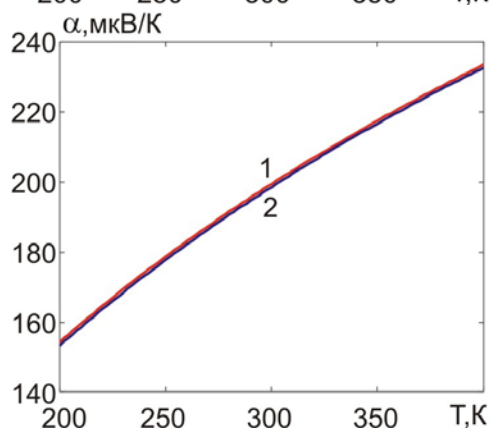


Рис.12. Температурні залежності термоЕРС перехідного шару після вирівнювання концентрації металу: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

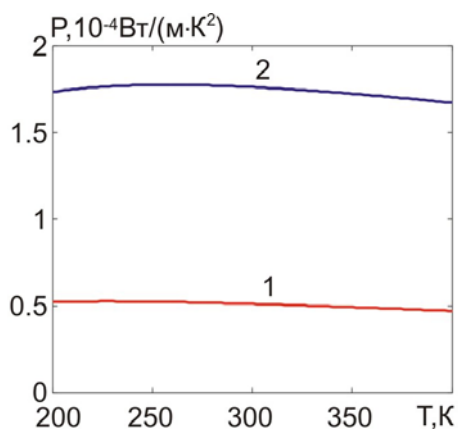


Рис.13. Температурні залежності фактору потужності перехідного шару з урахуванням явища перколяції після вирівнювання концентрації металу: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

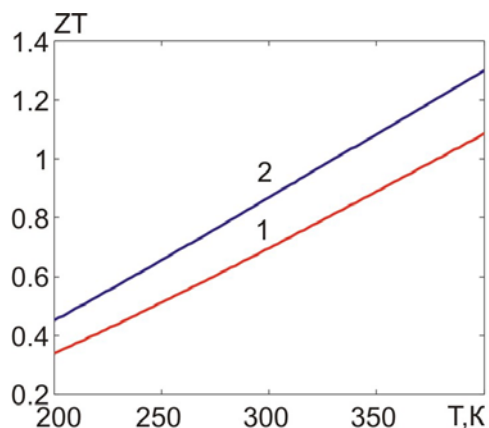


Рис.14. Температурні залежності безрозмірної термоелектричної ефективності перехідного шару з урахуванням теорії протікання після вирівнювання концентрації металу: 1 – $A=0$; 2 – $A=1$.

При побудові графіків взято такі параметри матеріалів за 300 К: $\sigma_m = 1.25 \cdot 10^5$ См/см, $\sigma_s = 800$ См/см, $\kappa_m = 92$ Вт/(м·К), $\kappa_s = 1.4$ Вт/(м·К), $\alpha_m = -23$ мкВ/К, $\alpha_s = 200$ мкВ/К, і, окрім того, $A_m = 58.5$, $A_s = 801$, $\rho_m = 9100$ кг/м³, $\rho_s = 7700$ кг/м³. З рисунків видно, що у дослідженому інтервалі температур електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС та безрозмірна термоелектрична ефективність перехідного шару зростають, а фактор потужності має максимум в інтервалі 200 – 250 К. Такі температурні залежності можна пояснити зростанням питомих опорів металу і напівпровідника, зменшенням їх теплопровідності та зростанням термоЕРС напівпровідника при зростанні температури. Зі зростанням товщини перехідного шару електричний та тепловий контактні опори зростають пропорційно до цієї товщини. Наявність максимуму на температурній залежності фактору потужності пояснюється двома конкуруючими процесами: зростанням термоЕРС і зменшенням електропровідності ТЕМ зі зростанням температури. При цьому слід зазначити, що термоЕРС перехідного шару в основному визначається напівпровідником внаслідок того, що теплопровідність металу істотно більша за теплопровідність напівпровідника.

Окрім того з рисунків видно, що зі зростанням параметру A , тобто інтенсивності надходження атомів металу у перехідний шар тепловий та електричний контактні опори, а також термоЕРС спадають, а фактор потужності та безрозмірна термоелектрична добротність зростає. В цілому у досліджених інтервалах температур, інтенсивності надходження металу у перехідний шар та товщин перехідного шару електричний контактний опір змінюється від $7 \cdot 10^{-7}$ до $1.9 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², тепловий контактний опір – від 0.052 до 0.98 К·см²/Вт, термоЕРС – від 155 до 235 мкВ/К, фактор потужності – від $4.2 \cdot 10^{-5}$ до $6.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К²), безрозмірна термоелектрична ефективність – від 0.35 до 1.08. Таким чином, електричний та тепловий контактні опори, передбачувані при врахуванні теорії протікання, є, як і очікувалось, істотно більшими, а фактор потужності та безрозмірна термоелектрична ефективність – істотно меншими, ніж без врахування цієї теорії. На передбачувану температурну залежність термоЕРС перехідного контактного шару врахування теорії протікання не впливає.

З рисунків також видно, що після вирівнювання концентрації металу в об'ємі перехідного шару передбачувані значення електричного та теплового контактних опорів за всіх температур знижуються, термоЕРС практично не змінюється, а фактор потужності та безрозмірна термоелектрична ефективність зростають у порівнянні з випадком нерівномірного розподілу, але не так істотно, як без урахування теорії протікання.

Щодо впливу параметру A , тобто інтенсивності надходження металу у перехідний шар, на прогнозовані термоелектричні характеристики перехідного шару, то як у випадку нерівномірного, так і у випадку рівномірного розподілу при врахуванні теорії протікання зберігається та сама тенденція, що і без врахування цієї теорії. Виняток становить лише фактор потужності. На відміну від випадку нерівномірного розподілу концентрації, коли він має максимум як за $A=0$, так і за $A=1$, після її вирівнювання у дослідженому інтервалі температур фактор потужності має максимум лише за $A=1$.

В цілому у досліджених інтервалах температур, інтенсивності надходження металу у перехідний шар та товщин перехідного шару після вирівнювання концентрації металу електричний контактний опір змінюється від $2.5 \cdot 10^{-7}$ до $1.75 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², тепловий контактний опір – від 0.025 до 0.85 К·см²/Вт, термоЕРС – від 155 до 235 В/К, фактор потужності – від $5 \cdot 10^{-5}$ до $1.9 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м·К²), безрозмірна термоелектрична ефективність – від 0.35 до 1.3. Таким чином, після вирівнювання концентрації електричний контактний опір спадає у 1.12 – 3.6 рази, тепловий контактний опір спадає у 1.15 – 2.08 рази, термоЕРС практично не змінюється, фактор потужності зростає у 1.19 – 2.79 рази, безрозмірна термоелектрична ефективність зростає максимально у 1.2 рази. Зауважимо, що хоча для термоелектричних контактних структур такі їх характеристики, як фактор потужності та безрозмірна термоелектрична ефективність самостійного значення з точки зору проектування термоелектричних

перетворювачів енергії не мають, вони є корисними з точки зору інтегральної оцінки якості цих структур.

Вплив контактного опору на ККД термоелектричного генераторного модуля.

Наведені температурні залежності електричного та теплового контактних опорів було використано для розрахунків ККД термоелектричних генераторних модулів з висотами термоелектричних гілок, які дорівнювали відповідно 3 та 1.5 мм. Розрахунки виконувались засобами об'єктно орієнтованого моделювання у програмному середовищі Comsol multiphysic.

Для цього розглядалась фізична модель термоелектричного генераторного модуля, зображена на рис. 15.

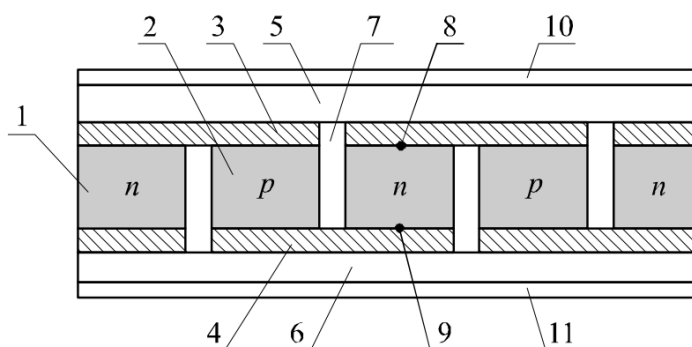


Рис. 15. Фізична модель термоелектричного генераторного модуля.

1 – вітка n-типу; 2 – вітка p-типу; 3, 4 – електричні комутації;
5, 6 – керамічні пластини; 7 – газ; 8, 9 – електричні контакти між вітками
й комутаційними пластинами; 10 – тепловий контакт між керамічною
пластиною й гарячим термостатом; 11 – тепловий контакт між
керамічною пластиною й холодним термостатом.

Розподіл температури та електричного потенціалу в модулі визначався з системи диференціальних рівнянь відносно температури T та електрохімічного потенціалу U . Ці рівняння отримувались на основі закону збереження енергії, який можна подати у вигляді таких двох рівнянь:

$$\nabla \vec{w} = 0, \quad (25)$$

$$\vec{w} = \vec{q} + U\vec{j}. \quad (26)$$

У формулах (25) та (26) \vec{j} – густина електричного струму, \vec{q} – густина потоку тепла:

$$\vec{q} = -\kappa \nabla T + \Pi \vec{j}, \quad (27)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє, κ – питома теплопровідність.

$$\Pi = \alpha T, \quad (28)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, T – температура.

Густина електричного струму знаходиться з рівняння

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T \quad \vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T, \quad (29)$$

де σ – питома електропровідність.

Підставивши (26), (27) у (25), отримаємо

$$-\nabla(\kappa \nabla T) + (\nabla \Pi + \nabla U) \vec{j} = 0. \quad (30)$$

З виразу (30), використавши (28) і (29), отримаємо наступне рівняння для знаходження розподілів температури та потенціалу:

$$-\nabla[(\sigma \alpha^2 T + \kappa) \nabla T] - \nabla(\sigma \alpha T \nabla U) - \sigma[(\nabla U)^2 + \alpha \nabla T \nabla U] = 0. \quad (31)$$

Для отримання другого рівняння скористаємось законом збереження електричного заряду:

$$\nabla \vec{j} = 0 \quad \text{div } \vec{j} = 0. \quad (32)$$

Підставивши (29) у (32), отримаємо таке рівняння:

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (33)$$

Система (31), (33) є системою диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами другого порядку в частинних похідних, що описує розподіл температури й потенціалу в неоднорідному термоелектричному середовищі. Особливість системи рівнянь (31), (33) полягає в тому, що параметри α , σ , κ залежать від просторових координат x , y , z як безпосередньо, так і неявно через температуру $T(x, y, z)$. Це призводить до того, що стає неминучим застосування чисельних комп'ютерних методів для розв'язку рівнянь такого роду.

У комп'ютерній моделі термоелектричне поле описується двоелементною матрицею-стовпцем у функціональному просторі двічі диференційовних функцій, а саме координатних залежностей температури і потенціалу:

$$M = \begin{pmatrix} T(x, y, z) \\ U(x, y, z) \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Матриця M задовольняє одному матричному диференціальному рівнянню

$$-\nabla(-\epsilon \nabla M) = f, \quad (35)$$

компонентами якого є рівняння (31) та (33), якщо матричні нелінійні коефіцієнти рівняння (35) мають вигляд

$$c = \begin{pmatrix} \sigma\alpha^2 T + \kappa & \sigma\alpha T \\ \alpha\sigma & \sigma \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} \sigma [(\nabla U)^2 + \nabla T \nabla U] \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Система рівнянь вигляду (35) при врахуванні (36) розв'язується для кожного з шарів, з яких складається термоелектричний модуль. Для цього додатково вводяться граничні умови неперервності температури, електричного потенціалу, теплового потоку та густини електричного струму на межах шарів. Окрім того з міркувань оптимальності умов, в яких працює термоелемент, і які визначаються з вимоги досягнення максимальної величини коефіцієнта корисної дії, задаються потенціали на комутаційних електродах та температури «гарячого» і «холодного» термостатів. Тому потенціали на комутаційних електродах однієї з гілок складають 0 та 0.0573 В, на другій – 0.0573 та 0.1146 В, а температури «холодного» та «гарячого» термостатів – 273 та 573 К відповідно.

Вплив електричного та теплового контактних опорів при цьому враховується у фізичній моделі в рамках двох підходів. Перший полягає в тому, що контактний шар не вводиться явним чином у фізичну модель, але його питома електропровідність та теплопровідність вважаються відомими з експерименту або, як у даному випадку, попередньо визначеними розрахунковим шляхом функціями температури. Тоді враховується пропорційність електричного та теплового контактних опорів до товщини шару. Другий підхід полягає в тому, що контактний шар із залежними від температури теплопровідністю та електропровідністю з урахуванням його товщини в явному вигляді вводиться у фізичну модель. ТермоЕРС контактного шару на даному етапі досліджень не враховується.

Такий математичний опис фізичної моделі дає можливість розв'язати описану вище систему рівнянь для температури і потенціалу у середовищі мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics. Результатами розв'язання рівняння (11) є тривимірні температурне й електричне поля в заданій геометрії термоелектричного модуля. Їх приклади для одного термоелемента, який входить до складу модуля з висотою гілки 3 мм, зображено на рис. 16, 17. Знаючи ці поля, легко розрахувати основні енергетичні характеристики модуля.

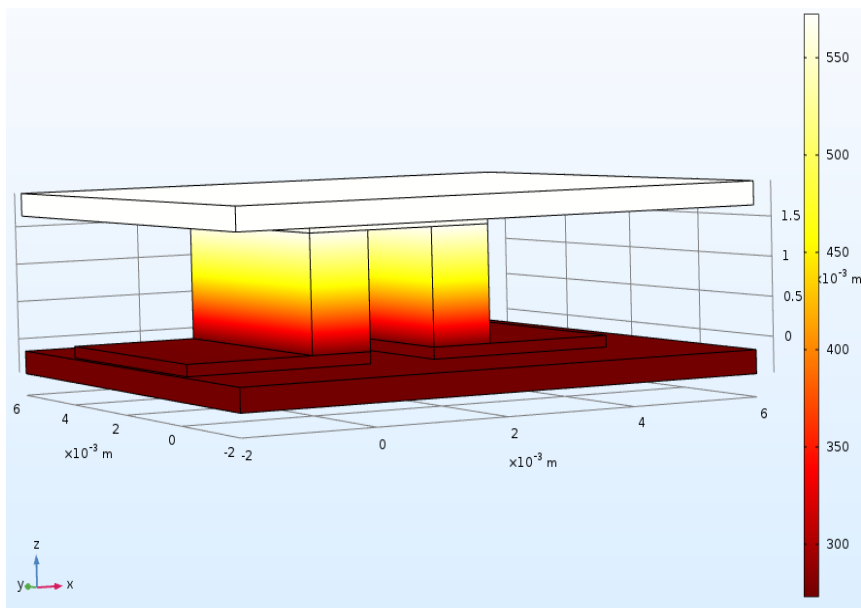


Рис. 16. Температурне поле у термоелементі

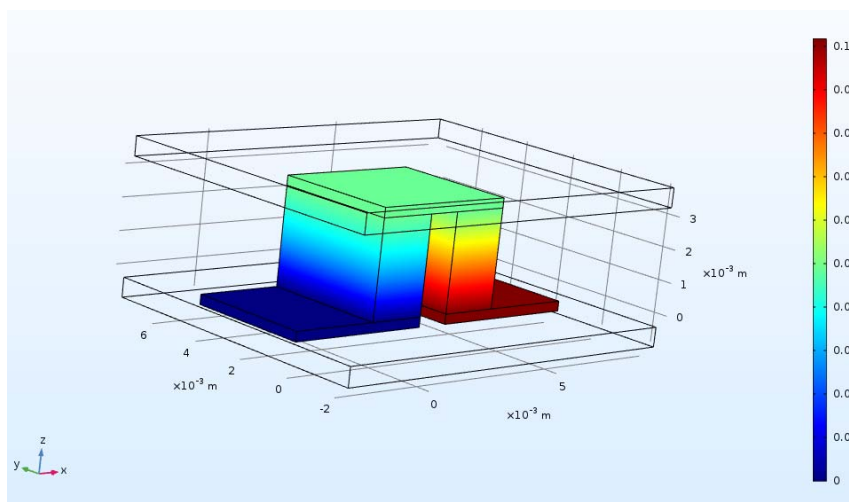


Рис. 17. Розподіл електричного потенціалу у термоелементі

Результати цих розрахунків наведено на рис. 18 – 21.

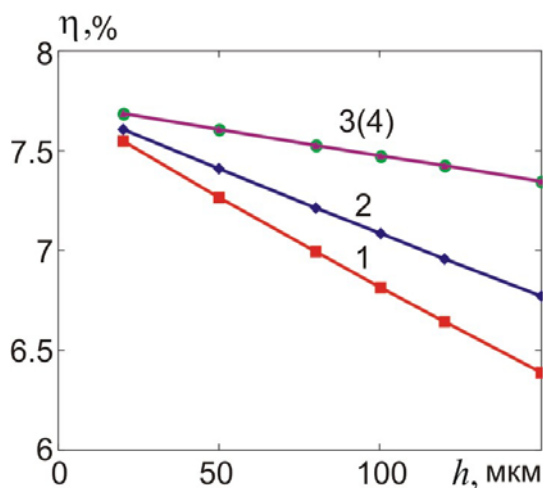


Рис. 18. Залежність ККД генераторного модуля з висотою гілки 3 мм від товщини перехідного шару для випадку, коли контактний опір вважається зосередженим параметром: 1 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 2 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 3 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний; 4 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний

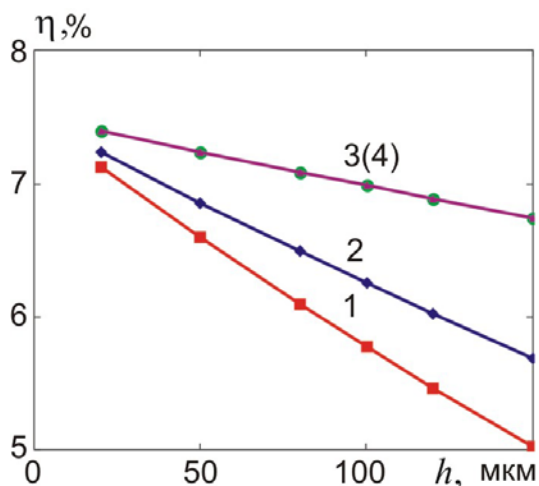


Рис. 19. Залежність ККД генераторного модуля з висотою гілки 1.5 мм від товщини перехідного шару для випадку, коли контактний опір вважається зосередженим параметром: 1 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 2 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 3 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний; 4 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний

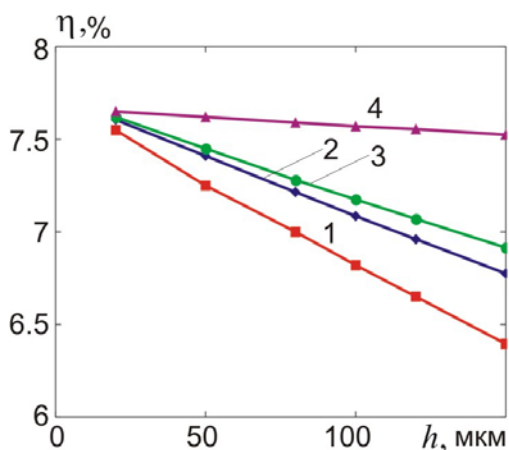


Рис. 20. Залежність ККД генераторного модуля з висотою гілки 3 мм від товщини перехідного шару для випадку, коли перехідний шар явно вводиться у модель: 1 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 2 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 3 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний; 4 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний

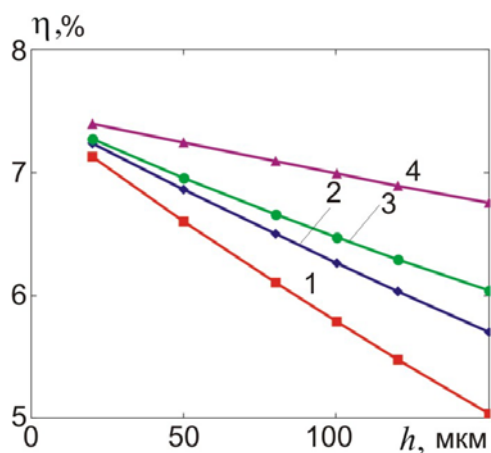


Рис. 21. Залежність ККД генераторного модуля з висотою гілки 1.5 мм від товщини перехідного шару для випадку, коли перехідний шар явно вводиться у модель: 1 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 2 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі нерівномірний; 3 – $A=0$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний; 4 – $A=1$, розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний

Зауважимо, що у даному випадку, як і за відсутності кластерів у перехідному шарі, його термоЕРС вважалась рівною нулеві.

З рисунків видно, що у даному випадку, як і за відсутності кластерів, ККД термоелемента у режимі генерування електричної енергії є найбільшим, коли розподіл атомів металу у перехідному шарі рівномірний. Окрім того, за інших рівних умов, він тим більший, чим більша інтенсивність джерела, з якого метал надходить у перехідний шар. У випадку нерівномірного розподілу атомів металу у перехідному шарі ККД спадає зі зростанням товщини перехідного шару тим сильніше, чим менша висота термоелектричної гілки. Однак значення ККД дещо зменшується у порівнянні з тим випадком, коли кластерів у перехідному шарі немає. В цілому у розглянутому інтервалі висот термоелектричних гілок та товщин шарів ККД змінюється від 5% до 7.5% у випадку, коли контактний шар явно вводиться в модель, та від 5 до 7.4% у випадку, коли контактний опір вважається зосередженим параметром. У випадку, коли перехідний шар вводиться в модель, ККД після вирівнювання розподілу атомів металу у перехідному шарі істотно залежить від інтенсивності джерела, з якого відбувається стаціонарна дифузія металу у ТЕМ.

Висновки

1. З урахуванням явища перколяції розрахунковим шляхом отримано температурні залежності електричного та теплового контактних опорів, термоЕРС, фактору потужності та термоелектричної добротності перехідних контактних шарів телурид вісмуту – нікель у припущенні, що розсіювання носіїв заряду у напівпровіднику і металі відбувається на

деформаційному потенціалі акустичних фононів, теплопровідність металу визначається електронним газом, а ґраткова теплопровідність напівпровідника – розсіюванням фононів одного на одному з перекиданням. При цьому вважалось, що нікель не утворює нових фаз з телуридом вісмуту.

- Показано, що як за нерівномірного так і за рівномірного розподілу атомів металу у перехідному шарі електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС та безрозмірна термоелектрична ефективність перехідного шару є зростаючими функціями температури та інтенсивності надходження атомів металу у перехідний шар під час створення контакту.
- Фактор потужності у дослідженому інтервалі температур є зростаючою функцією інтенсивності надходження атомів металу у перехідний шар, і в той же час має максимум на температурній залежності у разі нерівномірного розподілу атомів металу у перехідному шарі, однак за малих інтенсивностей надходження атомів металу у перехідний шар стає монотонно спадною функцією температури в разі вирівнювання розподілу концентрації атомів металу у перехідному шарі.
- В разі нерівномірного розподілу атомів металу в інтервалі температур 200 – 400 К, інтенсивності надходження атомів металу у перехідний шар, яка відповідає зміні параметру A від 0 до 1 та інтервалі товщин перехідного шару від 20 до 150 мкм електричний контактний опір змінюється від $7 \cdot 10^{-7}$ до $1.9 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², тепловий контактний опір – від 0.052 до 0.98 К·см²/Вт, термоЕРС – від 155 до 235 мкВ/К, фактор потужності – від $4.2 \cdot 10^{-5}$ до $6.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К²), безрозмірна термоелектрична ефективність – від 0.35 до 1.08.
- Після вирівнювання розподілу концентрації атомів металу у перехідному шарі електричний контактний опір спадає у 1.12 – 3.6 рази, тепловий контактний опір спадає у 1.15 – 2.08 рази, термоЕРС практично не змінюється, фактор потужності зростає у 1.19 – 2.79 рази, безрозмірна термоелектрична ефективність зростає максимально у 1.2 рази у порівнянні з випадком нерівномірного розподілу.
- Дослідження впливу перехідного контактного шару з кластерами на ККД термоелемента у режимі генерації показали, що за інших рівних умов, якщо вплив термоЕРС перехідного шару не береться до уваги, у розглянутому інтервалі висот термоелектричних гілок та товщин шарів у випадку, коли контактний шар явно вводиться в модель, ККД змінюється від 5 до 7.5%. Коли ж контактний опір вважається, зосередженим параметром, ККД змінюється від 5 до 7.4%. У випадку, коли перехідний шар вводиться в модель, ККД після вирівнювання розподілу атомів металу у перехідному шарі істотно залежить від інтенсивності джерела, з якого відбувається стаціонарна дифузія металу у ТЕМ, в той час, як у випадку, коли контактний опір вважається зосередженим параметром, ця залежність слабка.

Література

- Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Том 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы, Институт термоэлектричества, 2003.
- D.K. Aswal, R. Basu, A. Singh, Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects, Energy Convers. Manag. 114 (2016) 50-67. [http://refhub.elsevier.com/S2468-6069\(18\)30133-3/sref1](http://refhub.elsevier.com/S2468-6069(18)30133-3/sref1)
- Анатычук Л.И., Кузь Р.В. Энергетические и экономические показатели термоэлектрических генераторных модулей на основе *Bi-Te* для рекуперации отходов тепла. Термоэлектричество. -2012, №4. – С.75-82.
- И.А. Драбкин, В.Б. Освенский, А.И. Сорокин, В.П. Панченко, О.Е. Нарожная. Контактное

- сопротивление в составных термоэлектрических ветвях. ФТП, 2017, т.51, вып.8, с.1038-1040.
5. Алиева Т.Д., Бархалов Б.Ш., Абдинов Д.Ш. Структура и электрические свойства границ раздела кристаллов $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$ с некоторыми сплавами // Неорганические материалы. – 1995. – Т.31. – №2. – С.194-198.
 6. Rahul P. Gupta, K. Xiong, J. B. White, Kyeongjae Cho, H. N. Alshareef, B. E. Gnade. Low Resistance Ohmic Contacts to Bi_2Te_3 Using Ni and Co Metallization. *Journal of the Electrochemical Society*, **157** (6), H666-H670, 2010. DOI: 10.1149/1.3385154
 7. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi_2Te_3 based thermoelectric devices/ R.P. Gupta, R. McCarty, J. Sharp // *J. El. Mat.* – 2014. – Vol.43, Is.6. – P.1608-1612.
 8. Бублик В.Т., Воронин А.И., Пономарев В.Ф., Табачкова Н.Ю. Изменение структуры приконтактной области термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута при повышенных температурах // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – №2. – С.17-20.
 9. Займан Дж. Модели беспорядка / Займан Дж. – М.: Мир, 1982. – 592с.
 10. Снарський А.О. Про закон Відемана-Франца в термоелектричних композитах / А.О. Снарський, М.І. Женіровський, І.В. Безсуднов // Термоелектрика – 2006. – №3. – С.59-65.
 11. Klemens P.G. Lattice thermal conductivity / P.G. Klemens // *Solid State Physics. Advances in Research and Applications* / P.G. Klemens. – New York, 1958 Vol.7, P.1-98. (New York: Academic Press Inc. Publishers, 1958 – 526 p.)
 12. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М: Наука, 1972. – 736 с.
 13. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 / Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. – М.: Наука, 1972. – 320 с.
 14. Лифшиц И.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. / И.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский – М: Наука, 1979. – 528 с.

Надійшла до редакції 11.06.2019

Горский П.В.^{1,2}, *док. физ.-мат. наук*^{1,2}
Мыцканюк Н.В.^{1,2}

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

²Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинського 2
Черновцы, 58012, Украина

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА МЕТАЛЛ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРКОЛЯЦИИ

Расчетным путем получены основные соотношения, определяющие температурные зависимости термоэлектрических характеристик переходных контактных слоев термоэлектрический

матеріал-металл з урахуванням явлення перколяції. Конкретні кількісні результати і графіки температурних залежностей електричного і теплового контактних опорів, термоЕДС, фактора потужності і безрозмірної термоелектричної ефективності перехідного контактної шари телурид вистуту - нікель. Установлено, що в температурному інтервалі 200-400 К при умови збереження нерівномірного розподілу частинок металу в перехідному шарі і його товщини в діапазоні 20-150 мкм електричний контактний опір змінюється від $7 \cdot 10^{-7}$ до $1.9 \cdot 10^{-5}$ Ом \cdot см², теплове контактний опір - від 0.052 до 0.98 К \cdot см²/Вт, термоЕДС - від 155 до 235 мкВ/К, фактор потужності - від $4.2 \cdot 10^{-5}$ до $6.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м \cdot К²), безрозмірна термоелектрична ефективність - від 0.35 до 1.08. Після вирівнювання концентрації електричний контактний опір зростає в 1.12 - 3.6 рази, теплової контактний опір зростає в 1.15 - 2.08 рази, термоЕДС практично не змінюється, фактор потужності зростає в 1.19 - 2.79 рази, безрозмірна термоелектрична ефективність зростає максимально в 1.2 рази. Бібл. 14, рис. 21.

Ключові слова: контакт термоелектричний матеріал - метал, приконтактний перехідний шар, електричний контактний опір, теплової контактний опір, термоЕДС, теорія протекання.

Gorskyi P.V. *dok. phys.-mat. sciences*^{1,2},
Mytskaniuk N.V.^{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, 58012, Ukraine

ON THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THERMOELECTRIC CHARACTERISTICS OF BISMUTH TELLURIDE-METAL TRANSIENT LAYER WITH DUE REGARD FOR PERCOLATION EFFECT

The basic relationships are obtained by calculation, which determine the temperature dependences of thermoelectric characteristics of thermoelectric material-metal transient contact layers with due regard for percolation theory. Specific quantitative results and plots of the temperature dependences of the electrical and thermal contact resistances, the thermoEMF, the power factor, and the dimensionless thermoelectric figure of merit are given for bismuth telluride – nickel contact pair. It has been established that in the temperature range of 200-400 K on retention of uneven distribution of metal particles in transient layer and its thickness in the range of 20-150 μ m, the electrical contact resistance varies from $7 \cdot 10^{-7}$ to $1.9 \cdot 10^{-5}$ Ohm \cdot cm², the thermal contact resistance – from 0.052 to 0.98 K \cdot cm²/W, the thermoEMF – from 155 to 235 μ V/K, the power factor – from $4.2 \cdot 10^{-5}$ to $6.8 \cdot 10^{-5}$ W/(m \cdot K²), the dimensionless thermoelectric figure of merit – from 0.35 to 1.08. After levelling the concentration, the electrical contact resistance decreases by a factor of 1.12 – 3.6, the thermal contact resistance decreases by a factor of 1.15 – 2.08, the thermoEMF is practically unvaried, the power factor increases by a factor of 1.19 – 2.79, the dimensionless thermoelectric figure of merit increases maximum 1.2 times. Bibl. 14, Fig. 21.

Key words: thermoelectric material-metal contact, near-contact transient layer, electrical contact resistance, thermal contact resistance, thermoEMF, percolation theory.

References

1. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. Tom 2. Termoelektricheskiie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters]*. Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
2. Aswal D.K., Basu R., Singh A. (2016). Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects. *Energy Convers. Manag.*, 114, 50-67. [http://refhub.elsevier.com/S2468-6069\(18\)30133-3/sref1](http://refhub.elsevier.com/S2468-6069(18)30133-3/sref1)
3. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2012). The energy and economic parameters of *Bi-Te* based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *J. Thermoelectricity*, 4, 7 5-82.
4. Drabkin I.A., Osvensky V.B., Sorokin A.I., Panchenko V.P., Narozhnaia O.E. (2017). Kontaknoie soprotivleniie v sostavnykh termoelektricheskikh vetviakh [Contact resistance in composite thermoelectric legs]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov – Semiconductors*, 51(8), 1038-1040 [in Russian].
5. Alieva T.D., Barkhalov B.Sh., Abdinov D.Sh. (1995).). Struktura i elektricheskiie svoistva granits razdela kristallov $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ i $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$ s nekotorymi splavami [Structure and electrical properties of interfaces between $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ and $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$ crystals with certain alloys]. *Neorganicheskiie Materialy – Inorganic Materials*, 31 (2), 194-198.
6. Gupta Rahul P., Xiong K., White J.B., Cho Kyeongjae, Alshareef H.N., Gnade B.E. (2010). Low resistance ohmic contacts to Bi_2Te_3 using Ni and Co metallization. *Journal of the Electrochemical Society*, 157 (6), H666-H670. DOI: 10.1149/1.3385154
7. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2014). Practical contact resistance measurement method for bulk Bi_2Te_3 based thermoelectric devices. *J. El. Mat.*, 43(6), 1608-1612.
8. Bublik V.T., Voronin A.I., Ponomarev V.F., Tabachkova N.Yu. (2012). Izmeneniie struktury prikontaknoi oblasti termoelektricheskikh materialov na osnove telluride vismuta pri povyshennykh temperaturakh [Change in the structure of near-contact area of thermoelectric materials based on bismuth telluride at elevated temperatures]. *Izvestiia vysshykh uchebnykh zavedenii. Materaily Elektronnoi Tekhniki - News of Higher Educational Institutions. Materials of Electronic Technique*, 2, 17-20 [in Russian].
9. Zaiman G. (1982). *Models of disorder*. Moscow: Mir [Russian transl.]
10. Snarskii A.O., Zhenirovskii M.I., Bezsudnov I.V. (2006). The law of Wiedemann-Franz in thermoelectric composites. *J. Thermoelectricity*, 3, 59-65.
11. Klemens P.G. (1958). Lattice thermal conductivity. *Solid State Physics. Advances in Research and Applications. Vol.7*. New York: Academic Press Inc. Publishers.
12. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. (1972). *Urvnenniia matematicheskoi fiziki [Mathematical physics equations]*. Moscow: Nauka [in Russian].
13. Goltsman B.M., Kudinov I.A., Smirnov I.A. (1972). *Poluprovodnikovyye termoelektricheskiie materaily na osnove Bi_2Te_3 [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi_2Te_3]*. Moscow: Nauka [in Russian].
14. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. (1979). *Fizicheskaiia kinetika [Physical kinetics]*. Moscow: Nauka [in Russian].

Submitted 11.06.2019

Снарський А., док. фіз.-мат. наук, професор^{1,2},
Юськевич П.¹



Снарський А.



Юськевич П.

¹Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
проспект Перемоги 37, 03056 Київ, Україна,
e-mail: asnarskii@gmail.com

²Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
вул. Н. Шпака 2, 03113 Київ, Україна

ТЕОРІЯ СЕРЕДНЬОГО ПОЛЯ ДЛЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З РІЗНИМИ ПОРОГАМИ ПРОТІКАННЯ

В роботі побудовано модифіковану теорію ефективного середовища для обчислень ефективних кінетичних коефіцієнтів термоелектричних композитів з різними значеннями порогів протікання. Показано, що навіть за концентрацій поза критичною областю величина порогу істотна для визначення ефективних властивостей. Розглянуто два принципово різних випадки набору локальних властивостей композиту. Один з них, коли провідність і теплопровідність однієї з фаз одночасно більша за провідність та теплопровідність другої фази. Другий, аномальний випадок, коли електропровідність першої фази (σ_1) більша від другої, але теплопровідність першої фази менша від другої, показує незвичайну концентраційну поведінку ефективної провідності, тобто при зростанні частки добре провідної фази ефективна провідність демонструє зменшення, а не зростання як у стандартному випадку, див. рис. 1а), яке при $p \approx \tilde{p}_c$ переходить в зростання. Бібл. 20, рис. 5.

Ключові слова: термоелектрика, теорія протікання, поріг протікання, композити, ефективні властивості.

Вступ

Обчислення ефективних значень кінетичних коефіцієнтів для композитних матеріалів є складною, нерозв'язною в загальному випадку задачею. Також розв'язки можливі, як винятковий випадок, для одновимірної неоднорідності. Або для строго періодичних структур, наприклад, для сферичних включень однієї фази в матрицю іншої. Навіть в разі включень простої форми, розв'язки є досить громіздкими і виражаються у вигляді нескінченних рядів, важких для аналізу [1 – 7].

Для опису випадково-неоднорідних середовищ, з випадково розташованими включеннями однієї фази в іншій існують наближені методи, які дозволяють наближено описувати концентраційне поведінку ефективних коефіцієнтів з різною точністю. Наприклад, наближення Максвела [8] дозволяє описати концентраційну поведінку ефективних коефіцієнтів з точністю до першого ступеня концентрації.

Для всього діапазону концентрацій хорошим наближенням є наближення Бруггемана-Ландауера [9, 10], що являє собою наближення самоузгодженого (середнього) поля.

Недоліком наближення Бруггемана-Ландауера є фіксований в цьому наближенні поріг проті-

кання. За великої відмінності фізичних властивостей фаз, наприклад, за провідності першої фази σ_1 набагато більшої від провідності другої σ_2 ($\sigma_1/\sigma_2 \gg 1$) різка зміна поведінки ефективної провідності σ_e при зміні концентрації фаз відбувається за концентрації першої фази σ_1 рівної $p = 1/3$. У той же час значення порогу протікання p_c реальних композитів може бути різним в залежності від їх структури, пов'язаної з технологією їх виготовлення.

В роботі [11] було представлено таку модифікацію наближення Бруггемана-Ландауера для задачі обчислення ефективної провідності, яка дозволяє задавати будь який поріг протікання \tilde{p}_c .

Мета даної роботи – модифікувати самоузгоджене наближення для обчислення ефективних термоелектричних властивостей композитів (наближення Бруггемана-Ландауера для термоелектричних явищ) та показати вплив величини порога протікання на ефективні властивості двофазних термоелектричних композитів.

Статтю побудовано таким чином: у першому розділі, розглядається наближення Бруггемана-Ландауера та його модифікація на основі роботи [11]. У другому розділі система термоелектричних рівнянь подається у зручному для побудови наближення Бруггемана-Ландауера вигляді і пропонується модифікація наближення. З отриманих результатів випливає, що термоелектрична добротність в залежності від порога протікання має максимум, що є цікавим для експериментальної перевірки наслідком. У третьому розділі наведено розрахунок ефективних властивостей у "аномальному" випадку, коли спостерігається незвичайна поведінка ефективної провідності.

Модифікація наближення Бруггемана-Ландауера у задачі ефективної провідності.

Наближення Бруггемана-Ландауера може бути записано у вигляді

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

де σ_1 – питома провідність першої фази, σ_2 – питома провідність другої фази.

Ефективна провідність, отримана з розв'язку рівняння (1) добре описує весь концентраційний діапазон. За більшої неоднорідності, при $\sigma_1/\sigma_2 \gg 1$ поблизу концентрації $p = p_c = 1/3$ спостерігається різка зміна концентраційного поведінки σ_e , що якісно описує перколяційні поведінку (аналог фазового переходу II роду). Природно, "просте" наближення (1) не може повністю описати перколяційні закономірності. Наприклад, числові значення отриманих з (1) [1, 11] критичних індексів σ_e поблизу p_c , а саме $t = q = 1$, відрізняються від перколяційних ($t = 2$ і $q = 0.73$).

Згідно модифікації [11] наближення Бруггемана-Ландауера (1) замінюється на

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

де $c(p, \tilde{p}_c)$ - так званий терм Саричева-Виноградова має вигляд

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

причому \tilde{p}_c – наперед заданий поріг протікання.

Згідно (2) $\sigma_e(p)$ при $h = \sigma_1/\sigma_2 \rightarrow 0$ поблизу \tilde{p}_c має ту ж степеневу поведінку, що і в стандартному наближенні Бруггемана-Ландауера (1)

$$\begin{aligned}\sigma_e(p) &\sim \sigma_1 (p - \tilde{p}_c)^t, \quad \sigma_2 = 0, \quad p > p_c, \\ \sigma_e(p) &\sim \sigma_2 (\tilde{p}_c - p)^{-q}, \quad \sigma_1 = \infty, \quad p < p_c,\end{aligned}\tag{4}$$

де критичні індекси $t = 1$ і $q = 1$.

Модифікація наближення Бруггемана-Ландауера для термоелектричних явищ

За наявності термоелектричних явищ запишемо локальний зв'язок між електричним струмом \mathbf{j} , щільністю потоку тепла \mathbf{q} , градієнтом температури ∇T і напруженістю електричного поля \mathbf{E} у вигляді [8,12]

$$\begin{aligned}\mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} + \sigma \alpha (-\nabla T), \\ \frac{\mathbf{q}}{T} &= \sigma \alpha \mathbf{E} + \kappa \frac{1 + ZT}{T} (-\nabla T),\end{aligned}\tag{5}$$

де σ , κ – питомі провідність і теплопровідність, α – диференціальна термоЕРС, а

$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2}{\kappa} T,\tag{6}$$

термоелектрична добротність (число Йоффе) Z помножена на температуру.

Локальні кінетичні коефіцієнти σ , κ , α залежать від координат і в разі двофазного композиту набувають значень σ_1 , κ_1 , α_1 – в першій фазі і σ_2 , κ_2 , α_2 , – у другий.

Властивості композиту в цілому задаються ефективними кінетичними коефіцієнтами, які за визначенням пов'язують середні за об'ємом "потоки" – електричний \mathbf{j} і тепловий- \mathbf{q} з "силами" - електричним полем \mathbf{E} та градієнтом температур - ∇T

$$\begin{aligned}\langle \mathbf{j} \rangle &= \sigma_e \langle \mathbf{E} \rangle + \sigma_e \alpha_e \langle -\nabla T \rangle, \\ \frac{\langle \mathbf{q} \rangle}{T} &= \sigma_e \alpha_e \langle \mathbf{E} \rangle + \kappa_e \frac{1 + Z_e T}{T} \langle -\nabla T \rangle,\end{aligned}\tag{7}$$

де

$$Z_e = \frac{\sigma_e \alpha_e^2}{\kappa_e}.$$

Системи (5) і (7) можуть бути записані, в зручному для подальшого розгляду, матричному вигляді

$$\begin{pmatrix} \mathbf{j} \\ \langle \mathbf{q} \rangle / T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & \sigma\alpha \\ \sigma\alpha & \kappa \frac{1+ZT}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle \mathbf{E} \rangle \\ \langle -\nabla T \rangle \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Зазначимо, що у такому записі, як і повинно бути відповідно до принципу Онзагера [12,13], матриця кінетичних коефіцієнтів симетрична. Аналогічно і для ефективних значень

$$\begin{pmatrix} \mathbf{j} \\ \langle \mathbf{q} \rangle / T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_e & \sigma_e\alpha_e \\ \sigma_e\alpha_e & \kappa_e \frac{1+Z_eT}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle \mathbf{E} \rangle \\ \langle -\nabla T \rangle \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Введемо узагальнений струм \mathbf{i} і узагальнену силу \mathbf{e}

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} \mathbf{j} \\ \langle \mathbf{q} \rangle / T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{E} \rangle \\ \langle -\nabla T \rangle \end{pmatrix}, \quad (10)$$

які пов'язані між собою матрицею локальних кінетичних коефіцієнтів $\hat{\Omega}$

$$\mathbf{i} = \hat{\Omega} \mathbf{e}, \quad \hat{\Omega} = \begin{pmatrix} \sigma & \sigma\alpha \\ \sigma\alpha & \kappa \frac{1+ZT}{T} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

і аналогічно для середніх за об'ємом струмів і сил

$$\langle \mathbf{i} \rangle = \hat{\Omega}_e \langle \mathbf{e} \rangle. \quad (12)$$

У матричних позначеннях самоузгоджене наближення термоелектричної задачі (аналог рівняння Бруггемана-Ландауера) може бути записане у наступному вигляді [2]:

$$\frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1} p + \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2} (1-p) = 0, \quad (13)$$

де вирази типу $1/(2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1)$ слід розуміти як множення справа на обернену матрицю.

Тут ми, аналогічно [11], пропонуємо наступну модифікацію наближення (13) для термоелектричної задачі:

$$\frac{\frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1}}{1 + c(p, \tilde{p}_c) \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1}} p + \frac{\frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2}}{1 + c(p, \tilde{p}_c) \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2}} (1-p) = 0. \quad (14)$$

Зазначимо відразу, що при $\tilde{p}_c = 1/3$ рівняння (14) переходить в стандартне наближення (13).

На рис. 1 показані концентраційні залежності σ_e , κ_e , α_e , Z_eT для різних значень \tilde{p}_c .

Як видно з рисунка, ефективна провідність зростає з додаванням краще провідної фази, як і повинно бути. Аналогічно змінюється і ефективна теплопровідність. Відповідно, ефективна термоЕРС спадає при додаванні фази з меншим значенням термоЕРС. Так само з рис. 1 видно, що, наприклад для ефективної провідності, все криві мають однаковий характер, проте зміщується область, в якій спостерігається різке зростання провідності, або, іншими словами, зміщується поріг протікання. Термоелектрична добротність (число Іоффе) монотонно спадає, як і повинно бути, якщо додається фаза з меншою термоелектричною добротністю.

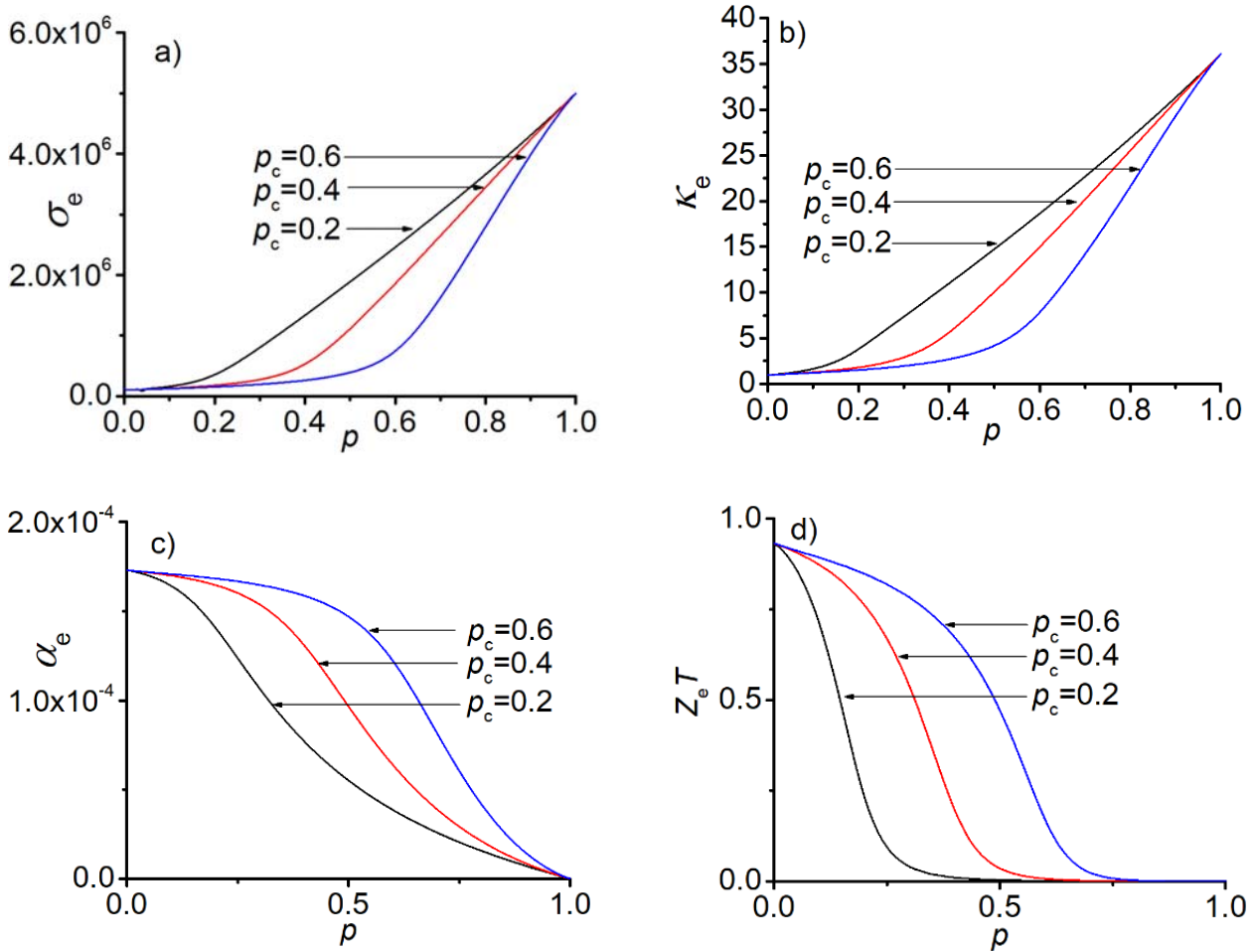


Рис.1 Концентраційні залежності ефективних провідності, теплопровідності, термоЕРС і добротності. Значення коефіцієнтів в фазах такі [15]:
 для першої фази – $\sigma_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $\kappa_1 = 36.1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\alpha_1 = 0 \text{ В}/\text{К}$.
 Для другої фази – $\sigma_2 = 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $\kappa_2 = 0.963 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\alpha_2 = 173 \cdot 10^{-6} \text{ В}/\text{К}$.

Можна строго показати, що в разі $h_\sigma = \sigma_2/\sigma_1 \rightarrow 0$ і $h_\kappa = \kappa_2/\kappa_1 \rightarrow 0$ σ_e і κ_e або стають рівними нулю за $\sigma_2 = 0$ і $\kappa_2 = 0$ і $p \rightarrow \tilde{p}_c$, або розбігаються при $\sigma_1 = \infty$ і $\kappa_1 = \infty$ і $p \rightarrow \tilde{p}_c$.

Як впливає з (14), значення ефективних коефіцієнтів за даної концентрації p першої фази залежать від порога протікання композиту \tilde{p}_c . Чим концентрація p ближче до \tilde{p}_c тим ця залежність істотніше, однак і за менших концентрацій відмінність має місце.

На рис. 2 зображено залежність ефективних коефіцієнтів σ_e , κ_e , α_e , $Z_e T$, від значення \tilde{p}_c для різних значень p – концентрації першої фази.

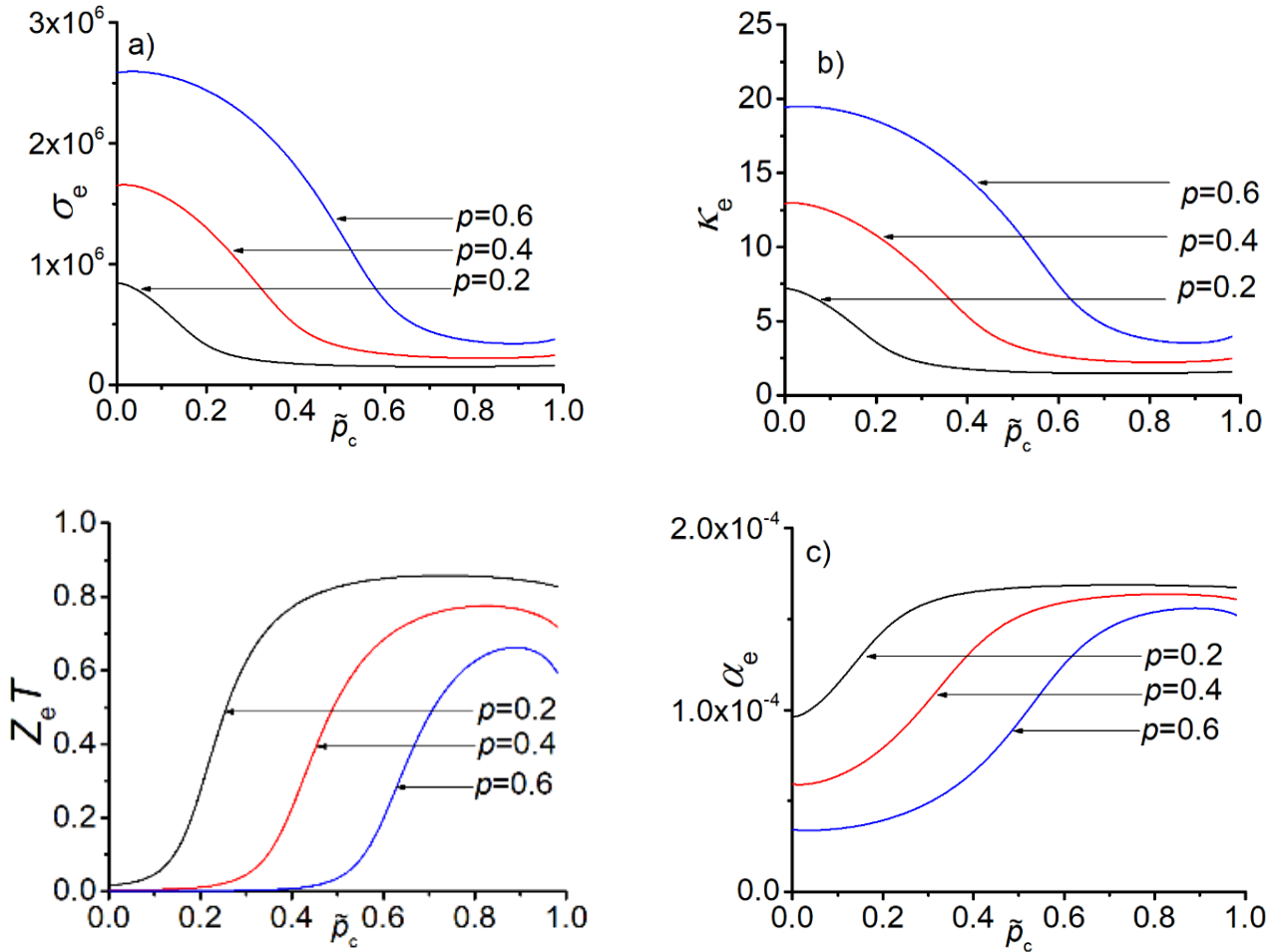


Рис. 2. Залежності ефективних кінетичних коефіцієнтів від порога протікання \tilde{p}_c при заданій концентрації рпершої фази. Значення коефіцієнтів в фазах обрані такими ж, як і на рис. 1.

З рисунка видно, що значення ефективної провідності за заданої концентрації зменшується зі збільшенням порогу \tilde{p}_c . Аналогічно змінюється і ефективна теплопровідність. Варто також зазначити, що, за заданої концентрації збільшення порогу \tilde{p}_c обумовлює зростання термоелектричної добротності (числа Йоффе), однак за великих \tilde{p}_c помітний максимум і зростання змінюється на незначне спадання. Цікаво було б перевірити наявність такого максимуму експериментально і визначити, чи є цей максимум "артефактом" нашої модифікації.

Модифікація наближення Бруггемана-Ландауера для термоелектричних явищ в "аномальному" випадку

Поправка (3) вводиться в наближення Бруггемана-Ландауера (2) передбачає, що провідність першої фази більша за провідність другої $\sigma_1 > \sigma_2$. В цьому випадку при заданні в (3) порогу протікання \tilde{p}_c поріг, який можна знайти при розв'язанні (2) буде дорівнює наперед заданому $p_c = \tilde{p}_c$. При виконанні зворотного нерівності $\sigma_2 > \sigma_1$ поправку (3) слід змінити.

За $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, тобто за відсутності термоелектричних явищ рівняння наближення середнього поля (13) або (14) поділяються на два незалежних – одне для провідності, інше теплопровідності. У

тому випадку, коли $\sigma_1 > \sigma_2$ і $\kappa_1 > \kappa_2$ в ці незалежні рівняння входить одна і та ж поправка $c(p, \tilde{p}_c)$. Однак в зворотному випадку, коли $\sigma_1 < \sigma_2$, але $\kappa_1 < \kappa_2$ поправки для σ_e і κ_e повинні бути різними. У загальному випадку, коли $\alpha_1 \neq \alpha_2$, ця відмінність зберігається і модифікація (13) (14) набуває більш складного вигляду:

$$\frac{\frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1}}{1 + \hat{C}(p, \tilde{p}_c) \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_1}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_1}} p + \frac{\frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2}}{1 + \hat{C}(p, \tilde{p}_c) \frac{\hat{\Omega}_e - \hat{\Omega}_2}{2\hat{\Omega}_e + \hat{\Omega}_2}} (1-p) = 0, \quad (15)$$

де

$$\hat{C}(p, \tilde{p}_c) = \begin{pmatrix} c_\sigma(p, \tilde{p}_c) & 0 \\ 0 & c_\kappa(p, \tilde{p}_c) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

а поправки $c_\sigma(p, \tilde{p}_c)$ і $c_\kappa(p, \tilde{p}_c)$ в (16), в залежності від відношень σ_1/σ_2 і κ_1/κ_2 мають різний вигляд. У тому випадку, коли $\sigma_1 > \sigma_2$ і $\kappa_1 > \kappa_2$ поправка $c_\sigma(p, \tilde{p}_c)$ визначається формулою (3), а $c_\kappa(p, \tilde{p}_c)$ набуває вигляду:

$$c_\kappa(p, \tilde{p}_c) = [1 - 3(1 - \tilde{p}_c)] \left(\frac{p}{\tilde{p}_c} \right)^{\tilde{p}_c} \left(\frac{1-p}{1-\tilde{p}_c} \right)^{1-\tilde{p}_c}. \quad (17)$$

На рис. 3 наведені концентраційні залежності σ_e , κ_e , α_e , $Z_e T$ для різних значень порога протікання.

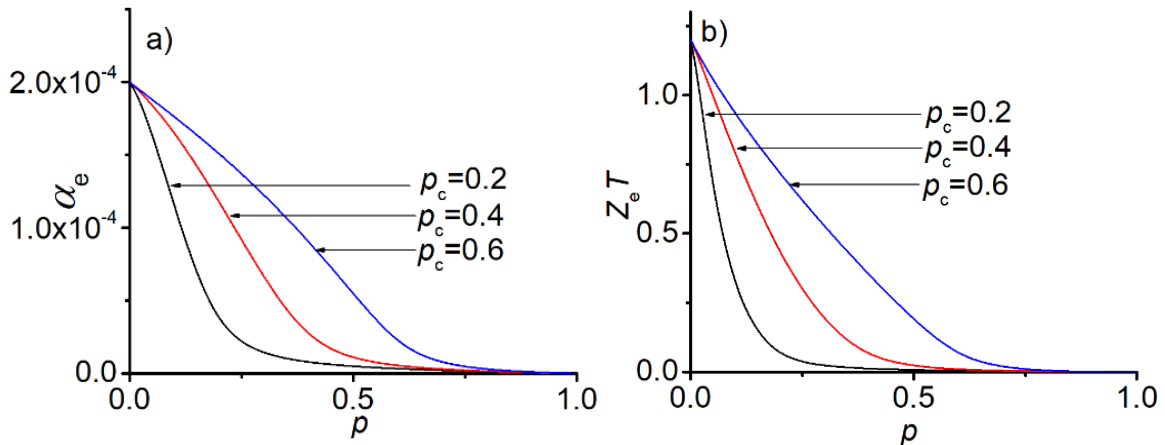


Рис. 3 Залежності ефективних термоЕРС та добротності від концентрації p першої фази за заданого порогу протікання \tilde{p}_c .

Значення кінетичних коефіцієнтів фаз прийнято такими ж, як і на рис. 1.

Один з таких матеріалів, для яких істотно порушується закон Відемана-Франца, а саме має місце велика провідність, але мала теплопровідність описано в [16].

На рис. 4 показані залежності ефективних властивостей від величини порога протікання.

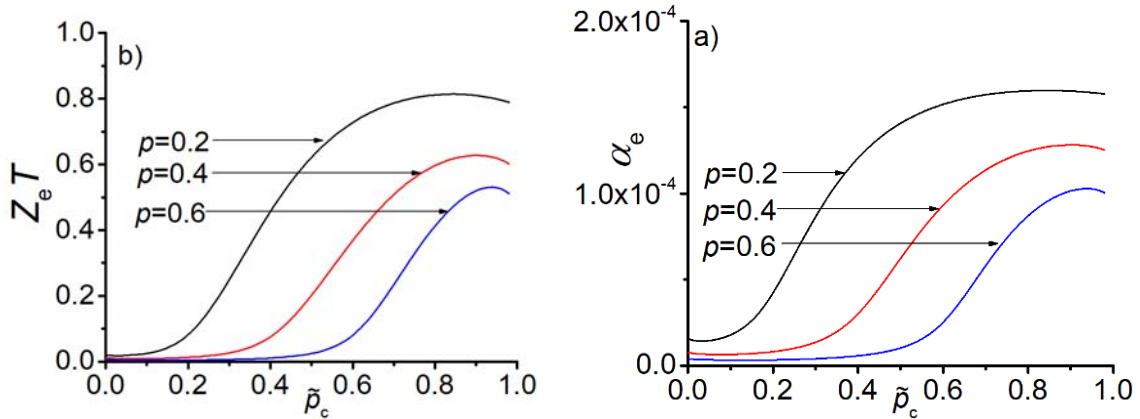


Рис. 4 Залежності ефективної термоЕРС і добротності від порога протікання $\tilde{\rho}_c$ за заданої концентрації ρ першої фази. Значення коефіцієнтів у фазах взято такими ж, як і на рис. 1.

Так само, як і в звичайному випадку ефективна добротність має максимум.

Обговорення

На рисунку, наведеному нижче, зображено залежність ефективної провідності і теплопровідності від концентрації і порогу протікання в "аномальному" випадку. Слід зауважити, що ефективна провідність має незвичайну поведінку: при додаванні фази з хорошою провідністю, ефективна провідність спочатку спадає, а потім починає зростати. Цікаво експериментально перевірити чи є це дефектом теорії, чи справді в реальних композитах спостерігається така поведінка ефективної провідності.

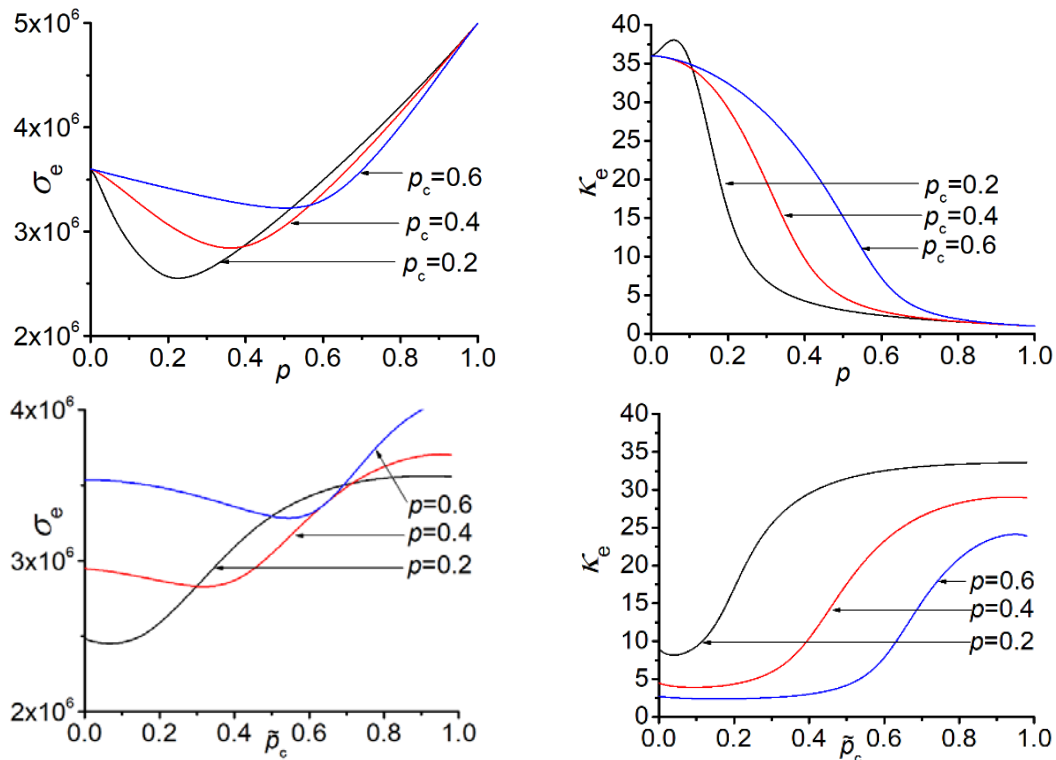


Рис. 5 Залежності ефективної термоерс і добротності від порога протікання $\tilde{\rho}_c$ при заданій концентрації ρ першої фази. Значення коефіцієнтів в фазах обрані такими ж, як і на рис. 1.

Висновки

В роботі розглянуто модифікація теорії середнього поля (метод самоузгодження, effective medium theory) для термоелектричних явищ на випадок наперед заданого порогу протікання. Вперше таку модифікацію було запропоновано в [11] для опису гальваномагнітних явищ і застосовано для опису ряду експериментальних результатів [9 – 11, 17]. У [18] модифікація була використана в запропонованому підході "рухомого порогу протікання" для опису магнітодіелектричного ефекту і особливостей магнітної проникності магнетоеластомерів, в [19, 20] для опису гігантського магнітоеластичного ефекту.

Тут запропонована аналогічна модифікацію для системи рівнянь, що описують термоелектричні явища в макроскопічно неоднорідних двофазних композитах.

Отримані результати можуть бути використані для опису термоелектричних властивостей композитів з різною структурою, що відповідає різним порогам протікання.

Література

1. Torquato S., Random Heterogeneous Materials. Microstructure and Macroscopic Properties, Springer Verlag: New York, USA, 2002. doi: 10.1115 / 1.1483342
2. Баляндрасників Б. Я., Електрофізичні властивості композитів, М., Ленанд, 2015-го, 752с.
3. Choy TC, Effective medium theory: principles and applications, Oxford University Press: Oxford, UK, 2016. doi:10.1093 / aprof: oso / 9780198705093.001.0001
4. Andrianov IV, Awrejcewicz J., Danishevskyy VV, Asymptotical Mechanics of Composites, Springer: Cham, Germany, 2018, 313. doi: 10.1007 / 978-3-319-65786-8
5. Andrianov IV, Awrejcewicz J., Starushenko GA, Asymptotic models and transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part I: Square lattice of circular inclusions. Compos. Struct. 2017, 179, 627. doi: 10.1016 / j.compstruct.2017.07.070
6. Andrianov IV, Awrejcewicz J., Starushenko GA, Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part II: Square lattices of rhombic inclusions and hexagonal lattices of circular inclusions. Compos. Struct. 2017, 180, 359. doi: 10.1016 / j.compstruct.2017.07.068
7. Snarskii A., Bezsudnov IV, Sevryukov VA, Morozovskiy A., Malinsky J., Transport Processes in Macroscopically Disordered Media. From Mean Field Theory to Percolation, Springer Verlag: New York, USA, 2016. doi: 10.1007 / 978-1-4419-8291-9
8. Landau LD, Lifshitz EM, Electrodynamics of Continuous Media, 2 ed., 8, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1984.
9. Bruggeman VD, Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. Ann. Phys. (Leipzig), 1935, 416, 664. doi: 10.1002 / andp.19354160705
10. Landauer R., The electrical resistance of binary metallic mixtures. J. Appl. Phys. 1952 23, 784. doi: 10.1063 / 1.1702301
11. Sarychev AK, Vinogradov AP, Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. phys. stat. sol. (B) 1983, 117, K113-K118. doi: 10.1002 / pssb.2221170252
12. Самойлович А. Г., Термоелектричні і термодинамічні методи перетворення енергії, М., ЛКИ (УРСС), 2007, 224с.
13. Nye JF, Physical Properties of crystals, Oxford, Clarendon Press, 1964.
14. Webmann I., Jortner J., Cohen MH, Phys.Rev. B, 1977,16, 6, 2959.
15. Rowe DM, Thermoelectrics Handbook (macro to nano), Taylor Francis, 2006 1000.

16. Lee S., Hippalgaonkar K., Yang F., Hong J., Ko C., Suh J., Liu K., Wang K., Urban JJ, Zhang X., Dames C., Hartnoll SA, Delaire O., Wu J. 2017 Science, 355, 371.
17. Bergman DJ, "The dielectric constant of a composite material—a problem in classical physics," Phys. Rep., 43, 9, 407, 1978
18. Snarskii A., Zorinets D., Shamonin M., Kalita V., Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: electric and magnetic phenomena. Phys. A: Stat. Mech. Appl. 2019, 535, 122 467. doi: 10.1016 / j.physa.2019.122467
19. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P., Colossal Magnetoelastic Effects in Magnetoactive Elastomers. arxiv: 2002.11762, 2020.
20. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P., Effective Medium Theory for the Elastic Properties of Composite Materials with Various Percolation Thresholds. Materials 2020 року, 13, 1243.

Надійшла до редакції 14.06.2019

Снарский А., *док. физ.- мат. наук, професор*^{1,2}
Юськевич П.¹

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
проспект Победы 37, 03056 Киев, Украина, *e-mail: asnarskii@gmail.com*

²Институт проблем регистрации информации
НАН Украины, ул. Н. Шпака 2, 03113 Киев, Украина

ТЕОРИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОГРАММАМИ ПРОТЕКАНИЯ

В работе построена модифицированная теория среднего поля для вычислений эффективных свойств термоэлектрических композитов с различными значениями порогов протекания. Показано, что даже при концентрациях вне критической области величина порога существенна для определения эффективных свойств. Рассмотрены два принципиально разных случая набора локальных свойств композита. Один из них, когда проводимость и теплопроводность одной из фаз одновременно больше проводимости и теплопроводности второй фазы. Второй, аномальный случай, когда электропроводность первой фазы (σ_1) больше второй, но теплопроводность первой фазы меньше второй, показывает необычные концентрационное поведение эффективной проводимости, т.е. при возрастании хорошо проводящей фазы эффективная проводимость σ_e показывает падение (а не рост как в стандартном случае, см. рис. 1а), которое при $p \approx \tilde{p}_c$ переходит в рост. Библ. 20, рис. 5.

Ключевые слова: термоэлектричество, теория протекания, порог протекания, композиты, эффективные свойства.

A. Snarskii *dok. phys.– mat. sciences, Acting professor*^{1,2}
P. Yuskevich¹

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37
Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine

²Institute of Information Registration Problems of the NAS of Ukraine,
2 Shpaka Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: asnarskii@gmail.com

EFFECTIVE MEDIUM THEORY FOR THE THERMOELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH VARIOUS PERCOLATION THRESHOLDS

In the work, a modified effective medium theory is constructed for calculating the effective properties of thermoelectric composites with different values of percolation thresholds. It is shown that even at concentrations beyond the critical region, the threshold value is essential for determining the effective properties. Two fundamentally different cases of a set of local properties of the composite are considered. In one of these cases, the conductivity and thermal conductivity of one of the phases is simultaneously greater than the conductivity and thermal conductivity of the other phase. The second, anomalous case, when the electrical conductivity of the first phase (σ_1) is greater than that of the second, but the thermal conductivity of the first phase is less than that of the second, shows unusual concentration behavior of effective conductivity, i.e. with an increase in the well-conducting phase, the effective conductivity σ_e shows a decrease (rather than growth as in the standard case, see Fig. 1a), which at $p \approx \tilde{p}_c$ goes over to growth.

Key words: thermoelectricity, percolation theory, percolation thresholds, composites, effective properties

References

1. Torquato S. (2002). *Random heterogeneous materials. Microstructure and macroscopic properties*. New York: Springer Verlag. doi: 10.1115/1.1483342
2. Balagurov B.Ya. (2015). *Elektrofizicheskiye svoystva kompozitov [Electrophysical properties of composites]*. Moscow: Lenand [in Russian].
3. Choy T.C. (2016). *Effective medium theory: principles and applications*. Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780198705093.001.0001
4. Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Danishevskyy V.V. (2018). *Asymptotical mechanics of composites*. Cham, Germany: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-65786-8
5. Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Starushenko G.A. (2017). Asymptotic models and transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part I: Square lattice of circular inclusions. *Compos. Struct.*, 179, 627. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.070
6. Andrianov I.V., Awrejcewicz J., Starushenko G.A. (2017). Asymptotic models for transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part II: Square lattices of rhombic inclusions and hexagonal lattices of circular inclusions. *Compos. Struct.*, 180, 359. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.068
7. Snarskii A., Bezsudnov I.V., Sevryukov V.A., Morozovskiy A., Malinsky J. (2016). *Transport processes in macroscopically disordered media. From mean field theory to percolation*. New York: Springer Verlag. doi: 10.1007/978-1-4419-8291-9
8. Landau L. D., Lifshitz E. M. (1984). *Electrodynamics of continuous media. 2 ed.* Oxford: Butterworth-Heinemann.
9. Bruggeman V.D. (1935). Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys. (Leipzig)*, 416, 664. doi: 10.1002/andp.19354160705

10. Landauer R. (1952). The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.* 23, 784. doi:10.1063/1.1702301
11. Sarychev A.K., Vinogradov A.P. (1983). Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *phys. stat. sol. (b)*, 117, K113-K118. doi: 10.1002/pssb.2221170252
12. Samoilovich A.G. (2007). *Termoelektricheskiie i termodinamicheskiie metody prevrashcheniia energii [Thermoelectric and thermodynamic power conversion methods]*. Moscow: LKI (URSS) [in Russian].
13. Nye J.F. (1964). Physical properties of crystals. Oxford: Clarendon Press.
14. Webmann I., Jortner J., Cohen M. H. (1977). *Phys. Rev. B*, 16, 6, 2959.
15. Rowe D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook (Macro to Nano)*. Boca-Raton: Taylor Francis.
16. Lee S., Hippalgaonkar K., Yang F., Hong J., Ko C., Suh J., Liu K., Wang K., Urban J. J., Zhang X., Dames C., Hartnoll S. A., Delaire O., Wu J. (2017). *Science*, 355, 371.
17. Bergman D. J. (1978). The dielectric constant of a composite material—a problem in classical physics. *Phys. Rep.*, 43, 9, 407.
18. Snarskii A., Zorinets D., Shamonin M., Kalita V. (2019). Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: electric and magnetic phenomena. *Phys. A: Stat. Mech. Appl.* 535, 122467. doi: 10.1016/j.physa.2019.122467
19. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P. (2020). Colossal magnetoelastic effects in magnetoactive elastomers. arxiv: 2002.11762.
20. Snarskii A., Shamonin M., Yuskevich P. (2020). Effective medium theory for the elastic properties of composite materials with various percolation thresholds. *Materials*, 13, 1243.

Submitted 14.06.2019

УДК 536.24



Прибила А.В.

Прибила А.В., канд. физ.-мат. наук^{1,2},
Кібак А.М.^{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, 58000, Україна



Кібак А.М.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У роботі наведено результати експериментальних досліджень термоелектричного багатокаскадного модуля охолодження рентгенівських детекторів. Розроблено спеціалізований стенд, виготовлено термоелектричний модуль охолодження та проведено серію його досліджень в умовах, що імітують його роботу у складі детектора рентгенівського випромінювання. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: експериментальне дослідження, термоелектричне охолодження, рентгенівський детектор.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Термоелектричне охолодження достатньо широко використовується для забезпечення необхідної робочої температури різноманітних детекторів випромінювання [1–3]. Приймальний пристрій, розміщений на теплопоглинальній грані термоелектричного охолоджуючого модуля, як правило, монтується в герметичний корпус, основа якого перебуває в доброму тепловому контакті з теплообмінником.

Однокаскадні термоелектричні модулі застосовуються для неглибокого охолодження сенсорів випромінювання до температур ~ 250 К. Для охолодження сенсорів до робочої температури 230 К використовуються двокаскадні термоелектричні охолоджувачі (ТЕО), до температури 210 К – трикаскадні, до температури 190 К – чотирикаскадні ТЕО [3]. Такі перетворювачі мають низку переваг, зокрема невеликі габаритні розміри, міцність, високу надійність, робочий ресурс до 20 років.

В роботі [4] проведено комп'ютерне проектування чотирикаскадного термоелектричного модуля охолодження, що забезпечує температурні та теплові умови функціонування детектора рентгенівського випромінювання.

Метою даної роботи є експериментальна перевірка результатів моделювання багатокаскадного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання.

Конструкція ТЕО

В результатів комп'ютерного проектування та оптимізації розроблено конструкцію термоелектричного охолоджувача детектора рентгенівського випромінювання (рис. 1), що містить 4 каскади – по 6, 12, 27 і 65 пар віток (розмірами $0.6 \times 0.6 \times 1.8$ мм³) термоелектричного матеріалу на

основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) *n*- і *p*- типів провідності з загальними габаритними розмірами – $12 \times 16 \times 12$ мм³. Розміри охолоджуваної площадки 4×8 мм. Електроізоляційні пластини виготовлені з оксиду алюмінію (Al_2O_3) товщиною 0.5 мм, електрична комутація – з міді (*Cu*) із антидифузійним прошарком нікелю (*Ni*) товщиною 0.1 мм.

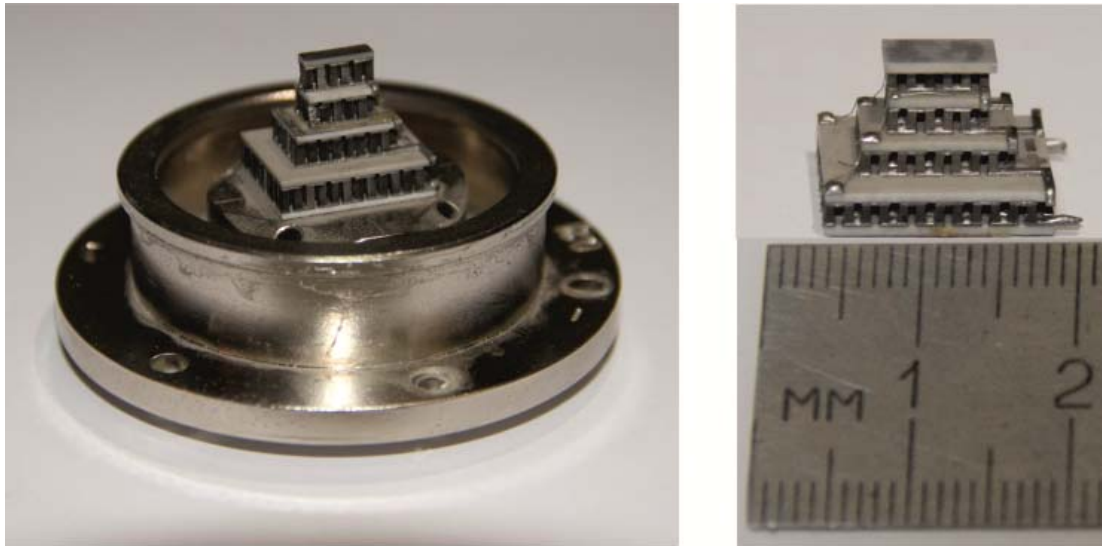


Рис. 1. Зовнішній вигляд термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання

Для проведення експериментальних досліджень термоелектричного багатокаскадного охолоджувача рентгенівських детекторів розроблено спеціальний вимірювальний стенд для максимального відтворення режимів його експлуатації (рис. 2).



Рис. 2. Зовнішній вигляд термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання

Стенд складається із вакуумного поста для відтворення середовища всередині рентгенівського детектора, власне термоелектричного багатокаскадного модуля охолодження, пічки-імітатора теплового навантаження, системи відведення тепла та комплекту вимірювальних термопар.

Результати експериментальних досліджень

Процес вимірювання здійснювався у вакуумі, електрична потужність до термоелектричного модуля підводилася за допомогою спеціальних гермовиводів. На верхній поверхні термоелектричного модуля (холодна сторона термоелектричного модуля на якій розміщено детектор рентгенівського випромінювання) було розміщено пічку-імітатор теплового потоку. Вимірювання проводилися за допомогою спеціальних термопар (ТХК).

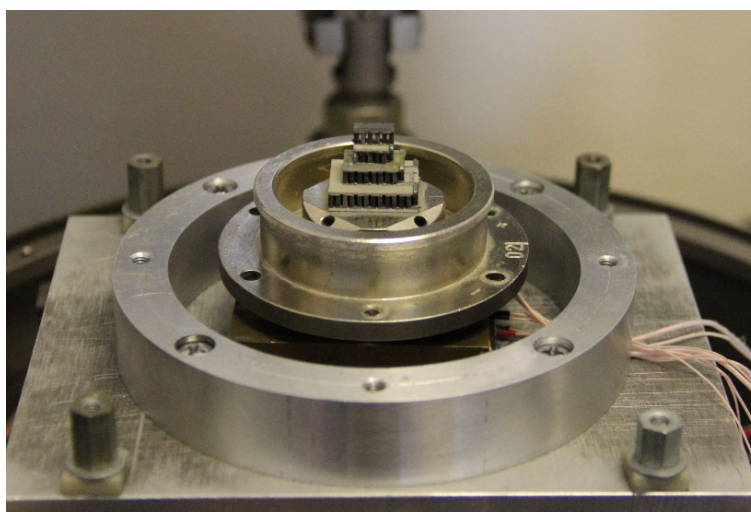


Рис. 3. Зовнішній вигляд термоелектричного модуля охолодження у вимірювальному стенді

В результаті вимірювання підтверджено основні результати проектування термоелектричного модуля охолодження для рентгенівського детектора:

- максимальний перепад температур $\Delta T_{\max} = 102$ К при температурі основи детектора $T_c = -203$ К;

- електрична потужність $W = 3$ Вт;

- холодильний коефіцієнт $\epsilon \approx 0.018$.

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

Висновки

1. Виготовлено термоелектричний охолоджувач детектора рентгенівського випромінювання, що містить 4 каскади з термоелектричного матеріалу на основі Bi_2Te_3 габаритними розмірами – $12 \times 16 \times 12$ мм при забезпеченні площі охолоджуваної площадки 4×8 мм.
2. Розроблено спеціальний стенд та проведено серію вимірювань параметрів термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання.
3. Виміряно електричну потужність термоелектричного перетворювача $W = 3$ Вт, що при

холодильному коефіцієнті $\varepsilon = 0.018$ забезпечує температуру основи детектора $T_c^{(1)} = 203$ К та $\Delta T_{\text{макс}} = 102$ К.

4. Вимірювання в цілому повторюють результати комп'ютерного проектування термоелектричного модуля охолодження рентгенівських детекторів та підтверджують, що розроблений ТЕО за своїми характеристиками переважає відомі світові аналоги.

Література

1. Rogalski A. Progress in focal plane arrays technologies. Progress in Quantum Electronics, V. 36, N 2–3, 2012, P. 342–473.
2. A. Piotrowski, J. Piotrowski, W. Gawron, J. Pawluczyk and M. Pedzinska Extension of Usable Spectral Range of Peltier Cooled Photodetectors ACTA Physica Polonica A, Vol. 116, 2009, P. s-52 – s-55.
3. Anatyshuk L.I., Vihor L.N., The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. J. of Thermoelectricity, 2013, №5, p. 54-58.
4. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Проектування термоелектричного модуля охолодження детектора рентгенівського випромінювання // Термоелектрика. – 2019. №2. – С 53 – 58.

Надійшла до редакції 20.06.2019

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

Кибак А.Н.²

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

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований термоэлектрического многокаскадного модуля охлаждения рентгеновских детекторов. Разработан специализированный стенд, изготовлен термоэлектрический модуль охлаждения и проведена серия его исследований в условиях, которые имитируют его работу в составе детектора рентгеновского излучения. Библ. 6, рис. 3.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, термоэлектрическое охлаждение, рентгеновский детектор.

A.V. Prybyla, *cand. Phys. - math. Sciences*^{1,2}

Kibak A.M.

¹Institute of Thermoelectricity
of the NAS and MES of Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
²Yu.Fedkovich Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDY OF A THERMOELECTRIC COOLING MODULE FOR AN X-RAY DETECTOR

The paper presents the results of experimental studies of a thermoelectric multistage thermoelectric cooling module for X-ray detectors. A specialized bench was developed, a thermoelectric cooling module was manufactured, and a series of its studies was conducted under conditions simulating its operation as part of an X-ray detector. Bibl. 6, Fig. 3.

Key words: experimental study, thermoelectric cooling, X-ray detector.

References

1. Rogalski A. (2012). Progress in focal plane arrays technologies. *Progress in Quantum Electronics*, 36, 342–473.
2. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J. and Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *ACTA Physica Polonica A*, 116, 52 – 55.
3. Anatykhuk L.I., Vikhor L.N. (2013). The limits of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 54-58.
4. Anatykhuk L.I., Prybyla A.V. (2019). Design of thermoelectric cooling module for X-ray radiation detector. *J. Thermoelectricity*, 2, 53 – 58.

Submitted 20.06.2019

Черкез Р.Г., док. фіз.-мат. наук, в.о. професора^{1,2}
Пожар Е.В.², Жукова А.С.², Хриков В.К.²

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

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

ВПЛИВ ЧИСЛА КАНАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОНИКНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ З МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ *Bi-Te-Se-Sb*

*Проведено аналіз основних властивостей термоелектричних матеріалів. Для проникного термоелементу з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb* приведено фізичну модель та дано математичний опис. Зроблено комп'ютерний розрахунок параметрів для проникних термоелементів, що виготовлені на основі *Bi-Te-Se-Sb*. Представлено графічний вигляд залежності ККД і потужності проникного, яка генерується W від числа каналів N_k . Бібл. 5, рис. 2.*

Ключові слова: термоелектричні матеріали, ККД генератору, проектування проникного сегментного термоелемента, термоЕРС.

Вступ

Проникні термоелектричні елементи характеризуються наявністю в їх структурі каналів для прокачування по ним рідинного або газоподібного теплоносія. Наявність теплообміну в обсязі гілки підвищує інтенсивність теплопередачі, призводить до перерозподілу температурних полів, потенціалів і теплових потоків, впливаючи тим самим і на енергетичні характеристики термоелемента. Керуючи теплофізичними параметрами (швидкістю прокачування теплоносія, інтенсивністю теплообміну, щільністю електричного струму) можна реалізувати такі умови роботи, при яких буде покращена енергетична ефективність перетворення енергії [1].

Перші теоретичні дослідження проникних термоелементів для потоків газів показали перспективність їх створення, передбачаючи підвищення холодильн 20 – 30 % при використанні низькопотенційної теплової енергії газів. Використання проникних структур в термоелектричних елементах з *Bi-Te* дозволяє покращити ефективність перетворення енергії на 30 % [2]. Однак такі дослідження були проведені для найпростішої моделі проникного термоелемента в одномірному наближенні без урахування температурних залежностей параметрів матеріалу, комутаційних теплопереходів.

Протягом останнього десятиліття все більша увага дослідників залучають перспективні термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te-Se-Sb*. Вони є безпечними з екологічної точки зору і характеризуються високими значеннями коефіцієнтів термо-ЕРС і електропровідності з

максимальними значеннями безрозмірного параметра термоелектричної добротності ZT на рівні 1–1.1 в діапазоні температур 300–600 К.

Фізична модель і її математичний опис

Фізична модель проникного термоелемента з матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb в режимі генерації електричної енергії представлена на рис. 1.

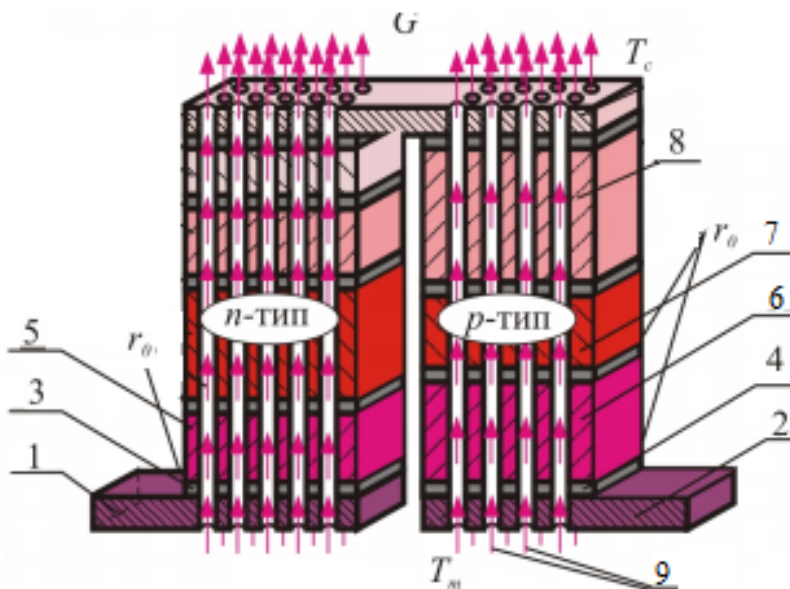


Рис. 1. Фізична модель проникного сегментного термоелементу
 1, 2 – комутаційні пластини; 3, 4 – комутаційні шари; 5 – сегменти (секції)
 гілки n-типу провідності; 6, 7, 8 – сегменти (секції) гілки
 p-типу провідності; 9 – теплоносій.

Такий термоелемент складається з гілок n – і p -типів провідності, фізичні властивості яких залежать від температури. Підведення тепла здійснюється шляхом пропускання теплоносія крізь гілки через канали (пори). Кожна гілка складається з N_n – і N_p – сегментів відповідно, контактний опір з'єднання r_0 . Бічна поверхня гілок адіабатично ізольована, температура теплоносія на вході в термоелемент T_m задана. Температура холодних спайв T_c термостатована.

Система диференціальних рівнянь, що описує розподіл температур і теплових потоків в стаціонарному одновимірному випадку, в нескінченно малій частині dx кожного k -го сегмента гілок n – і p -типів провідності, в безрозмірних координатах дається співвідношеннями [2].

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha_k j}{\kappa_k} T - \frac{j}{\kappa_k} q, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha_k^2 j}{\kappa_k} T + \frac{\alpha_k j}{\kappa_k} q + j\rho_k + \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K I_K^2}{(S - S_K) j} (t - T), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K I_K}{G c_p} (t - T), \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} k = 1, \dots, N_{n,p} \\ x_{k-1} \leq x \leq x_k \end{array} \Bigg|_{n,p}$$

де Π^1_k – периметр каналу; N_k – число каналів; S_k – площа перетину всіх каналів; S – перетин гілки разом з каналами; G – витрата теплоносія в каналах; c_p – питома теплоємність теплоносія; t – температура теплоносія в точці x ; T – температура гілки в точці x ; αT – коефіцієнт тепловіддачі; α і κ – коефіцієнти термоЕРС і теплопровідності, а ρ – питомий опір матеріалу гілки.

Питомі потоки тепла q і приведена щільність електричного струму j визначаються через такий вираз:

$$q = \frac{Q}{l}, \quad j = \frac{I}{S},$$

де Q – потужність теплового потоку, що проходить через гілку термоелемента; I – сила електричного струму; S – площа поперечного перерізу гілок термоелемента.

Необхідні для вирішення в рівнянні граничні умови з урахуванням виділення тепла Джоуля-Ленца, обумовленого контактним опором r_0 в місцях з'єднання сегментів гілок, формулюються у вигляді:

$$\begin{aligned} T_{n,p}(0) &= T_C, & t_{n,p}(1) &= T_m, & q_{n,p}(1) &= 0, \\ T_{n,p}(x_k^+) &= T_{n,p}(x_k^-), & q_{n,p}(x_k^+) &= q_{n,p}(x_k^-) + \frac{r_0}{S_{n,p}} I, \end{aligned}$$

де індекси " – " і " + " позначають значення функцій безпосередньо зліва і справа від межі зіткнення сегментів x_k ; $k = 1, \dots, N$ – індекс, що визначає номер сегмента гілки.

У випадку пошуку оптимальних концентрацій легуючих домішок, що визначають концентрації носіїв струму в сегментах гілок, необхідно задати залежності параметрів матеріалів α , κ , ρ від температури і концентрації носіїв струму (або домішок).

Основне завдання проектування проникного сегментного генераторного термоелемента – визначення таких узгоджених параметрів (наведена щільність струму j в вітках, витрати теплоносія в каналах G , концентрації легуючих домішок в матеріалах кожного сегмента), при яких ККД термоелемента досягає максимального значення [3].

Визначимо ККД через відношення електричної потужності P , що генерується термоелементом, до зміни ентальпії теплоносія:

$$\eta = \frac{P}{\sum_{n,p} G c_p (T_m - T_C)},$$

а його максимум зведемо до досягнення мінімуму функціоналу:

$$J = \ln \left[\sum_{n,p} \{ G c_p (T_m - T_C) \} \right] - \ln \left[\sum_{n,p} \left\{ G c_p (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_k)}{l} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\} \right].$$

Для вирішення такого завдання використаний принцип максимуму Понтрягіна, на основі якого отримані співвідношення, що задають необхідні умови оптимальності. Така методика в застосуванні до термоелектричного перетворення енергії описана в багатьох

роботах, наприклад, [4]. Вона ж використана і для створення комп'ютерної програми та дослідження проникного термоелемента з термоелектричних матеріалів на основі Bi-Te-Se-Sb [5].

Результати вирішення завдання

Результати розрахунку проникного термоелектричного генератора проводилося з урахуванням втрат тепла з відхідними газами і такими вихідними даними, як оптимізація щільності струму і витраті теплоносія та оптимізація за однаковою концентрацією в секціях гілки із введенням комплексу – $G \cdot \text{branch} := G \cdot c_p \cdot S_k \cdot N_k$.

Використано такі вихідні дані. Температура теплоносія на вході – 600 К, температура холодних спаїв термоелементу – 300 К; діаметр каналу – 0.01 см; периметр каналу (окружність) – 0.031416 см; площа поперечного перерізу всіх N_k -каналів – 0.0024 см²; кількість секцій в 1 гілки – 1 шт; висота гілок – 20 см; площа поперечного перерізу матеріалу гілки – 0,9976 см².

Температурні залежності параметрів α , σ , κ , матеріалів на основі Bi-Ti-Se-Sb були використані для розрахунків. [5]

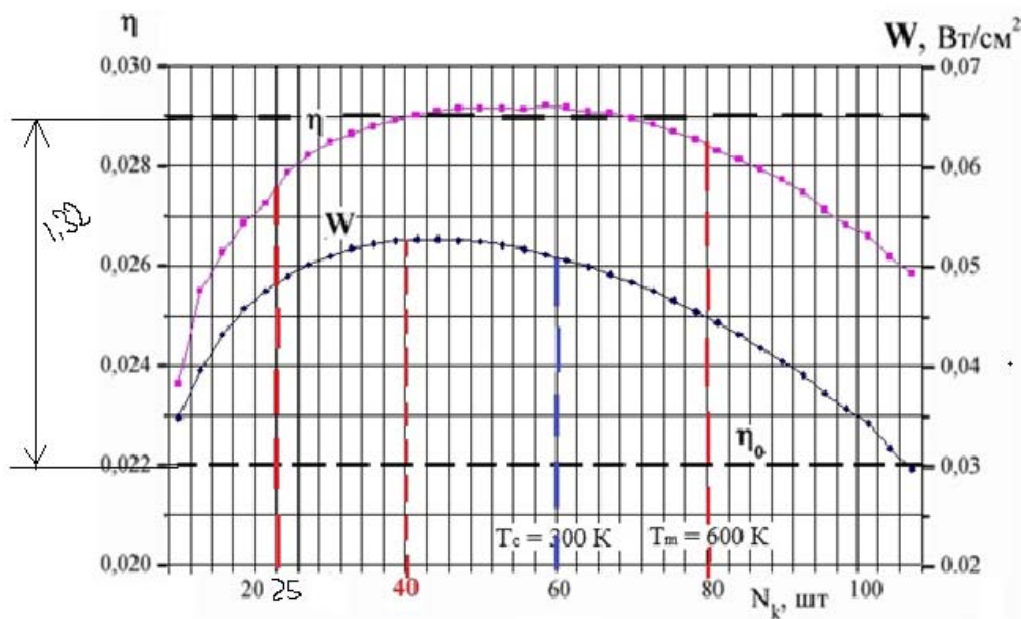


Рис. 2. Залежності ККД і потужності проникного термоелемента на основі Bi-Te-Se-Sb, яка генерується W від числа каналів N_k .

Видно, що ККД проникного термоелемента на основі Bi-Te-Se-Sb зростає при збільшенні кількості каналів. Максимум ККД знаходиться в області від 25 до 80 каналів на 1 см², а потужності від 25 до 60. Питома електрична потужність має максимум, в даному випадку при 40 каналах на 1 см² і становить $P = 1.57$ Вт. Тому, раціональне число каналів на одиницю площі буде перебувати в межах 25 – 60 шт.

Отримані дані свідчать, що ККД зростає з збільшенням числа каналів і досягає найбільшого значення, як і в двох попередніх випадках, при температурі теплоносія $T_m = 600$ К і становить $\eta = 6.8$ %. Підвищення ККД може досягати 1.32 рази в порівнянні з класичним термоелементом.

Висновок

Таким чином, для різних умов роботи проникного генераторного термоелемента з матеріалів на основі *Bi-Te-Se-Sb* необхідно визначити свої оптимальні конструкційні параметри (висота гілки, діаметр каналів і їх число), при яких буде отримана максимальна ефективність перетворення енергії та електрична потужність. ККД в оптимальних умовах роботи вище, ніж у класичного термоелемента в 1.32 рази. Порівняння з ККД класичного термоелементу η_0 , що працює в аналогічних умовах, вказує також на можливість підвищення ККД проникного термоелементу на основі *Bi-Te-Se-Sb* при перетворенні енергії приблизно на 32 %.

Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. Том II. Черновцы: Букрек, 2003. 376 с.
2. Анатычук Л.И., Черкез Р.Г. Проникный сегментный термоэлемент у режимі генерації електричної енергії // Термоелектрика. – 2010. – №3. - С.5-12.
3. Cherkez R. G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. AIP Conf. Proc. 1449, 443, pp. 439-442; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4731590>
4. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.Ф. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко // – М.:Наука, 1976. – 392 с.
5. Бублик В.Т. Объемный наноструктурированный термоэлектрический материал на основе $(Bi, Sb)_2Te_3$, полученный методом искрового плазменного спекания (SPS) / В.Т.Бублик, И.А.Драбкин, В.В.Каратаев [и др.] // Термоэлектрики и их применение: докл. XIII Межгос. семинара. СПб. 2012. С. 70–75.

Надійшла до редакції 03.07.2019

Черкез Р.Г., *док. физ.-мат. наук, и.о. профессора*^{1,2}
Пожар Е.В.², **Жукова А.С.**², **Хрыков В.К.**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

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОНИЦАЕМЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ *Bi-Te-Se-Sb*

*Проведен анализ основных свойств термоэлектрических материалов. для проницаемого термоэлемента из материалов на основе *Bi-Te-Se-Sb*, приведена физическая модель и дано*

ее математическое описание. Сделан компьютерный расчет параметров проницаемых термоэлементов, изготовленных на основе Bi-Te-Se-Sb. Представлены графически зависимости КПД и мощности, проницаемого генерируемого W вид числа каналов N_k . Библ. 5, рис. 2.

Ключевые слова: термоэлектрические материалы, КПД генератора, проектирование проницаемого сегментного термоэлемента, термоЭДС.

Cherkez R.G., dok. phys.– mat. sciences, Acting professor^{1,2}
Pozhar E.V.², Zhukova A.S.², Khrykov V.K.²

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

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

INFLUENCE OF THE NUMBER OF CHANNELS ON THE EFFICIENCY OF PERMEABLE THERMOELEMENTS OF *Bi-Te-Se-Sb* BASED MATERIALS

The basic properties of thermoelectric materials are analyzed. For a permeable thermoelement of Bi-Te-Se-Sb based materials a physical model is presented and a mathematical description is given. Computer calculation of parameters for Bi-Te-Se-Sb based permeable thermoelements is made. The dependence of permeable thermoelement efficiency and its generated power W on the number of channels N_k is presented graphically. Bibl. 5, Fig. 2.

Key words: Thermoelectric materials, generator efficiency, design of permeable segmented thermoelement, thermoEMF

References

1. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. Tom II. Termoelektricheskiie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.II. Thermoelectric power converters]*. Chernivtsi: Bukrek [in Russian].
2. Anatyshuk L.I., Cherkez R.G. (2010). Permeable segmented thermoelement in electric power generation mode. *J. Thermoelectricity*, 3, 5-12.
3. Cherkez R. G. (2012). Energy possibilities of permeable generator thermoelements based on segmented legs. *AIP Conf. Proc.* 1449, 443, pp. 439-442; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4731590>
4. Pontryagin L.S., Boltianskiy V.G., Gamkrelidze R.F., Mishchenko. (1976). *Matematicheskaiia teoriia optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]*. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Bublik V.T., Drabkin I.A., Karataiiev V.V., et al. (2012). Obiomnyi nanostrukturirovannyi termoelektricheskii material na osnove (Bi,Sb)₂Te₃, poluchennyi metodom iskrovogo plasmennogo spekaniia (SPS) [Bulk nanostructured thermoelectric material based on (Bi,Sb)₂Te₃ obtained by spark plasma sintering method (SPS)]. *Proc. of XIII Interstate Workshop "Thermoelectrics and their Application" (Russia, Saint-Petersburg, 2012)* (pp.70–75).

Submitted 03.07.2019

УДК 537.32

Анатичук Л.І. *ак. НАН України*,^{1,2}
Пасечнікова Н.В. *доктор мед. наук, НАМН України*,³
Науменко В.О.³, Задорожний О.С. *канд. мед. наук*³,
Назаретян Р.Е.³, Гаврилюк М.В.^{1,2}, Тюменцев В.А.¹
Кобилянський Р.Р. *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}

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

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

³ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії
ім. В.П. Філатова НАМН України», Французький бульвар, 49/51,
Одеса, 65061, Україна, *e-mail: zadoroleg2@gmail.com*.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ГІПОТЕРМІЇ ОКА ЛЮДИНИ

У роботі наведено результати розробки термоелектричного приладу у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки. Розроблений прилад дає можливість контрольованого локального контактного охолодження структур ока через повіки та призначений для лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів ока. Наведено особливості конструкції приладу та його технічні характеристики. Бібл. 23, рис. 2, табл. 1.

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

Вступ

Терапевтична гіпотермія (ТГ) – це лікувальний вплив, який полягає в зниженні температури тіла хворого шляхом примусового відведення тепла від поверхні тіла або внутрішніх органів з метою зниження ризику ішемічного пошкодження тканин. ТГ у медицині відома вже більше 200 років як ефективний і доведений спосіб нейропротекції у хворих при деяких критичних станах, який забезпечує зниження смертності пацієнтів і зменшення обсягу пошкодження тканин головного мозку. У даний час ТГ розглядається як найбільш перспективний фізичний метод нейропротекторного захисту головного мозку, оскільки з позицій доказової медицини не існує жодного ефективного методу фармакологічної нейропротекції в нейрореанімаційній практиці [1]. ТГ успішно застосовується в різних галузях медицини (кардіохірургії, нейрохірургії, реаніматології тощо) з метою підвищення стійкості клітин головного мозку до умов ішемії [2 – 6].

Відомо, що церебральний метаболізм змінюється з температурою головного мозку, в середньому на 6-8 % при зміні температури ядра тіла на 1 °С [1]. Зниження температури нейронів центральної нервової системи обумовлює розвиток у них метаболічної депресії, що

призводить до зменшення споживання кисню, підвищення стійкості до гіпоксії, ішемії та реперфузії [7, 8]. У цілому в даний час виділяють наступні механізми нейропротекторної дії ТГ: гальмування деструктивних ензиматичних реакцій; супресія вільнорадикальних реакцій; протекція пластичності ліпопротеїнів цитоплазматичних мембран; зниження споживання кисню в областях головного мозку з низьким кровотоком; поліпшення доставки кисню в ішемічні зони головного мозку і зниження внутрішньочерепного тиску; пригнічення біосинтезу і продукції ексайтотоксичних нейротрансмітерів [9 – 12].

У той же час відомо, що загальна ТГ супроводжується ризиком ускладнень, тому може бути застосована тільки в умовах спеціально обладнаних реанімаційних відділень. У клінічних умовах в офтальмологічному стаціонарі вона не виправдана у зв'язку зі складністю її реалізації [3, 4]. В офтальмології є перспектива застосування локальної ТГ, наприклад, з метою зменшення внутрішньоочного тиску. На думку ряду авторів, даний ефект досягається за рахунок зменшення продукції внутрішньоочної рідини і поліпшення відтоку водянистої вологи. При цьому спостерігається і зменшення больового синдрому [13 – 15]. Є дані літератури про те, що локальна гіпотермія ока може приводити до зменшення продукції фібрину, зниження обсягу кровотечі, зменшення фотопшкодження під час хірургії [16]. Ряд авторів демонструють зниження хоріоїдального кровотоку і зменшення пошкодження гемато-ретинального бар'єру в умовах локальної гіпотермії [17, 18]. Є дані про застосування локальної гіпотермії для зниження запальних реакцій [19]. Відомо, що після локальної гіпотермії в оці відбуваються значні гемодинамічні зрушення, які характеризуються суттєвим розширенням судин і падінням периферичного їх опору, що ведуть до збільшення кровонаповнення судинного тракту, підвищення пульсового обсягу і швидкості кровотоку [20].

Існують різні способи охолодження ока. В експерименті було підтверджено, що при локальній контактній гіпотермії можливе зниження температури внутрішньоочних середовищ ока кролика, як при охолодженні безпосередньо зовнішньої поверхні рогівки, так і при впливі холоду через закриті повіки [21]. Для вирішення цього завдання можна використовувати, наприклад, міхур з льодом, накладаючи його на повіки [14]. Інший шлях досягнення локальної гіпотермії досягається за рахунок зрошення зовнішньої поверхні ока охолодженими розчинами. Під час внутрішньоочних хірургічних втручань локальну гіпотермію ока можна створювати шляхом зниження температури іригаційних розчинів [22]. Враховуючи сучасні технології, перспективним виглядає розробка спеціальних термоелектричних пристроїв для локального контактного охолодження ока. Це дозволить більш ефективно та контрольовано використовувати корисні ефекти ТГ для лікування офтальмологічних захворювань.

Тому *метою даної роботи* є розробка конструкції та виготовлення експериментального зразка термоелектричного приладу у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки.

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 у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки (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 контрольованого локального контактного охолодження структур ока через повіки та дозволяє розробити і впровадити технологію контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології. Такий прилад є оригінальним та не має світових аналогів.



Рис. 1. Експериментальний зразок термоелектричного приладу у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки: 1 – охолоджуюча пластина, 2 – термоелектричний електронний блок охолодження, керування та живлення

Таблиця

Технічні характеристики приладу

№	Технічні характеристики приладу	Значення параметрів
1.	Діапазон робочих температур	(+5 ÷ +40) °С
2.	Точність підтримання температури	± 0.2 °С
3.	Дискретність вимірюваної і заданої температури	± 0.1 °С
4.	Похибка вимірювання температури, не більше	± 0.2 °С
5.	Теплове навантаження в зовнішньому контурі, не більше	20 Вт
6.	Загальна споживана потужність, не більше	120 Вт
7.	Напруга живлення (мережа змінного струму 50 Гц)	220 ± 10 В
8.	Габаритні розміри охолоджуючої пластини	(75 × 45 × 12) мм

продовження таблиці

9.	Габаритні розміри термоелектричного електронного блоку охолодження, керування та живлення	(180 × 120 × 100) мм
10.	Продуктивність насосу	40 л/год
11.	Довжина шлангів із зовнішнім датчиком температури	1 м
12.	Вага приладу	1.5 кг
13.	Час виходу приладу на температурний режим	10 хв
14.	Час неперервної роботи приладу	48 год

Прилад складається з двох основних функціональних вузлів: охолоджуючої пластини 1 та термоелектричного електронного блоку охолодження, керування та живлення 2 (рис. 1). Охолоджуюча пластина 1 представляє собою рідинний теплообмінник, виготовлений з високотеплопровідного матеріалу – міді. Електронний блок 2 містить термоелектричний блок охолодження, блок живлення та електронний блок керування на основі програмованого терморегулятора типу RE-202. У свою чергу, термоелектричний блок охолодження містить термоелектричний модуль Пельтьє [23, 24], рідинні теплообмінники та циркуляційний насос.

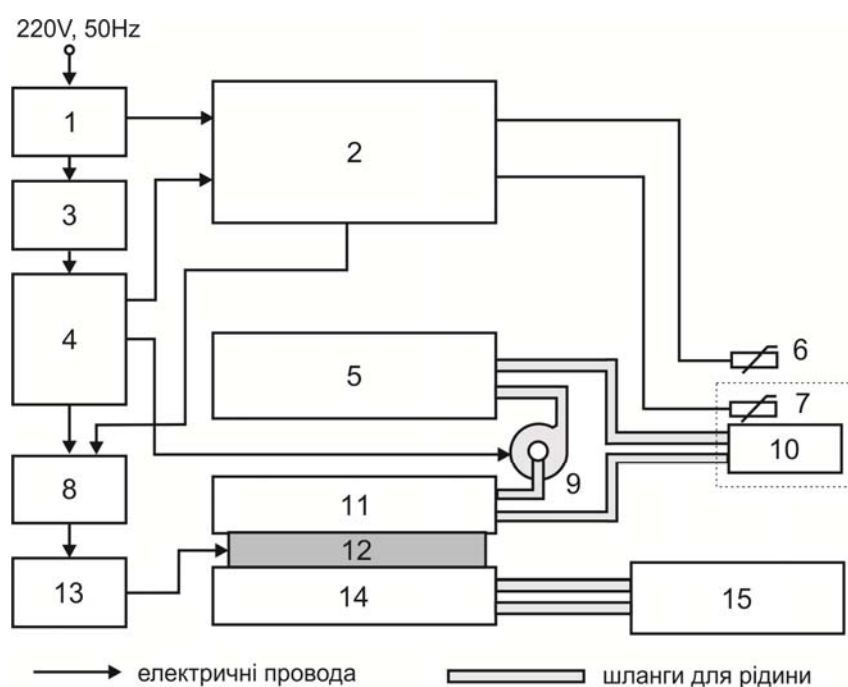


Рис. 2. Блок-схема термоелектричного приладу у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки: 1 – вимикач мережі 220 В, 2 – вимірювач-терморегулятор RE-202, 3 – вимикач блоку живлення, 4 – блок живлення, 5 – ємність з рідиною контура теплообмінника, 6 – датчик температури об'єкту, 7 – датчик температури контуру теплообмінника, 8 – перемикач роду роботи, 9 – циркуляційний насос, 10 – робочий теплообмінник рідинного контуру, 11 – активний теплообмінник рідинного контуру, 12 – термоелектричний модуль Пельтьє, 13 – силове реле увімкнення термоелектричного модуля Пельтьє, 14 – пасивний теплообмінник рідинного контуру, 15 – водопровідна мережа.

Термоелектричний модуль Пельтьє призначений для охолодження або нагріву циркулюючої у зовнішньому контурі рідини. Охолодження гарячої сторони цього термоелектричного модуля здійснюється внутрішнім рідинним контуром, що підключається до водопровідної мережі. Циркуляційний насос забезпечує циркуляцію рідинного теплоносія у зовнішньому контурі.

Блок живлення призначений для електричного живлення термоелектричного модуля від мережі змінного струму 220 В. Терморегулятор РЕ-202 здійснює вимірювання температури від внутрішніх і зовнішніх терморезистивних датчиків та формує керуючі сигнали для схеми керування. У свою чергу, схема керування здійснює керування термоелектричним модулем за заданою програмою з метою підтримки встановлених оператором робочих температур.

На передній панелі приладу розташовані тумблери «ВКЛ», «НАГРІВ / ОХЛ» і цифрове табло терморегулятора РЕ-202. На задній панелі приладу розташовані тумблер «МЕРЕЖА», роз'єм для підключення до мережі 220 В, роз'єми для підключення зовнішніх датчиків температури «Т1» і «Т2», штуцери «КОНТУР ВХІД», «КОНТУР ВИХІД», «ВОДА ВХІД», «ВОДА ВИХІД» та запобіжник 5 А.

Блок-схему термоелектричного приладу для контактного охолодження ока людини наведено на рис.2, де 1 – вимикач мережі 220 В, 2 – вимірювач-терморегулятор РЕ-202, 3 – вимикач блоку живлення, 4 – блок живлення, 5 – ємність з рідиною контура теплообмінника, 6 – датчик температури об'єкту, 7 – датчик температури контуру теплообмінника, 8 – перемикач роду роботи, 9 – циркуляційний насос, 10 – робочий теплообмінник рідинного контуру, 11 – активний теплообмінник рідинного контуру, 12 – термоелектричний модуль Пельтьє, 13 – силове реле увімкнення термоелектричного модуля Пельтьє, 14 – пасивний теплообмінник рідинного контуру, 15 – водопровідна мережа.

Принцип роботи приладу

Принцип роботи приладу полягає в охолодженні або нагріву (термостабілізації) ока людини з метою лікування гострих і хронічних захворювань ока, зниження внутрішньоочного тиску, зменшення больового синдрому та запальних процесів.

Запропонований прилад працює наступним чином. Після подачі електричного живлення і вибору режиму охолодження або нагріву, термоелектричний модуль підтримує задану терморегулятором температуру за допомогою циркулюючої в контурі рідини. Якщо в якості датчика зворотного зв'язку вибрано внутрішній датчик температури, то стабілізується задана температура в контурі рідини. Якщо в якості датчика зворотного зв'язку вибрано зовнішній датчик і він розташований в термостатуєчому об'єкті, то відбувається стабілізація температури об'єкту.

Вказаний прилад простий, компактний, переносний 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: наявність вискоелективного термоелектричного модуля Пельтьє, можливість вимірювання і підтримання заданої температури з дискретністю ± 0.2 °С, безпечність використання приладу та можливість моніторингу температури поверхні ока людини у режимі реального часу.

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 контактного охолодження ока людини через повіки 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.

Висновки

1. Вперше розроблено конструкцію та виготовлено експериментальний зразок термоелектричного приладу у вигляді монокулярної пов'язки для контактного охолодження ока людини через повіки. 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 контрольоване контактне охолодження структур ока людини в діапазоні температур (+5 ÷ +40) °C та в подальшому дозволить розробити і впровадити технологію контрольованої локальної терапевтичної гіпотермії в офтальмології.

Література

1. Царев А.В. Целевой температурный менеджмент в клинической практике интенсивной терапии критических состояний / А. В. Царев // Медицина неотложных состояний. – 2014. – № 7. – С.186-191.
2. Alzaga A.G. Therapeutic hypothermia / A.G. Alzaga, M. Cerdan, J. Varon // Resuscitation – 2006. – Vol.70, (3). – P. 369-380.
3. Polderman K.H. Therapeutic hypothermia and controlled normothermia in the ICU: Practical considerations, side effects, and cooling methods / K.H. Polderman, I. Herold // Crit. Care Med. – 2009. – Vol. 37. – P. 1101-1120.
4. Saad H. Temperature management in cardiac surgery / H. Saad, M. Aladawy // Glob. Cardiol. Sci. Pract. – 2013. – Vol.1. – P. 44-62.
5. The Hypothermia after Cardiac Arrest Group. Mild therapeutic hypothermia to improve the neurologic outcome after cardiac arrest / The Hypothermia after Cardiac Arrest Group // N. Engl. J. Med. – 2002. – Vol.346. – P. 549-556.
6. Yenari M.A. Neuroprotective mechanisms of hypothermia in brain ischaemia / M.A. Yenari, H.S. Han // Nat. Rev. Neurosci. – 2012. – Vol.13. – P. 267-278.
7. Bernard S. Induced hypothermia in critical care medicine: A review / S. Bernard, M. Buist // Critical Care Medicine. - 2003. - Vol. 31. - P. 2041-2051.
8. Lampe J.W. State of the art in therapeutic hypothermia / J.W. Lampe, L.B. Becker // Annu. Re.

- Med. – 2011 – Vol. 11. – P.104-10.
9. Усенко Л.В. Искусственная гипотермия в современной реаниматологии. / Л.В. Усенко, А.В. Царев // *Общая реаниматология*. – 2009. – №. 5(1). – С.21-23.
 10. Mayer S.A., Sessler V.A. Therapeutic Hypothermia. - New York: Marcel Dekker, 2005. - 402 p.
 11. Nunnally M.E. Targeted temperature management in critical care: A report and recommendations from five professional societies / Nunnally M.E., Jaeschke R., Bellingan G.J. [et al.] // *Critical Care Medicine* – 2011. – Vol.39. – P.1113-1125.
 12. Safar P. Cerebral resuscitation from temporary complete global brain ischemia. In: Pinsky M. R. (ed.) *Cerebral blood flow: mechanisms of ischemia, diagnosis, and therapy*. Berlin: Springer; 2002. – P.106-36.
 13. 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 // *Офтальмологический журнал*. – 1978. – № 8. – С. 594-597.
 14. 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.
 15. Tamai K. Experimental study on local cooling of the eyeball in ocular surgery. The local cooling effect on uveal blood circulation, intraocular pressure, and intravitreal pressure / K. Tamai, A. Majima, F. Honda // *Nippon Ganka Gakkai Zasshi* – 1993. - Vol. 97. – P.509–513.
 16. 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.
 17. Fujishima H. Increased comfort and decreased inflammation of the eye by cooling after cataract surgery / H. Fujishima, Y. Yagi, I. Toda, J. Shimazaki, K. Tsu ota // *Am. J. Ophthalmol.* – 1995. - Vol. 119. – P.301-306.
 18. Tamai K. Local hypothermia protects the retina from ischaemic injury in vitrectomy / K. Tamai, E. Toumoto, A. Majima // *Br J. Ophthalmol.* –1997. - Vol. 81. – P.789-794.
 19. Золотарева М.М., Чвялева К.И., Василевич А.И. Гипотермия при глазных заболеваниях. – Минск, 1978. – 112 с.
 20. 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.
 21. Задорожний О.С. Экспериментальное исследование эпibuльбарной и интраокулярной температуры кролика в условиях гипотермии / О.С. Задорожний, Р.Э. Назаретян, В.В. Мирненко, В.А. Науменко, Н.В. Пасечникова // *Офтальмология. Восточная Европа* – 2018. - № 1. – С. 73-81.
 22. Анатичук Л.И. Динамика внутриглазной температуры в процессе витреоретинальной хирургии с применением ирригационных растворов различной температуры / Анатичук Л.И., Пасечникова Н.В., Науменко В.А., Назаретян Р.Э., Уманец Н.Н., Кобылянський Р.Р., Задорожний О.С. // *Офтальмол. журн.* – 2019. – № 1. – С. 33-38.
 23. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: / Л.И. Анатичук // *Справочник*. -К.: Наук. думка. - 1979. - 768 с.
 24. Анатичук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.

Надійшла до редакції 10.07.2019

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Пасечнікова Н.В., *док. мед. наук, НАМН України*³,
Науменко В.О.,³ **Задорожний О.С.** *канд. мед. наук*³,
Назаретян Р.Э.,³ **Гаврилюк Н.В.**^{1,2}, **Тюменцев В.А.**¹,
Кобылянський Р.Р., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна, *e-mail: anatyuch@gmail.com*;

²Черновицький національний університет ім. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна,

³ГУ «Інститут очних захворювань і тканинної терапії
ім. В.П. Філатова НАМН України»,
Французький бульвар, 49/51, г. Одеса, 65061, Україна,
e-mail: zadoroleg2@gmail.com.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ГИПОТЕРМИИ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

В работе приведены результаты разработки термоэлектрического устройства в виде монокулярной повязки для контактного охлаждения глаза человека через веко. Разработанный прибор дает возможность контролируемого локального контактного охлаждения структур глаза через веко и предназначен для лечения острых и хронических заболеваний глаза, снижения внутриглазного давления, уменьшения болевого синдрома и воспалительных процессов глаза. Приведены особенности конструкции прибора и его технические характеристики. Библ. 23, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический прибор, термоэлектрическое охлаждение, гипотермия глаза человека.

L.I. Anatyuchuk *acad. National Academy of Sciences of Ukraine*^{1,2},
N.V. Pasechnikova *doc. med. sciences, 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;

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

³State Institution “The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue Therapy of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”,
49/51, Frantsuskiy Boulevard, Odessa, 65061, Ukraine.
e-mail:zadoroleg2@gmail.com.

THERMOELECTRIC DEVICE FOR HYPOTHERMIA OF THE HUMAN EYE

The paper presents the results of the development of a thermoelectric device in the form of a monocular dressing for contact cooling of the human eye through the eyelids. The developed device allows controlled local contact cooling of the eye structures through the eyelids and is designed to treat the acute and chronic eye diseases, reduce intraocular pressure, and reduce pain and inflammatory processes of the eye. The design features of the device and its technical characteristics are presented. Bibl. 23, Fig. 2, table 1.

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

References

1. Tsarev A.V. (2014). Tselevoi temperaturnyi menedzhment v klinicheskoi praktike intensivnoi terapii kriticheskikh sostoianii [Targeted temperature management in the clinical practice of critical state intensive therapy]. *Meditcina neotlozhnykh sostoianii – Emergency Medicine*, 7, 186-191 [in Russian].
2. Alzaga A.G., Cerdan M., Varon J. (2006). Therapeutic hypothermia. *Resuscitation*, 70 (3), 369-380.
3. Polderman K.H., Herold I. (2009). Therapeutic hypothermia and controlled normothermia in the ICU: Practical considerations, side effects, and cooling methods. *Crit. Care Med.*, 37, 1101-1120.
4. Saad H., Aladawy M. (2013). Temperature management in cardiac surgery. *Glob. Cardiol. Sci. Pract.*, 1, 44-62.
5. The hypothermia after cardiac arrest group. Mild therapeutic hypothermia to improve the neurologic outcome after cardiac arrest. (2002). *N. Engl. J. Med.*, 346, 549-556.
6. Yenari M.A., Han H.S. (2012). Neuroprotective mechanisms of hypothermia in brain ischaemia. *Nat. Rev. Neurosci*, 13, 267-278.
7. Bernard S., Buist M. (2003). Induced hypothermia in critical care medicine: A review. *Critical Care Medicine*, 31, 2041-2051.
8. Lampe J.W., Becker L.B. (2011). State of the art in therapeutic hypothermia. *Annu. Re. Med.*, 11, 104-10.
9. Usenko L.V., Tsarev A.V. (2009). Iskusstvennaia hipotermiia v sovremennoi reanimatologii [Artificial hypothermia in modern resuscitation]. *Obshchaiia reanimatologiya – General Resuscitation*, 5(1), 21-23.
10. Mayer S.A., Sessler V.A. (2005). *Therapeutic hypothermia*. New York: Marcel Dekker.
11. Nunnally M.E., Jaeschke R., Bellingan G.J., et al. (2011). Targeted temperature management in critical care: A report and recommendations from five professional societies. *Critical Care Medicine*, 39, 1113-1125.
12. Safar P. (2002). *Cerebral resuscitation from temporary complete global brain ischemia*. In: *Cerebral blood flow: mechanisms of ischemia, diagnosis, and therapy*. Pinsky M.R.(Ed.) Berlin: Springer.

12. Chanchikov G.F., Zavolskaia Z.P., Bereznikova V.I. (1978). Vliianiie umerennoi lokalnoi hipotermii na ophtalmotonus, zritelnyie funktsii i gidrodinamiku glaz bolnykh glaukomoii [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].
13. 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].
14. Tamai K., Majima A., Honda F. (1993). Experimental study on local cooling of the eyeball in ocular surgery. The local cooling effect on uveal blood circulation, intraocular pressure, and intravitreous pressure. *Nippon Ganka Gakkai Zasshi*, 97, 509-513.
15. Jabbour N.M., Schepens C.L., Buzney S.M. (1998). Local ocular hypothermia in experimental intraocular surgery. *Ophthalmology*, 95, 1685-1690.
16. Fujishima H., Yagi Y, Toda I., Shimazaki J., Tsuota K (1995). Increased comfort and decreased inflammation of the eye by cooling after cataract surgery. *Am. J. Ophthalmol.*, 119, 301-306.
17. Tamai K., Toumoto E., Majima A. (1997). Local hypothermia protects the retina from ischaemic injury in vitrectomy. *Br J. Ophthalmol.*, 81, 789-794.
18. Zolotareva M.M., Chvialeva K.I., Vasilevich A.I. (1978). *Gipotermiia pri glaznykh zabolovaniiax [Hypothermia with eye diseases]*. Minsk [in Russian].
19. 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].
20. Zadorozhnyi O.S., Nazaretian R.E., Mirnenko V.V., Naumenko V.A., Pasechnikova N.V. (2018). *Eksperimentalnoie issledovaniie epibulbarnoi i intraokuliarnoi temperatury krolika v usloviiax hipotermii [Experimental study of epibulbar and intraocular temperature of rabbit under hypothermia]*. *Oftalmologiya. Vostochnaia Evropa - Ophthalmology. Eastern Europe*, 1, 73-81.
21. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.A., Nazaretian R.E., Umanets N.N., Kobylianskyi R.R., Zadorozhnyi O.S. (2019). Dynamics of intraocular temperature in the process of vitreoretinal surgery using irrigational solutions of various temperature. *Oftalmologicheskii Zhurnal - J. Ophthalmology*, 1, 33-38 [in Russian].
22. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroistva. Spravochnik (Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook)*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
23. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo.T.2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters]*. Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].

Submitted 10.07.2019



Микитюк П.Д.

Микитюк П.Д. канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О.Ю. канд. фіз.-мат. наук, доцент³

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

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

e-mail: anatykh@gmail.com,

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



Микитюк О.Ю.

ПРО ДЕЯКІ ВАРІАНТИ ПОКРАЩАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Досліджено залежність чутливості термоперетворювача від взаємного розташування його конструктивних елементів. Підтверджено важливість оптимального узгодження опору термопари з опором нагрівника для кожного конкретного застосування термоперетворювача та доцільність оптимізації елементів його конструкції. Бібл. 4, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, термопара, нагрівник, чутливість.

Вступ

Покращання основних параметрів термоперетворювачів (ТП) метрологічного призначення до цього часу, в основному, досягаються за рахунок підвищення термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів, що використовуються для виготовлення одного з основних конструктивних елементів ТП – термопари.

Однак, в [1] було показано, що застосування термоелектричного матеріалу із максимальною термоелектричною ефективністю (Z) не завжди є визначальним фактором у покращанні параметрів ТП. Наприклад, суттєве підвищення чутливості ТП можна отримати за рахунок оптимізації теплового режиму його роботи з метою підвищення ефективності використання тепла, що виділяється нагрівником, мінімізацією впливу термопари на розподіл температури в нагрівнику [2], оптимізацією конструктивних елементів, вибором найефективнішого режиму роботи для конкретного застосування ТП і ін.

Метою даної роботи є дослідження можливих варіантів покращання параметрів ТП, що ґрунтуються на оптимізації елементів конструкції ТП та режиму їх експлуатації.

Залежність чутливості ТП від геометричних розмірів його корпусу.

При конструюванні ТП необхідно враховувати, що тепловий режим ТП визначається не лише геометричними розмірами термопари і нагрівника, але і відстанню між ними і корпусом ТП.

Для оптимізації ТП за геометричними розмірами була проведена серія експериментальних досліджень для визначення залежності чутливості ТП від відстані між

кришкою корпусу і площиною, у якій розташувались термопара і нагрівник. Дослідження проводились у середовищах з різними умовами теплообміну – у вакуумі, ксеноні і повітрі.

Результати експериментів подані на рис. 1.

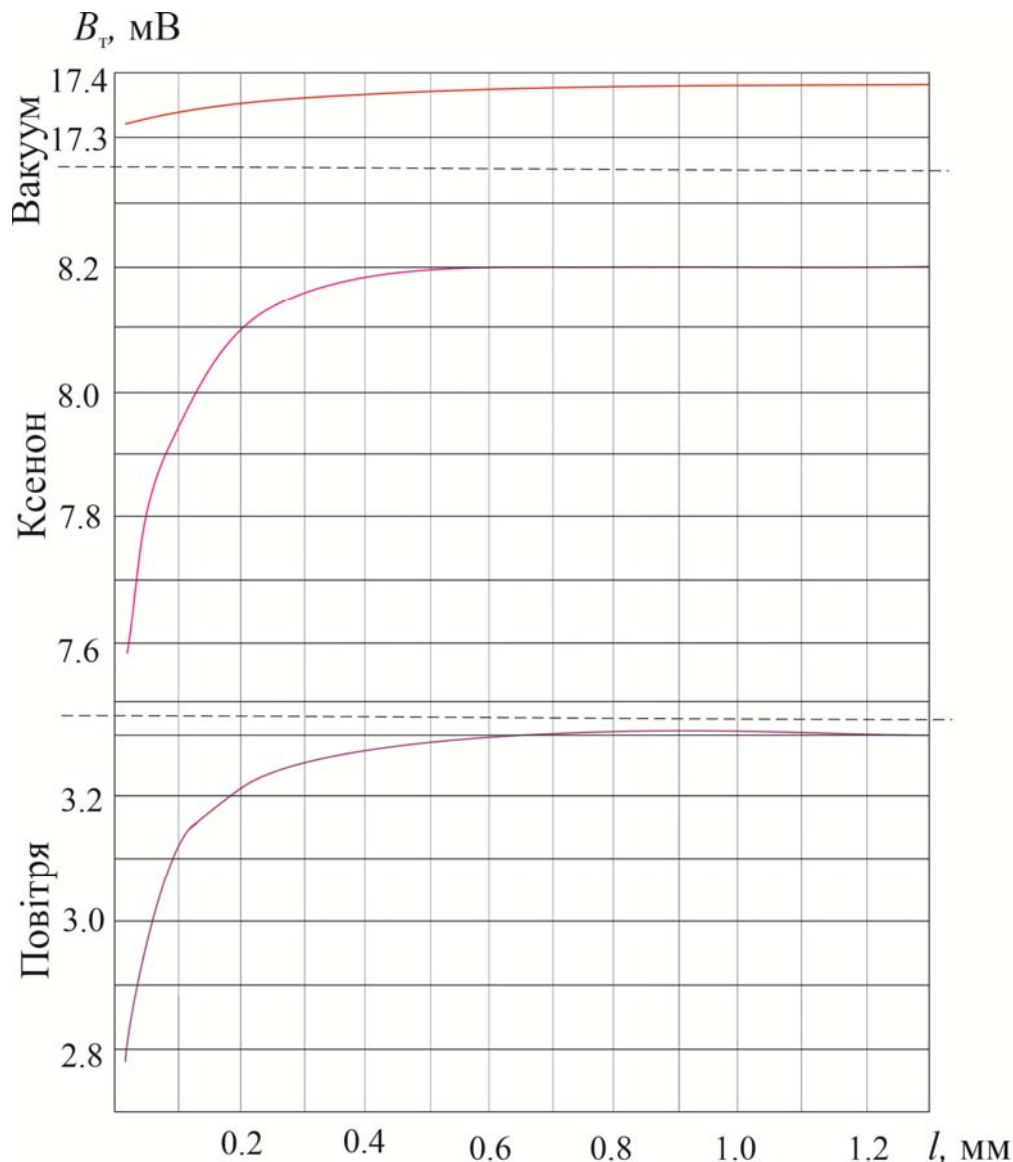


Рис. 1. Залежність вихідного сигналу E_T ТП від висоти L кришки корпусу над термопарою.

З рис. 1 видно, що з відстані $L = 0.5 \div 0.6$ мм подальше збільшення L практично не змінює умови теплообміну між елементами конструкції ТП та корпусом ТП.

Дані, отримані у ксеноні та вакуумі підтверджують теоретичні розрахунки про те, що інтенсивність тепловіддачі у вакуумі є значно меншою за інтенсивність теплообміну в газовому середовищі.

Вищенаведені дослідження проводились для ТП типу 4604 з номінальним струмом 25 мА та сигналом термопари $E_T \geq 10$ мВ. Такий ТП 4604 конструктивно виготовлений у корпусі висотою 5.5 мм та діаметром 4.9 мм. Слід зазначити, що для інших номіналів ТП змонтованих в

аналогічному корпусі дані досліджень можуть дещо відрізнятись. Однак, метою експериментальних досліджень було встановлення самого факту впливу корпусу ТП на розташування термопари і нагрівника в ньому.

Узгодження опору термопари ТП з опором навантаження.

Питання про вибір оптимального режиму роботи ТП достатньо повно і давно розглянуто в [3]. Однак, розробники ТП не завжди враховують важливість узгодження опору термопари з опором навантаження. Тому є зміст, ще раз окремо зупинитися на цьому питанні.

Вираз для електричної потужності $P_{вих}$, яку розвиває термопара на навантаженні r можна записати у вигляді:

$$P_{вих} = (E - I_m \cdot R_m) \cdot I_m = E_n \cdot I_m \quad (1)$$

де R_m , I_m – опір і номінальний струм термопари, а E_n напруга на навантаженні r .

Перетворимо вираз (1), виразивши його через відношення опорів термопари R_m і навантаження r .

$$P_{вих} = \frac{E_n^2}{R_T} \frac{1}{(m+2+\frac{1}{m})} \quad (2),$$

де $m = \frac{r}{R_T}$.

На рис. 2 показано графік залежності максимальної потужності термопари w від m , на якому для зручності значення E_T і R_T прийняті рівними 1.

Як видно з рис. 2 максимальна потужність, що виділяється на навантаженні, спостерігається при $m = 1$.

При зміні опору термопари в межах $0.6 \leq m \leq 2$ зменшення потужності не перевищує 10 %. Отже при розробці ТП для досягнення високих метрологічних параметрів величина опору термопари може відхилитися від заданої величини в указаних вище межах.

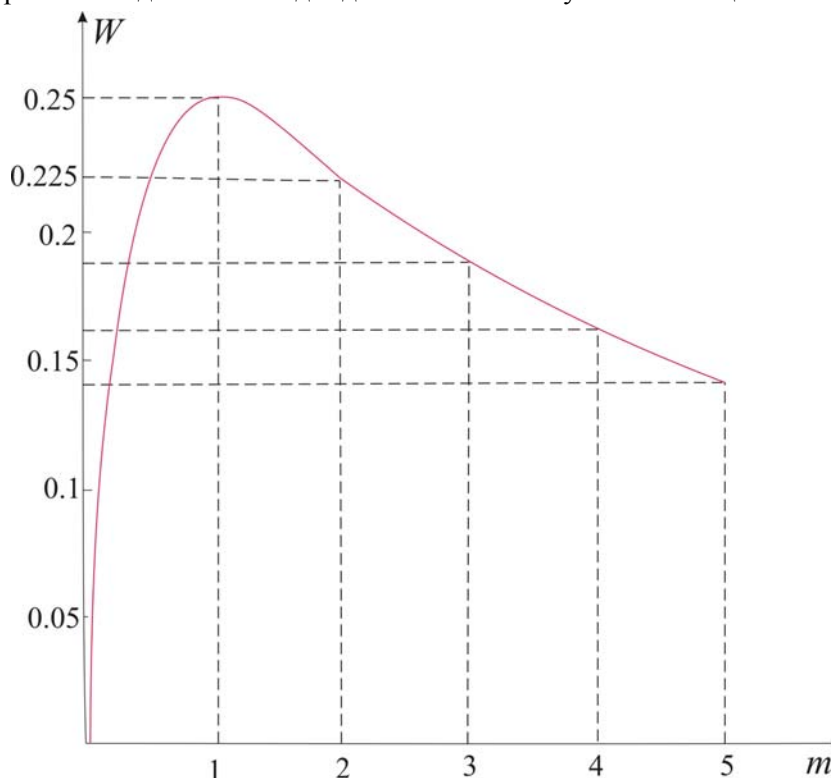


Рис. 2. Графік залежності w від m

Оптимізація нагрівника і термопари.

Суттєвого підвищення вольт-ватної чутливості ТП можна досягнути за рахунок покращання ефективності використання тепла, що виділяється нагрівником. У роботі [4] досліджувався варіант застосування нагрівника зі змінним по довжині опором, з метою максимальної концентрації тепла в точці контакту нагрівника і спаю термопари. За оцінками, зробленими в [4], такий підхід дозволяє збільшити температуру в точці контакту спаю термопари з нагрівником майже в 2 рази. На основі цих результатів досліджень були створені кілька конструкцій ТП з нагрівниками зі змінним поперечним перерізом. Такі ТП досліджувались на повітрі, в ксеноні і у вакуумі на установці ВУП-4А при тиску 10^{-4} мм.рт.ст. Результати експериментів наведені в таблиці 1. Для порівняння в таблиці 1 подані параметри виробу, прийнятого в якості аналогу – ТП 2101.

Таблиця

Параметри ТП

Тип або конструкція ТП	Усереднені значення параметрів ТП							
	R_n , ом не більше	R_m , ом не більше	E_m на повітрі не менше	S_w на повітрі В/Вт	E_m в ксеноні, мВ	S_w в ксеноні, мВ	E_m у вакуумі, мВ	S_w , у вакуумі, мВ
ТП 2401 (АЮЖ 3.360.009 ТУ)	12	7	-	-	8	8	-	-
ТП з профільним нагрівником	16	10	3.0	7.5	5.2	13	7.2	18
ТП зі збірним нагрівником	16	10	2.8	7	4.4	11	6.4	16
ТП з підвищеним опором термопари	16	20 40	3.2 3.6	8 9	6.0 7.2	15 12	8.8 12	22 90

З таблиці видно, що суттєвого підвищення вольт-ватної чутливості ТП можна добитися шляхом вакуумізації його робочого об'єму. Однак, у цьому випадку проблемою стає наявність вакуумнощільного корпусу для ТП. Однак, створення такого корпусу не розв'яже задачі. Необхідно буде провести ряд досліджень в умовах вакууму, що може вимагати розроблення нової технології отримання такого матеріалу та методів його дослідження.

З точки зору практичних застосувань цікавим є варіант конструкції ТП зі збільшеним опором термопари. Як видно з таблиці 1, чутливість такого ТА при $R_m = 40$ Ом досягає 30 В/Вт, істотно перевищуючи чутливість ТП, у яких термопара має $R_m = 10$ Ом.

Проблемою в широкому застосуванні ТП з підвищеним опором є технологічна складність виготовлення мікромініатюрних термопар з поперечним перерізом віток на рівні 15×15 мкм, у даний час технологія виготовлення таких виробів, в основному, базується на використанні ручної праці.

Висновки.

1. Встановлено залежність чутливості термоперетворювача від взаємного розташування термопари нагрівника і корпусу для перетворювача ТП 46014.

2. При узгодженні опору навантаження і термопари високі метрологічні параметри ТП досягаються, коли співвідношення їх опорів m знаходяться в межах $0,6 \leq m \leq 2$.

Література

1. Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю. До питання вибору матеріалу термопари для термоперетворювачів метрологічного призначення. /П.Д. Микитюк, О.Ю. Микитюк.//Термоелектрика.-2019.№ с./
2. Микитюк П. Д. Про вплив термопари на розподіл температури в нагрівнику вимірювального термоперетворювача / П. Д. Микитюк, О. Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №1. – С. 64–59.
3. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л. И. Анатычук. – Київ: Наукова думка, 1979. – 766 с.
4. Микитюк П. Д. Розподіл температури в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом у термоелектричному перетворювачі / П. Д. Микитюк, О. Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №2. – С. 79–74.

Надійшла до редакції 18.07.2019

Микитюк П.Д., канд. физ.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О.Ю., канд. физ.-мат. наук, доцент³

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

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

³Высшее государственное учебное заведение Украины
«Буковинский государственный медицинский университет»,
Театральная площадь, 2, Черновцы, 58002, Украина

О НЕКОТОРЫХ ВАРИАНТАХ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Исследована зависимость чувствительности термопреобразователя от взаимного расположения его конструктивных элементов. Подтверждена важность оптимального согласования сопротивления термопары с сопротивлением нагревателя для каждого конкретного применения термопреобразователя и целесообразность оптимизации элементов его конструкции. Библ. 4, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, термопара, нагреватель, чувствительность.

P.D. Mykytiuk. *can. phys.-math. sciences*^{1,2},
O.Yu. Mykytiuk. *can. phys.-math. sciences, docent*³,

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

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

³Higher State Educational Institution of Ukraine
“Bukovinian State Medical University”, 2,
Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

SOME OPTIONS FOR IMPROVING PARAMETERS OF THERMOELECTRIC CONVERTERS

The sensitivity of thermal converter as a function of mutual arrangement of its structural elements was investigated. The importance of optimally matching the resistances of thermocouple and heater for each specific application of thermal converter and the advisability of optimizing its structural elements were confirmed. Tabl. 1, Fig. 2, Bibl. 6.

Key words: thermoelectric converter, thermocouple, heater, sensitivity.

References

1. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2019). In reference to the choice of thermocouple material for metrological-purpose thermal converters. *J. Thermoelectricity*
2. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 64–59.
3. Anatykhuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
4. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Temperature distribution in a heater with a resistance variable along its length in thermoelectric converter. *J. Thermoelectricity*, 2, 79–74.

Submitted 18.07.2019

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



Анатичук Л.І.

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

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



Лисько В.В.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕДПУСКОВИХ НАГРІВАЧІВ ВЕЛИКИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

Проаналізовано основні причини ускладненого запуску транспортних засобів за понижених температур навколишнього середовища. Визначено переваги та недоліки в застосуванні передпускового підігріву для покращення запуску двигуна автомобілів. Наведено принцип роботи та особливості конструкції передпускових нагрівачів загального використання та передпускових нагрівачів для бронетехніки. Обґрунтовано раціональність використання термоелектричних генераторів для роботи такого обладнання. Наведено результати досліджень термодинамічних особливостей систем передпускового розігріву двигуна внутрішнього згорання, в яких джерелами електричної енергії є термоелектричні генератори. Розглянуто фізичні схеми систем «передпусковий нагрівник – термогенератор» та проведено оцінку їхніх енергетичних характеристик. Визначено найефективніші варіанти застосування термоелектричних джерел електрики для передпускової підготовки двигунів транспортних засобів до експлуатації. Бібл. 31, рис. 7, табл. 1.

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

Вступ

Для подолання труднощів, пов'язаних із експлуатацією автомобілів при понижених температурах, все ширше використовуються різноманітні засоби теплової передпускової підготовки двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) [1, 2]. Найефективнішими серед таких засобів є передпускові нагрівники – полум'яні джерела тепла, що працюють від палива автомобілів та здійснюють розігрів охолоджуючої рідини двигунів. Крім надійного запуску ДВЗ використання передпускових нагрівників створює умови для економії в середньому біля 90-150 л палива за сезон, зменшує до 5 разів токсичність вихлопних газів під час розігріву двигуна та дозволяє збільшити моторесурс двигуна на 200-300 км за один пуск при розігріві від температури (-20 ÷ -30) °С [3, 4].

Важливим є передпусковий прогрів двигуна і для великогабаритної техніки, зокрема військового призначення. Основними причинами, які обумовлюють ускладнений запуск бронетанкової техніки за понижених температур навколишнього середовища є:

1. Збільшення в'язкості моторного масла на деталях шатунно-поршневої групи двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ).

2. Підвищення в'язкості змазки в агрегатах трансмісії.
3. Застигання палива в паливопроводах, паливному фільтрі та інших частинах паливної системи.
4. Погіршення умов займання палива в циліндрах двигуна, що зв'язано із пониженням його випаровуваності та низькими температурами повітря, що надходить до циліндрів ДВЗ з навколишнього середовища.
5. Замерзання охолоджуючої рідини в системі охолодження двигуна.
6. Зменшення потужності стартер-генератора внаслідок зниження ємності акумуляторних батарей.
7. Перевитрата палива при холодному запуску ДВЗ, яке у місцях бойових дій не завжди є наявності.

Вплив наведених факторів за понижених температур проявляється одночасно, що призводить до скорочення ресурсу роботи двигуна та передчасного виходу з ладу боездатних одиниць бронетанкової техніки. При цьому суттєво збільшується ймовірність виникнення раптових порушень та відмов в роботі техніки.

Визначальним фактором, що обмежує можливість масового використання передпускових нагрівників є розряд акумуляторної батареї під час роботи передпускового обладнання [5].

Одним із перспективних методів вирішення проблеми розрядки акумуляторів під час теплової підготовки двигунів транспортних засобів до запуску є використання термоелектричних генераторів в якості джерел електричної енергії для передпускових нагрівників [6 – 12]. Ця ідея покладена в основу досліджень, що проводились в Інституті термоелектрики, спрямованих на створення термоелектричних передпускових джерел тепла для двигунів легкового автотранспорту [13 – 16]. В результаті проведених досліджень розроблено експериментальний зразок термоелектричного передпускового нагрівника на дизельному паливі тепловою потужністю 3 кВт для попереднього розігріву двигунів внутрішнього згорання об'ємом до 4 л. Нагрівник містить термоелектричний генератор електричною потужністю 80 – 100 Вт, який працює від тепла передпускового нагрівника та забезпечує живлення його компонент. Крім того надлишок електричної енергії термогенератора може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї автомобіля, що було підтверджено експериментальними випробуваннями нагрівника в стендових умовах [17].

Метою даної роботи є аналіз можливостей використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей, зокрема для бронетанкової техніки та вибір найбільш ефективної фізичної схеми для створення таких генераторів.

Короткий опис нагрівачів великих потужностей

Сучасні передпускові нагрівники тепловою потужністю від 15 кВт для дизельних двигунів наведено в таблиці 1. Провідними компаніями з цього напрямку є німецькі компанії Webasto та Eberspächer, російські – Теплостар та Шадринський автоагрегатний завод, канадська – PROHEAT [18-31].

Компанією Webasto (Німеччина) випускаються передпускові нагрівники тепловою потужністю до 35 кВт [18, 19]. Споживана електрична потужність таких підігрівачів складає 90-170 Вт без врахування потужності циркуляційного насоса. При цьому електрична потужність рекомендованих циркуляційних насосів типу U 4814 складає 104 Вт, типу U 4851 – 209 Вт. Таким чином, загальне енергоспоживання передпускових нагрівників компанії Webasto тепловою потужністю 16 - 35 кВт складає від 194 до 379 Вт.

Таблиця 1

Передпускові нагрівники тепловою потужністю від 15 кВт для дизельних двигунів

Виробник	Модель	Вихідна теплова потужність, кВт	Споживана електрична потужність, Вт	Витрата палива, л/год.
Webasto (Німеччина)	DBW 160	16	90*	2.3
	DBW 230	23.3	110*	3.0
	DBW 300	30	130*	4.0
	DBW 350	35	170*	4.4
	* - без циркуляційного насоса (споживана електрична потужність рекомендованих циркуляційних насосів типу U 4814 – 104 Вт, U 4851 – 209 Вт)			
Eberspächer (Німеччина)	Hydronic L 16	16	60**	2
	Hydronic L 24	24	80**	2.9
	Hydronic L 30	30	105**	3.7
	Hydronic L 35	35	120**	4.2
	** - без циркуляційного насоса (споживана електрична потужність рекомендованих циркуляційних насосів типу Flowtronic 5000 – 104 Вт, Flowtronic 6000 SC – 210 Вт)			
Теплостар (РФ)	14 ТС-10	15	132	2
	20 ТС-Д38	20	200	2.5
	АПЖ – 30Д-24	30	336	3.7
АО «Шадринский автоагрегатный завод» (РФ)	ПЖД24Б	24	170	3.8
	ПЖД30	30	340	5
	ПЖД30Г	30	340	5
	ПЖД30Е	30	340	5
	ПЖД30Л	30	340	5
	ПЖД30М	30	340	5
	ОЖД30.8106010	30	140	3.8
	ПЖД44Ш	37	340	8.5
	ПЖД600	58	490	11.4
PROHEAT (Канада)	M50 12V	15	114***	1.8
	M50 24V	15	125***	1.8
	M80 12V	23	102***	3
	M80 24V	23	125***	3
	M90 24V	26	125***	3.1
	M105 24V	31	228***	4
	M125 24V	37	228***	4.2
	*** - без циркуляційного насоса			

Компанією Eberspächer (Німеччина) випускаються передпускові нагрівники L-серії тепловою потужністю від 16 до 35 кВт [20, 21]. Споживана електрична потужність таких підігрівачів складає 60-120 Вт без врахування потужності циркуляційного насоса.

Нагрівники Hydronic серії L – найпотужніші рідинні опалювачі від Eberspächer. Призначені для установки на транспорт з великим об'ємом двигуна і великим салоном. Hydronic L 30 / 35кВт пропонуються як з рознесеною, так і з компактною версією з вбудованими компонентами: водяним насосом, паливним фільтром, що економить час на установці. Підігрівач здатний працювати як на дизельному паливі, так і на мазуті.

Електрична потужність рекомендованих циркуляційних насосів: типу Flowtronic 5000 – 104 Вт, Flowtronic 6000 SC – 210 Вт. Таким чином, загальне енергоспоживання передпускових нагрівників Hydronic серії L від Eberspächer складає від 164 до 330 Вт.

Російська компанія Теплостар випускає три моделі передпускових нагрівників тепловою потужністю від 15 до 30 кВт – 14ТС-10, 20 ТС-Д38, АПЖ – 30Д-24 [22 – 24]. Споживана електрична потужність таких нагрівників – 132-336 Вт.

Шадринський автоагрегатний завод (РФ) випускає передпускові нагрівники тепловою потужністю до 58 кВт [25-29]. Споживана електрична потужність нагрівників тепловою потужністю від 24 до 58 кВт складає 170-490 Вт.

Компанією PROHEAT (Канада) випускаються передпускові нагрівники М-серії тепловою потужністю від 15 до 37 кВт [30]. Споживана електрична потужність таких підігрівачів складає 114-128 Вт без врахування потужності циркуляційного насоса.

Таким чином для експлуатації передпускових нагрівників, наведених в таблиці 1, необхідно до 500 Вт електричної енергії.

Передпусковий нагрівник в бронетанковій техніці використовується для розігріву охолоджувальної рідини в системі охолодження і масла в циркуляційному бачку перед запуском двигуна [31]. Він встановлений в бойовому відділенні танка і складається з котла і механізмів, що забезпечують подачу і спалювання палива (паливного насоса, вентилятора, форсунки, свічки розжарювання), водяного насоса і редуктора з ручним і електричним приводами.

Котел нагрівника циліндричної форми, суцільнозварної конструкції з нержавіючої сталі, що складається з корпусу, жарової труби і коробки змієвика.

Корпус котла і жарова труба мають подвійні циліндричні стінки, між якими утворюються внутрішні порожнини, які заповнюються охолоджувальною рідиною (водяний простір котла). Внутрішні порожнини корпусу і жарової труби з'єднуються між собою чотирма трубками.

Внутрішня передня частина корпусу котла разом з конусної кришкою утворює топку котла, а задня частина – газову камеру. Знизу до корпусу котла приварений випускний патрубок, що відводить продукти згорання через отвір в днищі танка назовні. Зверху до корпусу приварена коробка, в якій міститься змійовик для підігріву палива. Підігріта рідина надходить з корпусу котла в коробку змійовика через отвір, розташований у верхній частині корпусу.

Насосний вузол підігрівача включає в себе водяний насос; вентилятор, паливний насос і шестерний редуктор з ручним і електричним приводами. Весь цей вузол змонтований в загальному картері.

Водяний насос центробіжного типу служить для примусової циркуляції охолоджуючої рідини в системі підігріву. Вентилятор центробіжного типу подає повітря, необхідне для згорання палива в топці котла. Паливний насос плунжерного типу подає паливо до форсунки підігрівача. Керування насосним вузлом може здійснюватись механічно з використанням ручного приводу та електрично, від електродвигуна.

Центробіжна форсунка підігрівача призначена для розпилення палива в топці котла, яке розпалює свічка розжарення. Живлення свічки здійснюється від акумуляторної батареї напругою

24 В. У разі несправності свічки розжарення паливо можна запалювати факелом через верхнє праве отвір конуса, що закривається пробкою.

Для відключення підігрівача від системи охолодження (на літній період експлуатації танка) встановлюється кран відключення підігрівача.

При роботі нагрівника охолоджуюча рідина під дією водяного насоса підігрівача подається по трубопроводу і розгалужується на чотири паралельні потоки.

Перший потік проходить через двигун, розігріваче головки і блоки циліндрів і через водяний насос повертається в котел підігрівача.

Другий потік проходить по трубопроводу в змієвик циркуляційного масляного бачка, розігріваче масло в циркуляційному бачку і по кожусі забірною масляного трубопроводу повертається в котел підігрівача.

Третій потік проходить через водяний радіатор через водяний насос двигуна і по трубопроводу повертається в котел підігрівача.

Четвертий потік проходить з нагнітального трубопроводу підігрівача по трубці в порожнину маслозакачуючого насосу. З насосу рідина надходить в кожух забірною трубопроводу насосу і далі в котел підігрівача. В котлі рідина підігріваче і знову циркулює по зазначеним вище потокам.

Таким чином, в порівнянні із передпусковим нагрівником для традиційних транспортних засобів форсуночний танковий передпусковий нагрівник володіє рядом конструктивних та функціональних відмінностей, що робить його надійнішим та ефективнішим.

Такі та вдосконалені форсуночні передпускові нагрівники тепловою потужністю 30-70 кВт встановлено на багатьох танках розробки колишнього СРСР – Т-55, Т-64, Т-64А, Т-72 та ін. [32].

У сучасних бронетранспортерах встановлюються передпускові нагрівники, які використовуються і для іншої, цивільної, техніки – вантажних автомобілів, автобусів та спецтехніки з рідинною системою охолодження.

Оскільки для живлення основних функціональних компонент передпускових рідинних нагрівників необхідна електрична енергія, її джерелом є акумуляторна батарея бронетанкового транспортного засобу. При понижених температурах ($-20 \div -40$ °С) ємність акумулятора знижується в 2 - 3 рази, що створює проблеми в забезпеченні електричною енергією як передпускових нагрівників, так і іншої апаратури, яка має працювати при непрацюючому двигуні. Така ситуація зумовлює ризики при запуску бронетанкової техніки, тому на практиці часто виникає необхідність в розігріві двигунів без використання передпускових нагрівників – паяльними лампами, гарячою водою, танковими пічками та ін. В бойових умовах це створює суттєві проблеми при експлуатації бронетанкової техніки. Тому, незважаючи на переваги в застосуванні рідинних передпускових нагрівників, що полягають, зокрема, в збільшенні моторесурсу двигуна та економії палива при його запуску, використання нагрівників, досі залишається проблематичним у зв'язку з їхньою неавтономною роботою.

Вирішити проблему неавтономної роботи передпускових нагрівників деякий час намагалися шляхом використання газотурбінного двигуна внутрішнього згорання в поєднанні з динамо-машиною, якою здійснюється живлення акумуляторної батареї під час передпускового підігріву. Проте основним недоліком такої системи є підвищений рівень шуму та високі температури продуктів згорання, що є демаскуючими фактором в умовах бойових дій.

Для подолання цієї проблеми перспективним є використання термоелектричних джерела тепла та електрики, які окрім передпускового розігріву, здійснюють живлення функціональних компонент нагрівників. Тому для їхнього живлення електрична енергія акумуляторів не потрібна.

Для використання таких джерел тепла та електрики з метою покращення експлуатаційних можливостей бронетанкової військової техніки необхідною є електрична потужність термогенератора близько 300-500 Вт. Такі термоелектричні пристрої мають високий ресурс роботи, є надійними та стійкими до механічних навантажень і відповідають вимогам їх використання у військовій техніці.

У 1958-1969 рр. у ВНДІ-100 були проведені роботи зі створення танкового підігрівача з термоелектричним генератором [32]. Робота проводилася спільно з Інститутом напівпровідників АН СРСР і ЛПІ ім. М.І. Калініна. Передбачалося, що ТЕГ дозволить отримати електричну потужність приблизно 500 Вт, що дозволило б екіпажу танка підтримувати машину в стані боєготовності, обігрівати жилий відсік, розігрівати акумуляторні батареї і витратити частину електроенергії на підзарядку акумуляторів або для забезпечення роботи радіостанції в зимовий період, без пуску основного двигуна. Підігрівач мав теплову потужність близько 72 кВт, а електричну потужність – 340 Вт. Роботи по вдосконаленню ТЕГ у СРСР тривали до середини 1980-х рр., не були доведені до промислового зразка.

Фізичні схеми передпускових нагрівачів та їх аналіз

На рис. 1 наведено фізичну модель системи передпускового розігріву двигунів, що містить рідинний передпусковий нагрівник та термоелектричний генератор, підведення тепла до яких здійснюється індивідуально, з використанням окремих джерел тепла.

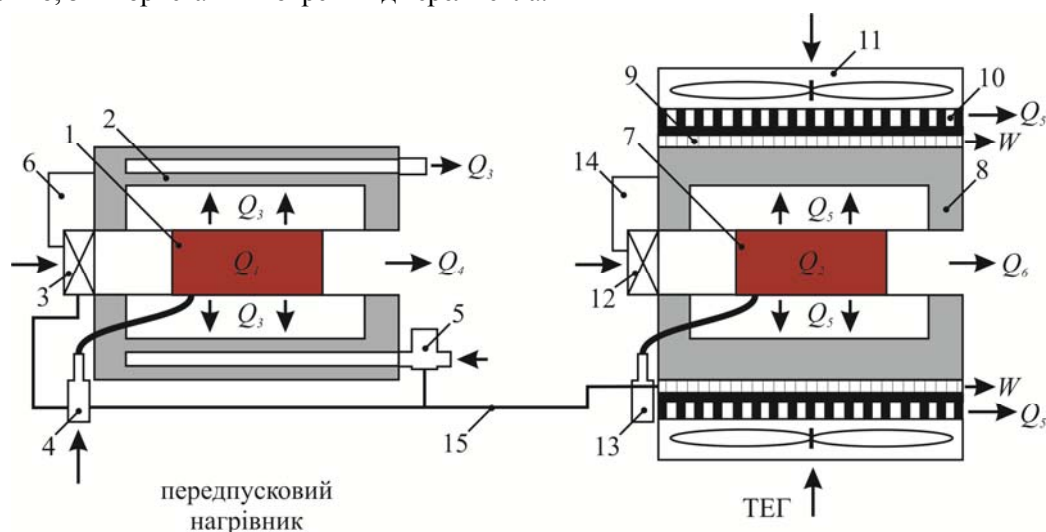


Рис. 1. Фізична модель системи «передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор» з індивідуальними джерелами тепла: 1 – паливник передпускового нагрівника; 2 – теплообмінник; 3 – повітряний вентилятор передпускового нагрівника; 4 – паливний насос передпускового нагрівника; 5 – циркуляційна помпа; 6 – електронний блок передпускового нагрівника; 7 – паливник термогенератора; 8 – гарячий теплообмінник; 9 – термоелектрична батарея; 10 – повітряний радіатор; 11 – вентилятор для відведення тепла; 12 – повітряний вентилятор термогенератора; 13 – паливний насос термогенератора; 14 – електронний блок термогенератора; 15 – засоби електричної комутації.

Рідинний передпусковий нагрівник складається з джерела тепла 1, що знаходиться у внутрішньому об'ємі теплообмінника 2. В якості джерела тепла використано полум'яний паливник, повітря та паливо до якого підводяться вентилятором 3 і насосом 4. В теплообміннику нагрівника виконано канали, в яких теплоносії нагрівається, після чого, шляхом прокачування циркуляційною помпою 5, надходить до двигуна автомобіля. Запуск та керування роботою компонент передпускового нагрівника (повітряного вентилятора, паливного насосу, циркуляційної помпи) здійснюється електронним блоком 6.

Термоелектричний генератор містить індивідуальний полум'яний пальник 7, гарячий теплообмінник 8 для підведення тепла до термоелектричної батареї 9 та систему відведення тепла, яка складається з повітряних радіаторів 10 і вентиляторів 11. Подача палива та повітря до джерела тепла термогенератора здійснюється вентилятором 12 та паливним насосом 13. Для стабілізації вихідної напруги термогенератора і керування його роботою в моделі ТЕГ передбачено електронний блок 14.

Працює термоелектричний генератор наступним чином. Теплова енергія, отримана внаслідок згоряння палива нагріває гарячий теплообмінник, проходить через термоелектричну батарею і відводиться в навколишнє середовище. Внаслідок різниці температур між гарячою і холодною сторонами термобатареї генерується електричний струм, що використовується для живлення передпускового нагрівника.

Таким чином, розглянута система забезпечує передпусковий нагрівник необхідною електричною енергією, практично не використовуючи акумулятор. Разом з тим така система може виконувати і додаткові функції, зокрема термогенератор може застосовуватись як додаткове джерело електричної енергії. Ця енергія може бути направлена при необхідності для зарядки акумулятора або інших потреб енергозабезпечення, наприклад для живлення різноманітних додаткових електричних пристроїв.

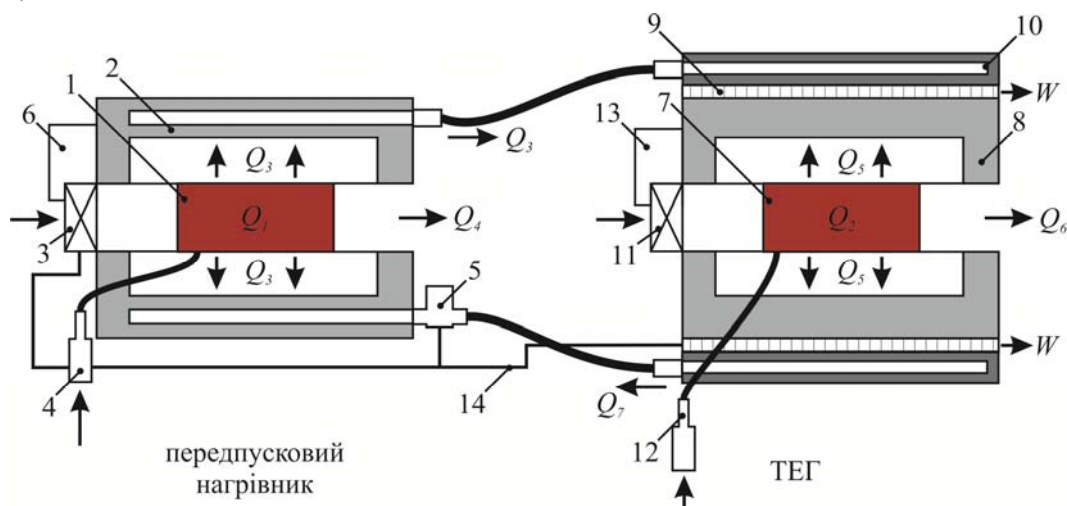


Рис. 2. Фізична модель системи «передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор», з індивідуальними джерелами тепла та сумісним гідравлічним контуром:

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

На рис. 2 наведена схема системи «передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор», яка об'єднує передпусковий нагрівник і термоелектричний генератор єдиним гідравлічним контуром. У зв'язку з цим в системі охолодження термогенератора повітряні радіатори та вентилятори для відведення тепла від термобатареї замінено рідинними теплообмінниками 10, в яких циркулює теплоносія.

Оскільки тепловий потік Q_7 , що відводиться від термобатареї, затрачається для нагріву теплоносія, дана система дозволяє здійснювати попередній розігрів двигуна як передпусковим нагрівником, так і з використанням термоелектричного генератора.

Фізична модель системи (рис. 3) з сумісним джерелом тепла містить гарячий теплообмінник 1, у внутрішньому об'ємі якого розташовано пальник 2. Подача палива та повітря до пальника здійснюється вентилятором 3 та паливним насосом 4. На зовнішній поверхні гарячого теплообмінника знаходиться термоелектрична батарея 5, тепло від якої відводиться опалювальною рідиною, що циркулює в холодних теплообмінниках 6 шляхом прокачування рідиною помпою 7. Запуск та керування роботою нагрівника здійснюється електронним блоком 8.

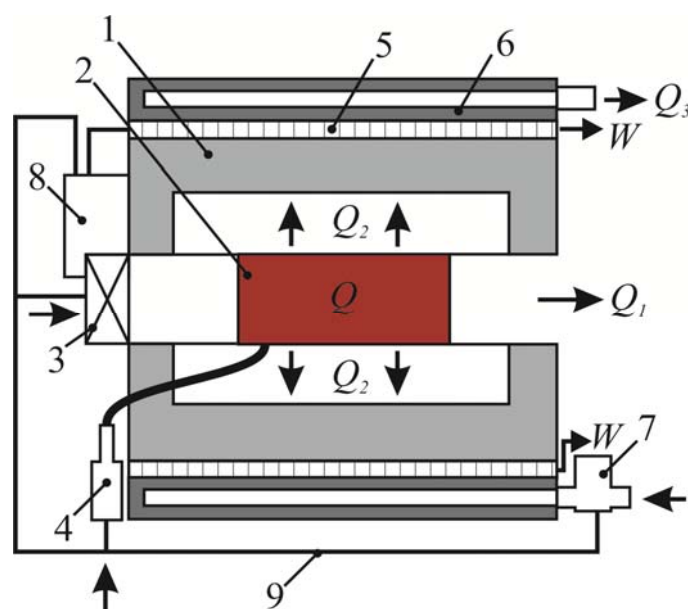


Рис. 3. Фізична модель системи "передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор" з сумісним джерелом тепла: 1 – пальник передпускового нагрівника; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – повітряний вентилятор передпускового нагрівника; 4 – паливний насос передпускового нагрівника; 5 – термоелектрична батарея; 6 – холодний рідинний теплообмінник; 7 – циркуляційна помпа передпускового нагрівника; 8 – електронний блок; 9 – засоби електричної комутації.

Таким чином, в наведеній системі термоелектричний генератор і передпусковий нагрівник об'єднані в єдину конструкцію, що дає можливість отримувати електричну енергію та здійснювати розігрів двигуна одним тепловим потоком Q . При цьому частина тепла Q_1 виноситься продуктами згорання в навколишнє середовище, а тепло Q_2 , у вигляді теплової Q_3 , та електричної W потужності, використовується для прогріву двигуна та живлення компонент нагрівника, а також, за необхідності, для підзарядки акумулятора під час передпускового підігріву.

Найвищими значеннями ККД характеризується система «термоелектричний генератор-передпусковий нагрівник» з сумісним джерелом тепла та система, в якій передпусковий нагрівник і ТЕГ об'єднані гідравлічним контуром. Очевидно, що система з сумісним джерелом тепла є дешевшою, що робить її використання більш ефективним. В той же час система з єдиним гідравлічним контуром може бути більш універсальною. У якості термоелектричного генератора для такого випадку може бути використано окремий термоелектричний передпусковий нагрівник нижчої теплової потужності, електричної вихідної потужності якого вистачить для живлення основного передпускового нагрівника. Такий нагрівник може бути встановлений окремо, у доступному місці бронетанкового транспортного засобу, що робить простішим його впровадження.

Висновки

1. Розглянуто особливості конструкції передпускових нагрівачів загального використання та передпускових нагрівачів підвищених потужностей. Обґрунтовано можливість використання термоелектричних генераторів для роботи такого обладнання. Визначено необхідні електричні потужності таких генераторів – до 500 Вт.
2. Розглянуто фізичні схеми передпускових нагрівників з термоелектричними джерелами електрики. Найраціональнішими для передпускового розігріву двигунів внутрішнього згорання є система "передпусковий нагрівник-термоелектричний генератор" з сумісним джерелом тепла та система, що об'єднує передпусковий нагрівник і термогенератор одним гідравлічним контуром.

Література

1. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и дополн. / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. - М.: Наука, 2001, 535 с.
2. Резник Л.Г., Ромалис Г.М., Чарков С.Т. Эффективность использования автомобилей в различных условиях эксплуатации. М.: Транспорт, 1989. – 128 с.
3. Матюхин Л.М. Теплотехнические устройства автомобилей: учеб. пособие / Л.М. Матюхин, – М.: МАДИ, 2009. – с.89.
4. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях. – В.С. Найман // Москва: АСТ, 2007. – с. 213.
5. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Режими роботи автомобілів при понижених температурах. Необхідність використання нагрівачів та раціональність застосування термо-генераторів для їх роботи // Термоелектрика. – 2014.- №3.- С. 20-31.
6. Пат. (UA) на винахід № 102303 МПК F01N 5/00 H01L 35/00. Термоелектричне джерело живлення для автомобіля / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 25.06.2013, бюл. №12, Заявка u2011 13957 від 28.11.2011.
7. Пат. (UA) №72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. №15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
8. Пат. (UA) №124999. МПК: F02N 19/10; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Максимук М.В. – Опубл. 25.04.2018, бюл. №8, Заявка u2017 11819 від 04.12.2017.
9. Pat. US6527548B1. Int.Cl. F24H 1/00. Self powered electric generating space heater / Aleksandr S. Kushch, Daniel Allen – Date of patent 4.03.2003, App.No 10/176,312, Filed 20.06.2002.
10. Pat. US2010/0115968A1. Int.Cl. F25B 21/02. Heating apparatus comprising a thermoelectric devise / Jorn Budde, Jeans Baade, Michael Stelter – Date of patent 13.05.2010, App.No 11/993,608, Filed 23.06.2006.
11. Пат. (RU) 2268393C1. МПК: F02N 17/04. Устройство для облегчения запуска двигателя внутреннего сгорания / Прилепо Ю.П. – Опубл. 20.01.2006, бюл. №02, Заявка 2005101942/06 от 27.01.2005.
12. Михайловський В.Я., Максимук М.В. Раціональні потужності термогенераторів для передпускових нагрівачів транспортних засобів // Термоелектрика. – №4.– 2015. – С.65-74.
13. Максимук М.В. Про оптимізацію термоелектричних модулів автомобільного передпускового нагрівника // Термоелектрика. – 2017. – №1. – С.57–67.
14. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором. Дизельний варіант // Термоелектрика. – 2017. – С.32-43.

15. Максимук М.В. Проектування автомобільного передпускового джерела тепла з термоелектричним генератором // Вісник НТУУ "КПІ". Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2017. – Вип. 54(2) – С.53-60.
16. Максимук М.В. Стендові дослідження термоелектричного передпускового джерела тепла для автомобілів // Термоелектрика. – 2018. – №1.
17. Webasto. Веб-сайт: <https://www.webasto.com>.
18. Жидкостный подогреватель DBW 160/230/300/350. Инструкция по монтажу.
19. Eberspächer. Веб-сайт: <https://www.eberspacher.com>.
20. Автономные отопительные приборы HYDRONIC L-II. Техническое описание, руководство по монтажу, эксплуатации и техобслуживанию.
21. ООО «Теплостар». Веб-сайт: <https://teplostar.inni.info>.
22. Подогреватель предпусковой дизельный 14ТС – 10 – М5. Руководство по эксплуатации АДВР.036.00.00.000 РЭ.
23. Подогреватель предпусковой дизельный 20ТС-Д38. Руководство по эксплуатации АДВР.038.00.00.000 РЭ.
24. Подогреватель автоматизированный жидкостный АПЖ – 30Д-24. Руководство по эксплуатации АДВР.056.00.00.000 РЭ.
25. АО "Шадринский автоагрегатный завод". Веб-сайт: <http://shaaz.biz>.
26. Подогреватели жидкостные дизельные ПЖД24Б. Руководство по эксплуатации ПЖД24Б - 1015006 - 30 РЭ.
27. Подогреватель жидкостный дизельный ПЖД30. Руководство по эксплуатации ПЖД30-1015006 РЭ.
28. Отопитель независимый жидкостный ОЖД30.8106010. Руководство по эксплуатации ОЖД30.8106010 РЭ.
29. Подогреватель жидкостный типа ПЖД600, ПЖД44Ш. Руководство по эксплуатации ПЖД600-1015008 РЭ.
30. PROHEAT. Веб-сайт: <http://www.proheat.com>.
31. Руководство по материальной части и эксплуатации танка Т-54. – Военное издательство Министерства обороны СССР. – Москва. – 1969.
32. М.В. Павлов. Отечественные бронированные машины 1945–1965 гг. (XVII) // «Техника и вооружение. Вчера, сегодня, завтра...», №11, 2009 г.

Надійшла до редакції 05.06.2019

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

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

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Черновці, 58029, Україна, *e-mail: anatyuch@gmail.com*;

²Черновицький національний університет ім. Ю.Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПУСКОВЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Проанализированы основные причины осложненного запуска транспортных средств при пониженных температурах окружающей среды. Определены преимущества и недостатки в применении предпускового подогрева для улучшения запуска двигателя автомобилей. Приведены принцип работы и особенности конструкции предпусковых нагревателей общего пользования и предпусковых нагревателей для бронетехники. Обоснована рациональность использования термоэлектрических генераторов для работы такого оборудования. Приведены результаты исследования термодинамических особенностей систем предпускового разогрева двигателя внутреннего сгорания, в которых источниками электроэнергии являются термоэлектрические генераторы. Рассмотрены физические схемы систем «предпусковой нагреватель - термогенератор» и проведена оценка их энергетических характеристик. Определены наиболее эффективные варианты применения термоэлектрических источников электричества для предпусковой подготовки двигателей транспортных средств к эксплуатации. Библиография: 32, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: предпусковой нагреватель, термоэлектрический генератор, физическая модель, эффективность.

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

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

ON THE POSSIBILITY OF USING THERMOELECTRIC GENERATORS FOR HIGH-POWER TRANSPORT STARTING PRE-HEATERS

The main reasons for the complicated start-up of vehicles at low ambient temperatures are analyzed. The advantages and disadvantages of using pre-heating to improve engine start-up are identified. The principle of operation and design features of general-purpose pre-heaters and pre-heaters for armored vehicles are given. The rationality of using thermoelectric generators for the operation of such equipment is substantiated. The results of studies on the thermodynamic features of preheating systems for an internal combustion engine, in which the sources of electricity are thermoelectric generators, are presented. The physical schemes of the “pre-heater-thermogenerator” systems are considered and their energy characteristics are evaluated. The most effective applications of thermoelectric sources of electricity for engine start training for operation are determined. Bibliography: 32, Fig. 3, table 1.

Key words: starting pre-heater, thermoelectric generator, physical model, efficiency.

References

1. Kuznetsov E.S., Boldin A.P., Vlasov V.M., et al. (2001). *Tekhnicheskaiia ekspluatatsiia avtomobilei. Uchebnik dlia vuzov. 4 izdaniie, pererabotannoie i dopolnennoie [Technical operation of cars. College textbook. 4th ed., revised and enlarged]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Reznik L.G., Romalis G.M., Charkov S.T. (1989). *Effektivnost ispolzovaniia avtomobilei v razlichnykh usloviakh ekspluatatsii [Efficiency of using cars in various operating conditions]*. Moscow: Transport [in Russian].
3. Matiukhin L.M. (2009). *Teplotekhnicheskiiie ustroistva avtomobilei: uchebnoie posobiie [Thermotechnical devices of cars: Manual]*. Moscow: MADI [in Russian].
4. Naiman V.S. (2007). Vse o predpuskovykh obogrevateliakh i opotiteliakh [All about starting pre-heaters]. Moscow: ACT [in Russian].
5. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Automobile operating conditions at low temperatures. The necessity of applying heaters and the rationality of using thermal generators for their work]. *J. of Thermoelectricity*, 3, 20–31.
6. *Patent of Ukraine № 102303* (2013). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Thermoelectric power supply for automobile [in Ukrainian].
7. *Patent of Ukraine №72304* (2012). Anatyshuk L.I., Mykhailovsky V.Ya. Automobile heater with a thermoelectric power supply [in Ukrainian].
8. *Patent of Ukraine №124999* (2018). Maksimuk M.V. Automobile heater with a thermoelectric power supply [in Ukrainian].
9. *Pat. US6527548B1* (2003). Kushch Aleksandr S., Allen Daniel. Self-powered electric generating space heater.
10. *Pat. US2010/0115968A1*. Budde John, Baade Jeans, Stelter Michael. Heating apparatus comprising a thermoelectric device.
11. *Patent (RU) 2268393C1* (2006). Prilepo Yu.P. Device for facilitating internal combustion engine start [in Russian].
12. Mykhailovsky V.Ya., Maksimuk M.V. (2015). Rational powers of thermal generators for starting pre-heaters of vehicles. *J. Thermoelectricity*, 4, 65-74.
13. Maksimuk M.V. (2017). On the optimization of thermoelectric modules of automobile starting pre-heater. *J. Thermoelectricity*, 1, 57–67.
14. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting pre-heater with a thermoelectric generator. Diesel version. *J. Thermoelectricity*, 2, 32-43.
15. Maksimuk M.V. (2017). Design of automobile starting pre-heater with a thermoelectric generator. *Visnyk NTUU KPI. Series INSTRUMENTATION*, 54(2), 53-60.
16. Maksimuk M.V. (2018). Bench tests of thermoelectric starting pre-heater for cars. *J. Thermoelectricity*, 1
17. Webasto.WEB-site: <https://www.webasto.com>.
18. Liquid heater DBW 160/230/300/350. Assembly instruction.
19. Eberspächer. WEB-site: <https://www.eberspacher.com>.
20. Autonomous heating devices HYDRONIC L-II. Technical description, assembly, operation and maintenance instruction.
21. “TEPLOSTAR” Ltd. WEB-site: <https://teplostar.inni.info>.
22. Diesel starting pre-heater 14TC – 10 – M5. Operation instruction АДВР.036.00.00.000 РЭ.
23. Diesel starting pre-heater 20TC-Д38. Operation instruction АДВР.038.00.00.000 РЭ.
24. Automated liquid pre-heater АПЖ – 30Д-24. Operation instruction АДВР.056.00.00.000 РЭ.
25. JSC “Shandrinsk Automotive Components Factory”. WEB-site: <http://shaaz.biz>.

26. Diesel pre-heaters ПЖД24Б. Operation instruction ПЖД24Б - 1015006 - 30 РЭ.
27. Diesel liquid pre-heater ПЖД30. Operation instruction ПЖД30-1015006 РЭ.
28. Autonomous liquid heater ОЖД30.8106010. Operation instruction ОЖД30.8106010 РЭ.
29. Liquid pre-heater of the type ПЖД600, ПЖД44Ш. Operation instruction ПЖД600-1015008 РЭ.
30. PROHEAT. WEB-site: <http://www.proheat.com>.
31. Rukovodstvo po materialnoi chasti i ekspluatatsii tanka T-54 [Guidance on the material part and operation of tank T-54]. Moscow: Military Publ. of the USSR Defense Ministry, 1969 (in Russian).
32. Pavlov M.V. (2009). *Otechestvennyie bronirovannyie mashiny 1945-1965 (XVII) [Home armoured machines 1945–1965 (XVII)]. Tekhnika i vooruzheniie. Vchera, segodnia, zavtra... - Equipment and Weapons. Yesterday, today, tomorrow... ” 11, 2009[in Russian].*

Submitted 05.06.019

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 англійськомовних 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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

Статті в журналах

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

Книги

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

Патенти

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

Матеріали конференцій

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

Автореферати дисертацій

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

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

Статті в журналах

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

Книги

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

Патенти

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

Матеріали конференцій

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