

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Струсовський К.І.²



Лисько В.В.

¹Інститут термоелектрики НАН та 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



Струсовський К.І.

ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ОПОРУ КОНТАКТНОЇ СТРУКТУРИ “МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ” ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНОГО АБСОЛЮТНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі розглянуто можливість вимірювання теплового опору контактної структури «метал – термоелектричний матеріал» за допомогою комплексного абсолютного методу визначення термоелектричних властивостей матеріалів. Наведено опис методики проведення вимірювань та результати досліджень можливих величин похибок вимірювань, отримані шляхом побудови максимально наближеної до реальних умов фізичної моделі та комп'ютерного моделювання. вплив Визначено вплив випромінювання, втрат тепла по провідниках та інших факторів на точність вимірювань. Встановлено умови мінімізації похибок вимірювань. Бібл. 32, рис. 10, табл. 1.

Ключові слова: тепловий контактний опір, вимірювання, комп'ютерне моделювання, точність, термоелектричні перетворювачі енергії.

Вступ

Однією з задач сучасної термоелектрики є мініатюризація термоелектричних перетворювачів енергії, що дозволить значно знизити вартість та розширити можливості їх практичних використань. Основною перешкодою для цього є відносно великі значення контактних опорів, оскільки, як відомо, вплив контактного опору на ефективність термоелектричного перетворювача енергії зростає в міру його мініатюризації [1–14].

Тому розробка методів та обладнання для дослідження контактних структур у термоелектричних перетворювачах енергії, створення технології їх виготовлення та її оптимізації є важливою та актуальною задачею.

При цьому, як показує аналіз літератури [15, 16], точність та надійність методів вимірювання контактного теплового опору, як і методів вимірювання електричного контактного опору, вимагає істотного покращення для реалізації на практиці можливостей зниження контактних опорів, передбачених теоретичними дослідженнями..

Існує ряд методів вимірювання теплового контактного опору. Ці методи ґрунтуються на вимірюванні стаціонарного теплового потоку, що проходить через зразок в певному напрямку. Основи методу викладені в міжнародному стандарті ASTM D5470-06 [17]. Так, у роботі [18] описується стандартний метод, який ґрунтується на використанні в якості вимірювача теплового

потоків еталонного зразка із заздалегідь відомою теплопровідністю.

Для визначення теплового контактної опору може бути використаний дещо модифікований комплексний абсолютний метод визначення термоелектричних властивостей матеріалів та відповідна вимірювальна апаратура, розроблена в Інституті термоелектрики (Україна) [19-28]. Для використання такого методу не потрібні еталонні зразки, оскільки тепловий потік через досліджувану структуру визначається електричною потужністю джерела тепла, а всі можливі теплові втрати мінімізуються.

Метою цієї роботи був аналіз можливостей вимірювання теплового опору контактної структури «метал – термоелектричний матеріал» за допомогою комплексного абсолютного методу та дослідження впливу відхилень від ідеальної фізичної моделі такого методу на точність вимірювань.

1. Фізична модель та основні джерела похибок вимірювань

Найпростіша модель комплексного абсолютного методу, взятого за основу при розробці методики визначення теплового контактної опору контактної структури «метал – термоелектричний матеріал», наведена на рис. 1. Вона містить зразок термоелектричного матеріалу 1 з нанесеними на його торцеві поверхні металевими антидифузійними покриттями 2, металеві пластини 3, керамічні контактні пластини 4, перехідні контактні шари 5, термостат 6, еталонне джерело тепла – електричний нагрівник 7, а також термодари $T_1 - T_4$ для вимірювання температур нагрівника, термостату та градієнту температур у зразку. Зображена на рисунку контактна структура є аналогічною тій, що зазвичай використовується у термоелектричних перетворювачах енергії (металеві антидифузійні покриття, металеві комутаційні пластини та керамічна основа).

У наведеній моделі не враховується теплообмін з навколишнім середовищем, а також перенос тепла термодарами та провідниками нагрівника.

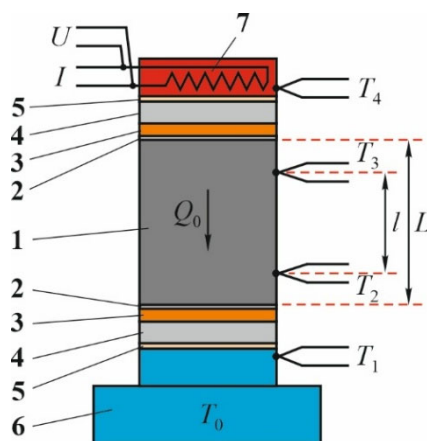


Рис. 1. Найпростіша фізична модель процесу вимірювання теплового контактної опору комплексним абсолютним методом: 1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – металеві антидифузійні покриття; 3 – металеві контактні пластини; 4 – керамічні контактні пластини; 5 – перехідні контактні шари; 6 – термостат; 7 – електричний нагрівник.

Для такої моделі величина теплопровідності к зразка термоелектричного матеріалу визначається за формулою

$$\kappa = \frac{W}{T_3 - T_2} \frac{l}{S}, \quad (1)$$

де: $W = I \cdot U$ – тепловий потік через зразок, що приймається рівним електричній потужності нагрівника; T_2 і T_3 – температури на бічній поверхні зразка у точках, що знаходяться на відстані l одна від одної; S – площа поперечного перерізу зразка.

Для визначення теплового опору R_T досліджуваної контактної структури додатково вимірюються температура нагрівника T_4 , температура термостату T_1 та загальна довжина зразка L . Припустивши, що тепловий опір контактних структур на обох торцях зразка є однаковим, його величину можна визначити за формулою

$$R_T = \Delta T_{cont.} \frac{S}{W} = \frac{1}{2} [(T_4 - T_1) - \Delta T_L] \frac{S}{W}, \quad (2)$$

де $\Delta T_{cont.}$ – спад температури на досліджуваній контактній структурі; ΔT_L – загальний перепад температури на зразку термоелектричного матеріалу (рис. 2).

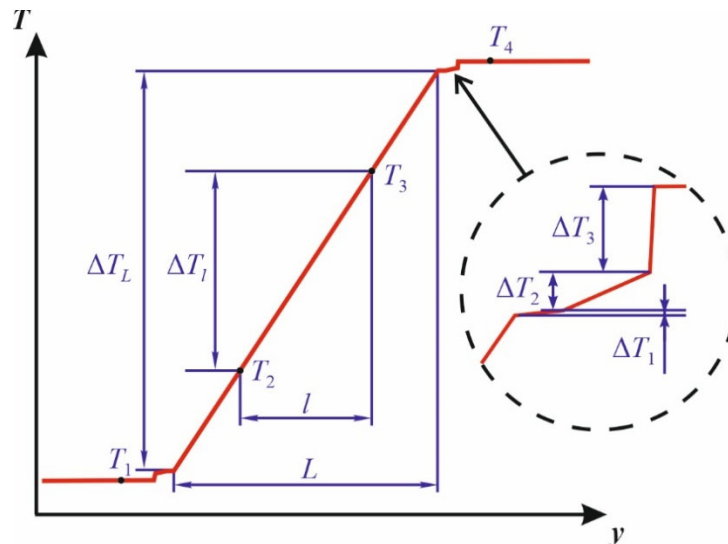


Рис. 2. Розподіл температури вздовж осі досліджуваної контактної структури:
 ΔT_1 – перепад температури на зразку термоелектричного матеріалу у точках, що знаходяться на відстані l одна від одної; ΔT_L – загальний перепад температури на зразку;
 L – довжина зразка; ΔT_1 – перепад температури на металевій пластині;
 ΔT_2 – перепад температури на керамічній пластині; ΔT_3 – перепад температури на перехідному контактному шарі між керамічною пластиною і нагрівником.

Оскільки

$$\Delta T_L = \frac{W}{\kappa} \frac{L}{S}, \quad (3)$$

а всі величини, що необхідні для розрахунку теплопровідності зразка κ визначаються одночасно з величинами для розрахунку теплового опору контактної структури, формулу (2) можна переписати у вигляді

$$R_T = \frac{1}{2} \left[(T_4 - T_1) - \frac{L}{l} (T_3 - T_2) \right] \frac{S}{W}. \quad (4)$$

Хоча модель, наведена на рис. 1, є далекою від реальних умов вимірювань, її перевагою є можливість визначити шукані величини з простих математичних виразів, які ґрунтуються на законі Фур'є. В цьому випадку знаходження значень шуканих величин досягається або шляхом врахування усіх похибок, або за рахунок вжиття спеціальних заходів для мінімізації їх впливу на результати вимірювань.

Для знаходження можливих похибок визначення теплового опору важливо знати інструментальні похибки всіх засобів вимірювань та методичні похибки, які необхідно мінімізувати до прийнятних величин.

Інструментальні похибки виникають при вимірюванні величин поперечного перерізу зразка S , його довжини L , відстані між термопарами l , струму I та напруги U нагрівника, ЕРС термопар $T_1 - T_4$. При цьому сумарна величина інструментальних похибок при використанні сучасного вимірювального обладнання зазвичай менша від 0.2 % (табл. 1).

Таблиця 1

Інструментальні похибки при вимірюваннях теплового контактного опору абсолютним методом

Вимірювані величини	Роздільна здатність засобів вимірювання	Типові похибки при вимірюваннях
S, l, L	10^{-3} мм	± 0.01 %
I	10^{-6} А	± 0.001 %
U	10^{-7} В	± 0.001 %
T_1, T_2, T_3, T_4	10^{-7} В	± 0.1 %
		$\Sigma < 0.2$ %

Методичні похибки є наслідком відхилень від найпростішої фізичної моделі, насамперед від умов адіабатичності та одновимірності протікання тепла через досліджувану контактну структуру.

Перевагою абсолютного методу є можливість їх мінімізації. Для знаходження шляхів мінімізації слід розглянути більш реальну фізичну модель, в якій враховано причини виникнення найбільш істотних похибок (рис. 3).

Зокрема, для зниження переносу тепла випромінюванням зразок та еталонний нагрівник оточуються градієнтним радіаційним екраном з нагрівником, потужність якого вибирається такою, щоб розподіли температур вздовж зразка та екрану були однаковими. Крім того, всі провідники термопар та еталонного нагрівника виводяться назовні через так звані теплові ключі, які являють собою вузли з електроізоляторів з якомога більшою теплопровідністю, наприклад, з окису берилію. Вони виконані у вигляді трубок, кілець або пластинок. Через отвори в них пропускаються провідники, які приводяться у тепловий контакт з електроізолятором. Останній, в свою чергу, знаходиться у тепловому контакті з градієнтним радіаційним екраном. В цьому випадку різниця температур вздовж провідників наближується до нуля, тепловий потік через них мінімізується і, отже, мінімізується величина похибок. Аналогічний тепловий ключ використовується і у притискному механізмі для фіксації зразка.

Такий підхід дозволяє зберегти при знаходженні шуканої величини теплового опору R_T найпростіший вираз (4).

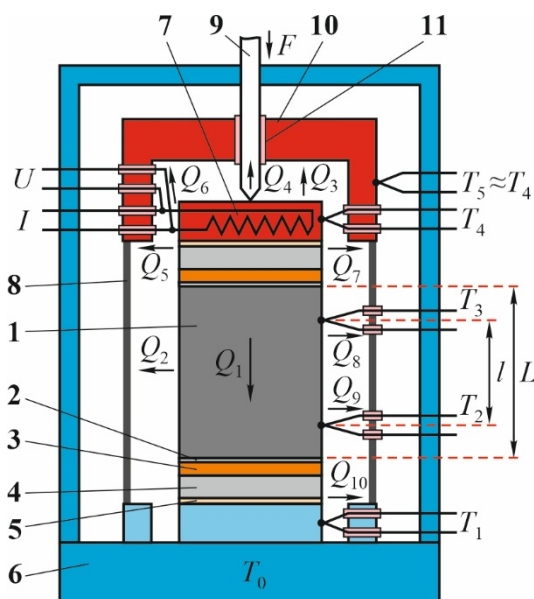


Рис. 3. Реальна фізична модель процесу вимірювання теплового контактного опору комплексним абсолютним методом: 1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – металеві антидифузійні покриття; 3 – металеві контактні пластини; 4 – керамічні контактні пластини; 5 – перехідні контактні шари; 6 – термостат; 7 – електричний нагрівник;

8 – екран; 9 – притискний механізм; 10 – нагрівник екрану; 11 – теплові ключі.

На рис. 3: Q_1 – тепло, яке перетікає від зразка до термостату; Q_2 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні зразка; Q_3 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні нагрівника; Q_4 – втрати тепла через притискний механізм; Q_5 – втрати тепла шляхом випромінювання з поверхні контактних структур; Q_6 – втрати тепла через струмові та потенціальні провідники нагрівника; Q_7 – Q_{10} – втрати тепла через провідники термопар; T_0 – температура термостата.

Рівняння теплопровідності для знаходження розподілів температури у зразку та інших елементах фізичної моделі має вигляд

$$\nabla(-\kappa_i \cdot \nabla T) = Q_i, \quad (5)$$

де κ_i – теплопровідності елементів фізичної моделі.

Граничні умови, які визначають теплообмін випромінюванням між елементами конструкції вимірювальної комірки можна записати у вигляді:

– бічної поверхні зразка

$$q = \varepsilon_1(G_1 - \sigma T^4), \quad (6)$$

– бічної поверхні еталонного нагрівника

$$q = \varepsilon_2(G_2 - \sigma T^4), \quad (7)$$

– верхньої поверхні еталонного нагрівника

$$q = \varepsilon_2(G_3 - \sigma T^4), \quad (8)$$

– внутрішньої поверхні градієнтного радіаційного екрану

$$q = \varepsilon_3(G_4 - \sigma T^4), \quad (9)$$

– внутрішніх поверхонь нагрівника градієнтного радіаційного екрану

$$q = \varepsilon_4(G_5 - \sigma T^4), \quad (10)$$

– зовнішніх поверхонь нагрівника градієнтного радіаційного екрану

$$q = \varepsilon_4(G_6 - \sigma T^4), \quad (11)$$

– зовнішньої поверхні градієнтного радіаційного екрану

$$q = \varepsilon_3(G_7 - \sigma T^4), \quad (12)$$

– поверхні термостату у проміжку між зразком і градієнтним радіаційного екрану

$$q = \varepsilon_5(G_8 - \sigma T^4), \quad (13)$$

– внутрішніх поверхонь термостату

$$q = \varepsilon_5(G_9 - \sigma T^4). \quad (14)$$

Зовнішні поверхні термостату підтримуються при температурі T_0

$$T = T_0. \quad (15)$$

У формулах (6) - (14): $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ – коефіцієнти випромінювання зразка, еталонного нагрівника, екрану, нагрівника екрану та термостату відповідно; σ – стала Стефана-Больцмана; G – тепловий потік, утворений опроміненням кожної поверхні.

$$G = G_m + F_{amb}\sigma T_{amb}^4. \quad (16)$$

де G_m – величина випромінювання від інших елементів вимірювальної комірки і зразка; F_{amb} – фактор поля зору, що дорівнює тій його частині, яка не потрапляє під дію інших поверхонь; T_{amb} – температури у далеко розташованих точках в напрямках, включених у F_{amb} .

2. Комп'ютерна модель

Розв'язання задачі у вигляді (5) з граничними умовами (6) - (16) виконано за допомогою пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics [29], що використовує для розрахунків метод скінчених елементів [30, 31].

Коефіцієнт G_m , залежний від взаємного розташування поверхонь, розраховується шляхом введення у комп'ютерну модель додаткової змінної J , яка задається рівнянням

$$J = (1 - \varepsilon)\{G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4\} + \varepsilon\sigma T^4. \quad (17)$$

що розв'язується спільно з рівнянням теплопровідності.

Типовий вигляд сітки методу скінчених елементів при моделюванні абсолютного методу наведено та розподіл температури у зразку і елементах конструкції вимірювальної комірки показано на рис. 4.

Отримані комп'ютерним моделюванням розв'язки не мають такої універсальності, яку б мали аналітичні, та все ж дають можливість розв'язувати конкретні оптимізаційні задачі для вимірювальних установок, призначених для дослідження зразків заданої геометричної форми та розмірів у заданому інтервалі температур.

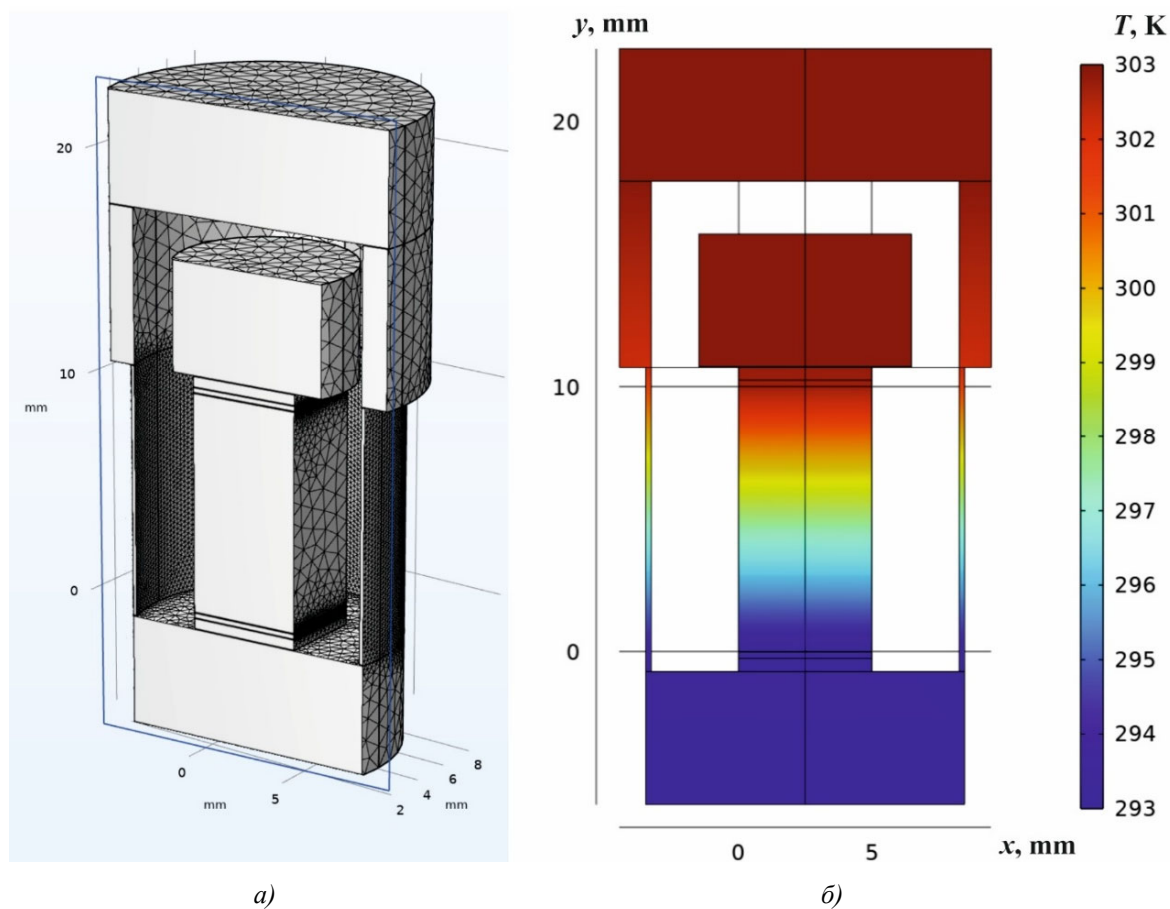


Рис. 4. Комп'ютерна модель процесу вимірювання теплового контактного опору комплексним абсолютним методом: а – зображення сітки методу скінчених елементів у COMSOL Multiphysics; б – типовий розподіл температури у досліджуваній контактній структурі та елементах конструкції вимірювальної комірки.

3. Результати комп'ютерних досліджень основних джерел похибок вимірювань

3.1. Похибки визначення теплового потоку через досліджувану структуру

За допомогою комп'ютерного моделювання було досліджено залежності похибок вимірювання від коефіцієнтів випромінювання зразка, градієнтного радіаційного екрану, нагрівників зразка та екрану, термостату; температури термостату та інших параметрів. Результати досліджень наведено нижче. Розрахунки проведено для типових розмірів зразка, що використовується для вимірювань σ , α , κ та Z комплексним абсолютним методом – довжина 10 мм, площа поперечного перерізу $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Діаметр еталонного нагрівника – 8 мм, внутрішній діаметр екрану – 12 мм; теплопровідність зразка – $2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, еталонного нагрівника, нагрівника екрану та термостату – $400 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, екрану – $15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; температура термостату – від -50 до 300°C . За необхідності комп'ютерне моделювання дає можливість відтворити ці результати для інших інтервалів температур та розмірів зразків.

Основні з отриманих залежностей похибок визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру від різних факторів наведено на рис. 5–7. Так, на рис. 5 показано залежність δW від випромінювальної здатності зразка та елементів конструкції вимірювальної комірки при температурі термостату 100°C . Як видно з рисунка, для досягнення

мінімальних похибок коефіцієнти випромінювання поверхні градієнтного радіаційного екрану та нагрівника екрану повинні бути великими, а зразка, еталонного нагрівника і термостату – малими. Збільшення коефіцієнта поглинання екрану досягається шляхом зачорнення або шляхом застосування кілець для додаткового перевипромінювання і наближення до коефіцієнта поглинання абсолютно чорних тіл. Бічні поверхні зразка і еталонного нагрівника, так само, як і поверхню термостату у зазорі між зразком та екраном, слід полірувати або наносити на них тонкий шар блискучого електроізоляційного матеріалу з малим коефіцієнтом випромінювання.

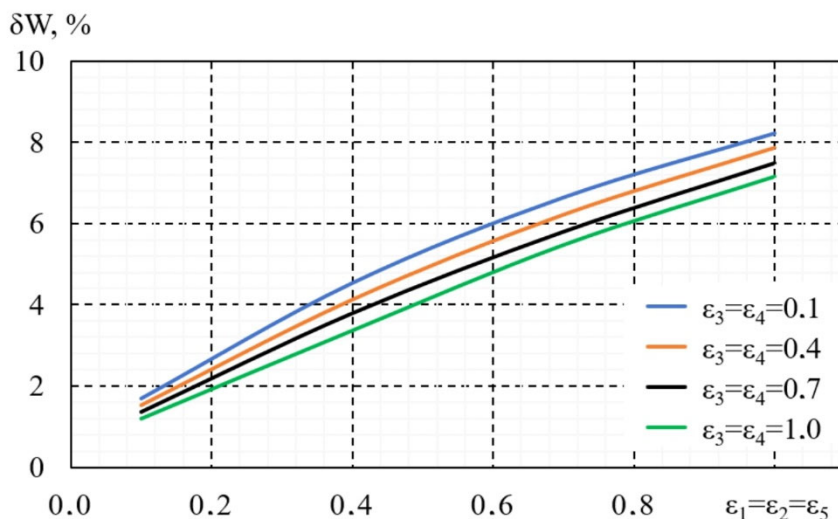


Рис. 5. Залежність похибки визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру від випромінювальної здатності зразка та елементів конструкції вимірювальної комірки ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5$ – коефіцієнти випромінювання зразка, еталонного нагрівника, екрану, нагрівника екрану та термостату відповідно).

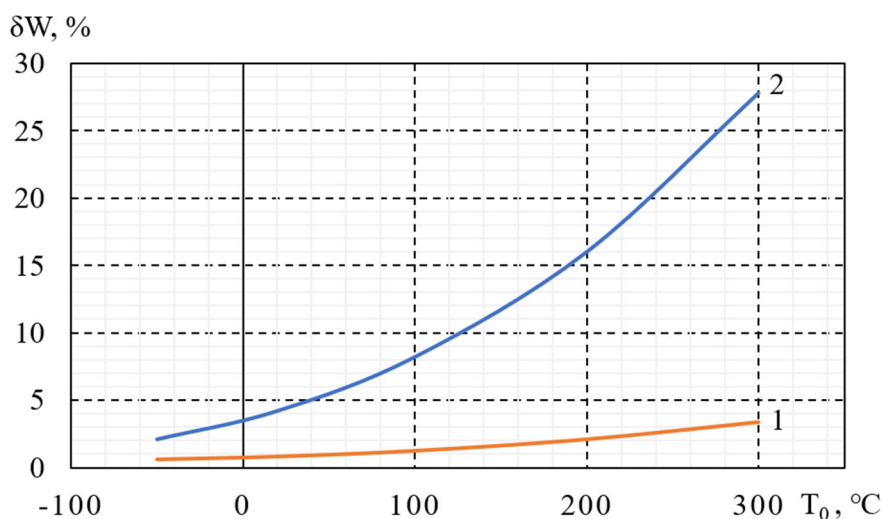


Рис. 6. Залежність похибки визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру від температури: 1 – $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 0.1, \epsilon_3 = \epsilon_4 = 1.0$; 2 – $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 1.0, \epsilon_3 = \epsilon_4 = 0.1$.

Залежність похибки визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру від температури термостату наведено на рис. 6. Показано два випадки:

1) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 0.1$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 1.0$ – найбільш сприятливий, коли коефіцієнти випромінювання поверхні зразка, еталонного нагрівника і термостату є малими, а градієнтного радіаційного екрану та нагрівника екрану – великими;

2) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 1.0$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 0.1$ – найбільш несприятливий, коли коефіцієнти випромінювання поверхні зразка, еталонного нагрівника і термостату є великими, а градієнтного радіаційного екрану та нагрівника екрану – малими.

З рис. 6 видно, що при температурі $T_0 = -50$ °С похибки визначення теплового потоку через досліджувану структуру не перевищують 3.5 % і зростають при підвищенні температури до 28 % при $T_0 = 300$ °С. Однак, вибором оптимальних значень випромінювальної здатності елементів фізичної моделі вони можуть бути зменшені до рівня 0.7–3.4 %.

На рис. 7 наведено залежності похибки визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру, викликані втратами тепла шляхом випромінювання, від перепаду температур на зразку (при $T_0 = 20$ °С; $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 1.0$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 0.1$). Як і слід було очікувати, зі збільшенням перепаду температури похибки зростають.

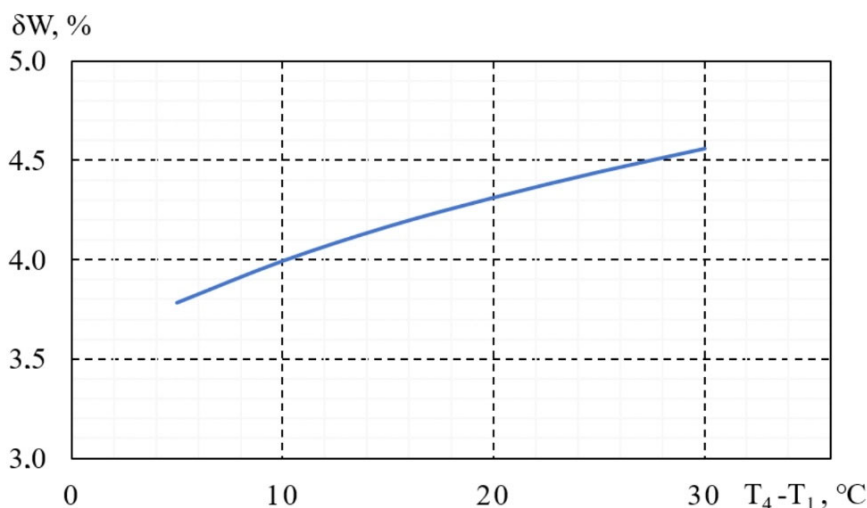


Рис. 7. Залежність похибки визначення теплового потоку через досліджувану контактну структуру від різниці температур між нагрівником і термостатом ($T_0 = 20$ °С; $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_5 = 1.0$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 0.1$).

Комп'ютерним моделюванням також встановлено, що втрати тепла через провідники термопар, струмові і потенціальні провідники нагрівника, а також через притискний механізм в сумі можуть сягати ~ 3 % (за температури 300 °С), однак застосування теплових ключів дозволяє зменшити ці втрати до рівня ~ 0.5 %.

3.2. Похибки визначення перепаду температури на контактах

На рис. 8 наведено залежність спаду температур на тепловому опорі досліджуваної контактної структури від різниці температур між нагрівником і термостатом. Залежність отримано для типової для термоелектричних перетворювачів енергії контактної структури, що складається з нікелевого антидифузійного покриття товщиною 10 мкм, мідної комутаційної пластини товщиною 0.25 мм, керамічної пластини товщиною 0.5 мм. Тепловий опір перехідного

контактного шару між керамічною пластиною і нагрівником $8 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$, температура термостату $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

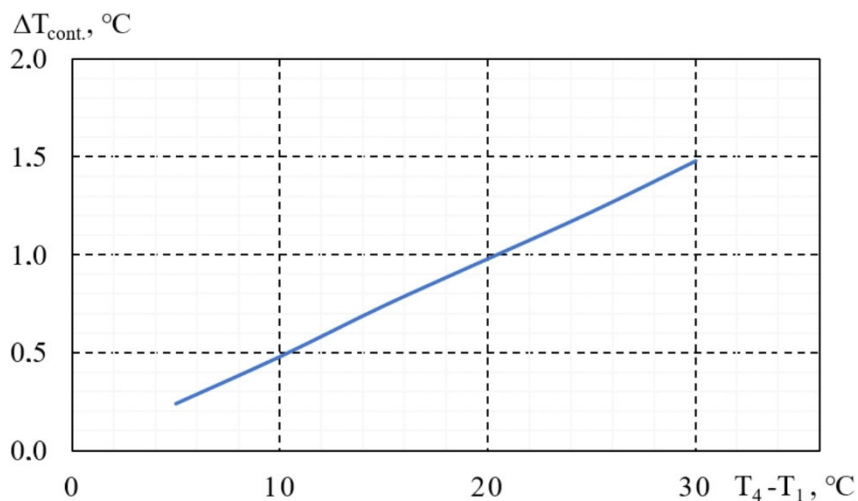


Рис. 8. Залежність спаду температур на тепловому опорі досліджуваної контактної структури від різниці температур між нагрівником і термостатом ($T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Для підвищення точності вимірювань є бажаним, щоб спад температур на тепловому опорі був якомога більшим. Однак, це призводить до підвищення втрат тепла шляхом випромінювання, як це було показано вище.

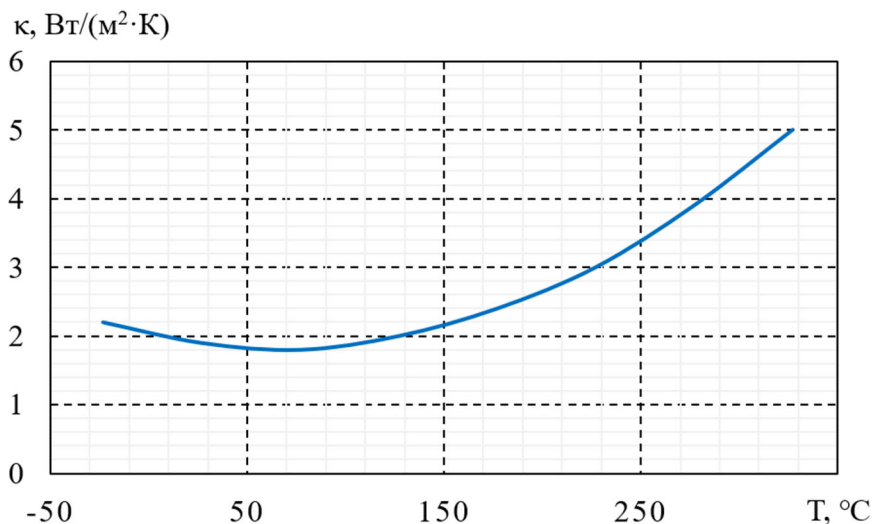


Рис. 9. Температурна залежність теплопровідності зразка термоелектричного матеріалу $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.25}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.72}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{0.03}$, легованого свинцем, для генераторних термоелектричних перетворювачів енергії (електропровідність при кімнатній температурі $- 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) [32].

Крім того, у такому випадку зростатиме і вплив температурної залежності теплопровідності зразка термоелектричного матеріалу, яка у певних діапазонах температур є досить суттєвою (рис. 9).

Врахування температурної залежності теплопровідності зразка термоелектричного матеріалу у комп'ютерній моделі дозволило оцінити її вплив на точність визначення спаду

температур на тепловому опорі досліджуваної контактної структури при зростанні різниці температур між нагрівником і термостатом (рис. 10).

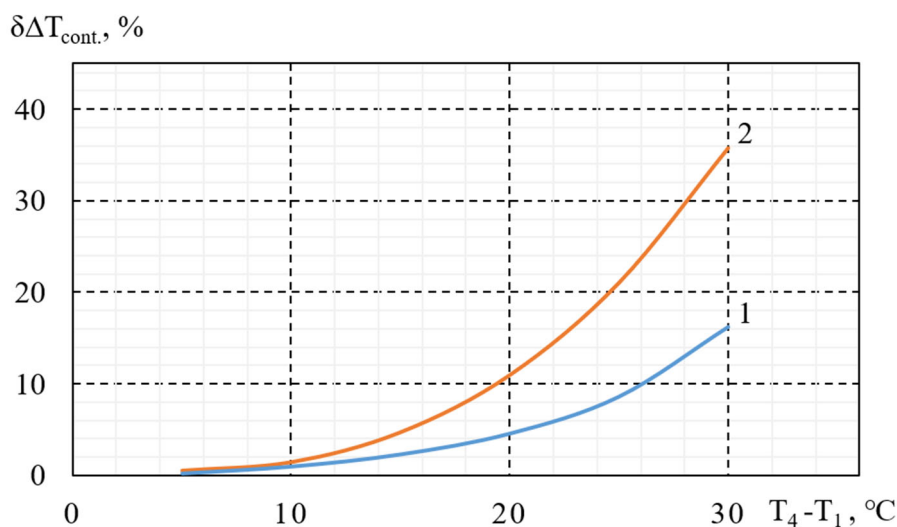


Рис. 10. Залежність похибки визначення спаду температур на тепловому опорі досліджуваної контактної структури від різниці температур між нагрівником і термостатом: 1 – $T_0 = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_0 = 300^\circ\text{C}$.

Як видно з рис. 10, похибка визначення спаду температур на тепловому опорі стрімко зростає при збільшенні різниці температур між нагрівником і термостатом. Оптимальним з точки зору достатньої розрізної здатності та мінімальних похибок вимірювань є перепад температур 10–15 $^\circ\text{C}$.

В цілому, отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують можливість вимірювання теплового опору контактної структури «метал – термоелектричний матеріал» за допомогою комплексного абсолютного методу та є основою для модифікації конструкції вимірювального обладнання «АЛТЕК-10001», розробленого в Інституті термоелектрики, для реалізації наведеної методики вимірювань.

Висновки

1. Підтверджено можливість вимірювання теплового опору контактної структури «метал – термоелектричний матеріал» за допомогою комплексного абсолютного методу визначення термоелектричних властивостей матеріалів.
2. Побудовано детальну фізичну модель процесу вимірювання теплового контактного опору комплексним абсолютним методом та розроблено комп'ютерну модель на її основі для дослідження впливу різних факторів на точність вимірювань.
3. За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено залежності похибок вимірювання від коефіцієнтів випромінювання зразка, градієнтного радіаційного екрану, нагрівників зразка та екрану, термостату; температури термостату та інших параметрів. Встановлено, що для досягнення мінімальних похибок коефіцієнти випромінювання поверхні градієнтного радіаційного екрану та нагрівника екрану повинні бути великими, а зразка, еталонного нагрівника і термостату – малими.
4. Визначено, що при температурі $T_0 = -50^\circ\text{C}$ похибки визначення теплового потоку через досліджувану структуру не перевищують 3.5 % і зростають при підвищенні температури до

28 % при $T_0 = 300$ °С. При цьому, вибором оптимальних значень випромінювальної здатності елементів фізичної моделі вони можуть бути зменшені до рівня 0.7–3.4 %.

5. Встановлено, що втрати тепла через провідники термопар, струмові і потенціальні провідники нагрівника, а також через притискний механізм в сумі можуть сягати ~ 3 % (за температури 300 °С), однак застосування теплових ключів дозволяє зменшити ці втрати до рівня ~ 0.5 %.
6. Проаналізовано вплив перепаду температур на зразку на точність визначення спаду температур на тепловому опорі досліджуваної контактної структури. Встановлено, що оптимальним з точки зору достатньої розрізної здатності та мінімальних похибок вимірювань є перепад температур між нагрівником і термостатом у 10–15 °С.

Література

1. Tritt T., 2000. *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press, ISBN 978-0127521794.
2. Rowe D.M., 2006. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Rowe D.M. (Ed.), 2012. *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics* (1st ed.). CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/b11892>.
4. Kania T., Schilder B., Kissel T., et al., 2013. Development of a Miniaturized Energy Converter Without Moving Parts. *Flow Turbulence Combust*, 90, 741–761. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>.
5. Yuan C., Hohlfeld D., Bechtold T., 2021. Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*, 119, 114075. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>.
6. Vondrak J., Schmidt M., Proto A., Penhaker M., Jargus J., Peter L., 2019. Using Miniature Thermoelectric Generators for Wearable Energy Harvesting. *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split, Croatia, 1–6. Available at: <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8782997>.
7. Dalkiranis G.G., Bocchi J.H.C., Oliveira Jr. O.N., Faria G.C., 2023. Thermoelectric materials and their applications in energy harvesting. *ACS Omega*, 8(10), 9364–9370. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07916>.
8. Li J., Ma B., Wang R., Han L., 2011. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectron. Reliab.*, 51, 2210–2215.
9. Shen L., Chen H., Xiao F., Yang Y., Wang S., 2014. The step-change cooling performance of miniature thermoelectric module for pulse laser. *Energy Convers. Manag.*, 80, 9–45.
10. Zhang W., Shen L., Yang Y., Chen H., (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. *Appl. Therm. Eng.*, 90, 664–673.
11. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., Pedzinska M., (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *Acta Phys. Pol. A*, 116, 52–55.
12. Vikhor L.M., Anatychuk L.I., Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *J. Appl. Phys.*, 126, 164503-1–164503-8.
13. Anatychuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material–metal boundary. *J. Thermoelectrics*, 4, 74–88.
14. Vikhor L., Kotsur M. (2023). Evaluation of Efficiency for Miniscale Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts. *Energies*, 16, 4082-1–22.

- Available at: <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
15. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *J. Thermoelectrics*, 2, 5–24.
 16. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *J. Thermoelectrics*, 3-4, 5–17.
 17. ASTM, 2009. Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
 18. McWaid T., Marshall E., 1992. Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35(11), 2911–2920.
 19. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute Method for Measuring Thermoelectric Properties of Materials. *Mater. Today: Proc.*, 2(2), 737–743. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
 20. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On Improvement of the Accuracy and Speed in the Process of Measuring Characteristics of Thermoelectric Materials. *J. Electron. Mater.*, 43(10), 3863–3869. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.
 21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectrics*, 1, 65–73.
 22. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. *AIP Conf. Proc.*, 1449, 373–376. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4731574>.
 23. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.*, 41(6), 1680–1685. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
 24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *J. Thermoelectrics*, 2, 71–78.
 25. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectrics*, 3, 71–82.
 26. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lys'ko V.V., Puhantseva O.V., Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *J. Thermoelectrics*, 5, 65–72.
 27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *J. Thermoelectrics*, 2, 90–100.
 28. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *J. Thermoelectrics*, 3, 80–88.
 29. COMSOL, 2021. *COMSOL Multiphysics, v. 6.0*. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. Available at: www.comsol.com.
 30. Huebner K.H., Dewhurst D.L., Smith D.E., Byrom T.G. (2001). *The Finite Element Method for Engineers*, 4th Edition. Wiley-Interscience, 744 p. ISBN 978-0-471-37078-9.
 31. Reddy J.N., 2005. *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd Edition. McGraw-Hill Mechanical Engineering, 784 p.
 32. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M. (2012). *Thermoelectricity: Vol. 4. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine, 172 p. ISBN 978-966-399-411-6.

Надійшла до редакції: 21.02.2024.

V.V. Lysko, *Cand. Sc (Phys & Math)*^{1,2}
K.I. Strusovskyi²

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 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

**MEASURING THE THERMAL RESISTANCE
OF A “METAL – THERMOELECTRIC MATERIAL”
CONTACT STRUCTURE USING A COMPREHENSIVE
ABSOLUTE METHOD FOR DETERMINING
PARAMETERS OF THERMOELECTRIC MATERIALS**

The paper discusses the possibility of measuring the thermal resistance of a “metal – thermoelectric material” contact structure using a comprehensive absolute method for determining the thermoelectric properties of materials. It describes the measurement technique and provides the results of studies of possible measurement errors obtained by constructing a physical model as close as possible to real conditions and computer simulation. The influence of radiation, heat loss through conductors, and other factors on the accuracy of measurements is determined. The conditions for minimizing measurement errors are established. Bibl. 32, Figs. 10, Table 1.

Key words: thermal contact resistance, measurement, computer simulation, accuracy, thermoelectric power converters.

References

1. Tritt T., 2000. *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press, ISBN 978-0127521794.
2. Rowe D.M., 2006. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Rowe D.M. (Ed.), 2012. *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics* (1st ed.). CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.1201/b11892>.
4. Kania T., Schilder B., Kissel T., et al., 2013. Development of a Miniaturized Energy Converter Without Moving Parts. *Flow Turbulence Combust*, 90, 741–761. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>.
5. Yuan C., Hohlfeld D., Bechtold T., 2021. Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*, 119, 114075. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>.
6. Vondrak J., Schmidt M., Proto A., Penhaker M., Jargus J., Peter L., 2019. Using Miniature Thermoelectric Generators for Wearable Energy Harvesting. *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split, Croatia, 1–6. Available at: <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8782997>.
7. Dalkiranis G.G., Bocchi J.H.C., Oliveira Jr. O.N., Faria G.C., 2023. Thermoelectric materials and

- their applications in energy harvesting. *ACS Omega*, 8(10), 9364–9370. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07916>.
8. Li J., Ma B., Wang R., Han L., 2011. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectron. Reliab.*, 51, 2210–2215.
 9. Shen L., Chen H., Xiao F., Yang Y., Wang S., 2014. The step-change cooling performance of miniature thermoelectric module for pulse laser. *Energy Convers. Manag.*, 80, 9–45.
 10. Zhang W., Shen L., Yang Y., Chen H., (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. *Appl. Therm. Eng.*, 90, 664–673.
 11. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., Pedzinska M., (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *Acta Phys. Pol. A*, 116, 52–55.
 12. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *J. Appl. Phys.*, 126, 164503-1–164503-8.
 13. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material–metal boundary. *J. Thermoelectrics*, 4, 74–88.
 14. Vikhor L., Kotsur M. (2023). Evaluation of Efficiency for Miniscale Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts. *Energies*, 16, 4082-1–22. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
 15. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *J. Thermoelectrics*, 2, 5–24.
 16. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *J. Thermoelectrics*, 3-4, 5–17.
 17. ASTM, 2009. Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
 18. McWaid T., Marshall E., 1992. Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35(11), 2911–2920.
 19. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute Method for Measuring Thermoelectric Properties of Materials. *Mater. Today: Proc.*, 2(2), 737–743. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
 20. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On Improvement of the Accuracy and Speed in the Process of Measuring Characteristics of Thermoelectric Materials. *J. Electron. Mater.*, 43(10), 3863–3869. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.
 21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectrics*, 1, 65–73.
 22. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. *AIP Conf. Proc.*, 1449, 373–376. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4731574>.
 23. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.*, 41(6), 1680–1685. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1973-1>.
 24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *J. Thermoelectrics*, 2, 71–78.
 25. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *J. Thermoelectrics*, 3, 71–82.
 26. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lys'ko V.V., Puhantseva O.V., Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux.

J. Thermoelectrics, 5, 65–72.

27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *J. Thermoelectrics*, 2, 90–100.
28. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *J. Thermoelectrics*, 3, 80–88.
29. COMSOL, 2021. *COMSOL Multiphysics*, v. 6.0. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. Available at: www.comsol.com.
30. Huebner K.H., Dewhurst D.L., Smith D.E., Byrom T.G. (2001). *The Finite Element Method for Engineers*, 4th Edition. Wiley-Interscience, 744 p. ISBN 978-0-471-37078-9.
31. Reddy J.N., 2005. *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd Edition. McGraw-Hill Mechanical Engineering, 784 p.
32. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M. (2012). *Thermoelectricity: Vol. 4. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, Ukraine, 172 p. ISBN 978-966-399-411-6.

Submitted: 21.02.2024.