

УДК 537.32

Кобилянський Р.Р., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

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

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

Константинович І.А., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Кобилянська А.К., канд. фіз.-мат. наук¹

Бухараєва Н.Р.,¹

Бойчук В.В.^{1,2}

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

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatysh@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ СЕНСОРІВ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі наведено технологічні режими виготовлення термоелектричних перетворювачів теплового потоку. Встановлено, що оптимальним термоелектричним матеріалом для термобатареї є низькотемпературні матеріали на основі Bi_2Te_3 . Експериментально підтверджено ефективність використання таких технологічних режимів для виготовлення термоелектричних мікробатарей, здатних реєструвати лазерне випромінювання з покращеним коефіцієнтом перетворення в 1–1.5 порядки у порівнянні з існуючими вимірювальними перетворювачами. Вказані технологічні режими значно спрощують та механізують методику виготовлення термоелектричних сенсорів теплового потоку медичного призначення та мікрогенераторів для живлення малопотужної медичної апаратури.

Ключові слова: технологічний режим, термоелектричний перетворювач, термоелектричний сенсор теплового потоку медичного призначення.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Термоелектричні сенсорні теплових потоків знаходять широке застосування в медицині завдяки їх здатності точно вимірювати зміни тепловиділення організму людини [1 – 20]. Це дозволяє використовувати їх для діагностики та моніторингу стану пацієнтів, особливо у випадках, коли важливе виявлення локальних змін температури тіла [21 – 40]. Основні аспекти термоелектричних сенсорів [1 – 40]:

1. Принцип роботи:

- базується на термоелектричному ефекті Зеебека, коли температурна різниця між двома точками викликає виникнення електричної напруги;
- сенсор реагує на тепловий потік, що виникає через різницю температур між двома сторонами сенсора.

2. Застосування в медицині:

- розподіл кровотоку: вимірювання теплового потоку може використовуватися для оцінки мікроциркуляції крові, що корисно при діагностиці діабетичної стопи або для вивчення шкірних патологій;
- моніторинг стану ран: у ранах або післяопераційних швах зміни теплового потоку можуть свідчити про запалення або загоєння;
- діагностика пухлин: пухлини зазвичай супроводжуються локальним підвищенням теплового потоку через інтенсивний кровообіг у зоні ураження;
- нейрофізіологія: сенсори допомагають у вимірюванні теплових змін, спричинених нервовою активністю.

3. Типи сенсорів:

- одноразові або багаторазові пристрої;
- сенсори з високою чутливістю для локалізованого вимірювання, наприклад, у дерматології.

4. Переваги:

- висока точність;
- невеликий розмір, що дозволяє інтегрувати їх у носимі пристрої;
- швидкий відгук на зміну теплового потоку.

5. Технології виробництва:

- використання біосумісних матеріалів;
- мікроелектронне проектування (MEMS) для забезпечення компактності і точності.

Перспективи розвитку таких сенсорів у медицині включають їх інтеграцію в багатофункціональні системи діагностики та реабілітації, що сприяє більш точному і комфортному контролю за станом здоров'я пацієнтів.

Метою даної роботи є розробка спеціальних технологічних режимів виготовлення покращених термоелектричних мікробатарей для сенсорів теплового потоку медичного призначення.

1. Вибір термоелектричного матеріалу для виготовлення мікробатарей

Термоелектричні напівпровідникові матеріали (ТЕМ) повинні задовольняти ряд вимог: зберігати високу добротність в широкому інтервалі температур, володіти значною механічною міцністю, легко оброблятися при виготовленні зразків необхідних розмірів, не зазнавати окислюючої дії атмосфери, не сублимувати або розкладатися при підвищених температурах тощо. Найбільш важливою з цих вимог є досягнення високих значень термоелектричної добротності, від якої в більшості випадків залежить можливість застосування термоелектричного матеріалу [1 – 3].

Класифікація термоелектричного матеріалу зроблена за інтервалом робочої температури: низько-, середньо- та високотемпературні. Низькотемпературні – це напівпровідники з робочою температурою 0 – 350 °С, середньотемпературні 350 – 650 °С, високотемпературні 700 – 1000 °С.

У даному випадку для виготовлення термоелектричних сенсорів використовують низькотемпературні матеріали.

Як було сказано, ТЕМ характеризується добротністю:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} \quad (1)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, χ – коефіцієнт теплопровідності.

$$\alpha = \frac{E}{\Delta T}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{I}{U_s}, \quad (3)$$

$$\chi = \frac{I^2 R l}{\Delta T s}. \quad (4)$$

Найбільш ефективними низькотемпературними матеріалами є тверді розчини на основі Bi_2Te_3 .

У процесі відбору матеріалу для виготовлення гілок термобатареї були випробувані низькотемпературні матеріали на основі Bi_2Te_3 , отримані різними методами: монокристали (методом Бріджмена, Чохральського, зонної плавки), екструзії та пресування. На рис. 1 представлені зразки термоелектричного матеріалу n - і p -типу, одержані методом екструзії.



Рис. 1. Екструдовані бруски термоелектричного матеріалу n - і p -типу провідності.

У процесі виготовлення термоелектричної батареї такі бруски розрізаються на тонкі пластини (рис. 2), які в подальшому попарно склеюються між собою.

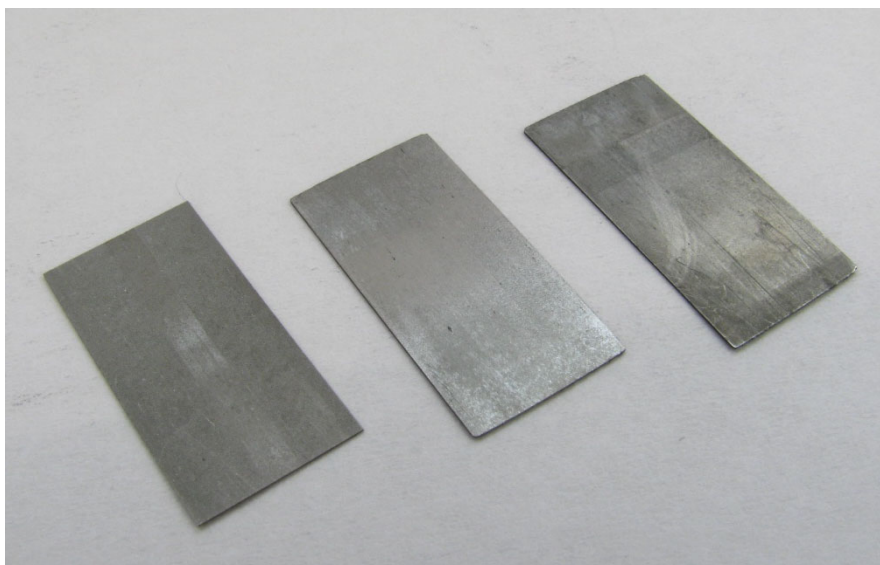


Рис. 2. Пластини термоелектричного матеріалу n - і p -типу провідності.

На відміну від монокристалів, які вирощуються методами Бріджмена, Чохральського, зонної плавки, екструдований матеріал володіє високими механічно технологічними властивостями; однорідністю по довжині стрижнів, високою механічною міцністю, що особливо важливо при виготовленні гілок малих розмірів [1 – 3].

У процесі отримання термоелектричного матеріалу виникає внутрішня напруга внаслідок різних термічних і механічних навантажень. Наявність кінцевих напруг, досягаючи граничних величин міцності, може привести до виникнення мікро- і макротріщин, які суттєво послаблюють міцність матеріалу і можуть погіршити його термоелектричні властивості. Найкращу міцність мають зразки, отримані методом екструзії. Висока механічна міцність екструдованого матеріалу пояснюється відносно високою його однорідністю.

Гілки термобатарей були виготовлені з напівпровідникового матеріалу, отриманого саме методом екструзії.

Велике значення для матеріалів, які використовують в термоелементах, є степінь їх однорідності. Неоднорідності утворюють в середині гілки замкнуті термоелектричні струми, які знижують ефективність термоелементів.

ТЕМ, що отримані з порошків гарячим або холодним пресуванням, завдяки технологічній простоті та можливості виготовлення термоелементів необхідних розмірів в даний час найбільш широко застосовуються [1 – 3].

У найпростішому випадку, коли матеріал всіх зерен однорідний та ізотропний, контакт між зернами ідеальний і вплив різних мікроскопічних дефектів (тріщини, раковини, різного роду включення та каверни) настільки маленький, що їм можна знехтувати, вирази для описання електро- і теплопровідності поршнів ізоморфні, тому незалежно від конфігурації зерен, їх розмірів, взаємної орієнтації і площі контактів відношення σ/χ повинно залишатися постійним. Коефіцієнт термоЕРС також не повинен залежати від перерахованих факторів, тому значення порошкових і монокристалічних матеріалів повинні співпадати. У більшості випадків добротність порошкових матеріалів дещо менша, ніж у монокристалів, із-за додаткового розсіювання фононів і носіїв струму на границях зерен, дислокаціях, вакансіях, мікротріщинах; із-за наявності окисних плівок та ін.

При використанні порошків з анізотропних матеріалів добротність пресованих порошків може виявитися істотно меншою, ніж у монокристалів. Анізотропія термоЕРС при розорієнтації зерен призводить до виникнення вихрових струмів, що також погіршує властивості матеріале.

Для досягнення максимальної добротності необхідно виконувати орієнтацію зерен. У шаруватоподібних матеріалах (в низькотемпературних ТЕМ, що працюють в діапазоні температур $0 \div 300$ °С), представниками яких являються сплави на основі Bi_2Te_3 , така орієнтація досягається при гарячому пресуванні [1 – 3] – зерна розташовуються площинами спайності перпендикулярно напрямку пресування. Орієнтація досягається і при виготовленні зразків методом екструзії. При застосуванні таких прийомів порошковий матеріал стає анізотропним і по добротності наближається до монокристалів.

2. Конструкція термоелектричної мікробатарей

Недоліком вказаної вище технології виготовлення термоелектричних мікробатарей (ТЕБ) є значний відсоток браку пластин термоелектричного матеріалу внаслідок мікротріщин, що можуть виникають при їх шліфовці.

Принцип дії напівпровідникової ТЕБ заснований на безпосередньому перетворюванні теплової енергії в електричну у відповідності з ефектом Зеебека, який говорить, що в замкненому колі, яке складається з двох різнорідних провідників, спаї яких знаходяться при різних температурах, виникає термоЕРС.

Конструкція ТЕБ представляє собою монолітний блок з розмірами, що не перевищує $(22 \times 22 \times 20)$ мм³. Блок складається з 1600 напівпровідникових гілок *p*- і *n*-типу квадратного перетину та ізольованих одна від одної. Гілки *p*- і *n*-типу попарно з'єднані в послідовне електричне коло (рис. 3) і розташовані паралельно відносно теплового потоку, тобто тепловий потік проходить вздовж гілок ТЕБ (по висоті). Крайні в електричному колі гілки *p*- і *n*-типу з'єднані з нікелевими шинами, які приклеєні до двох протилежних бокових поверхонь напівпровідникової ТЕБ [1 – 3].

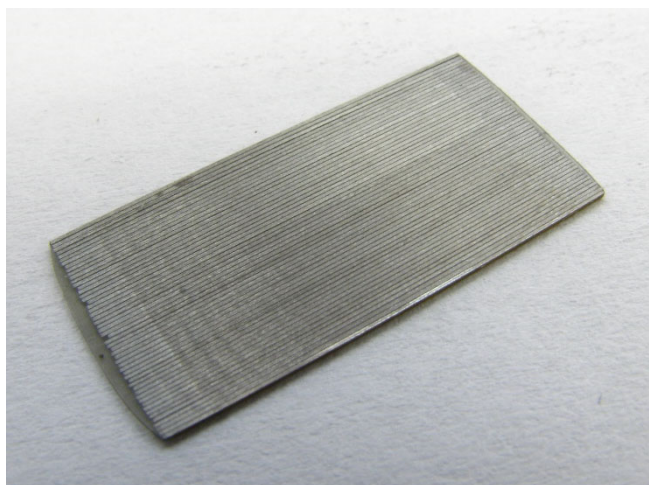


Рис. 3. Склеєні гілки ТЕБ виготовлені з екструдованого термоелектричного матеріалу.

Розміри гілки термопари, що виготовлялася складають: $(20 \times 0.5 \times 0.5)$ мм³. Гілки ТЕБ виготовлені з екструдованого термоелектричного напівпровідникового матеріалу на основі сплавів Bi_2Te_3 . Середні значення електричних параметрів цього матеріалу складають: $\alpha_{cp} = 190$ мкВ К⁻¹, $\sigma_{cp} = 900$ Ом⁻¹см⁻¹.

3. Технологічні режими виготовлення термоелектричної мікробатарей

Мікромодулі представляють собою, як правило, однокаскадні батареї, які виготовляються з низькотемпературних термоелектричних матеріалів на основі потрібних сплавів телуриду вісмуту [1 – 3], які набувають *p*- або *n*- типу провідності в залежності від їх легування. Технологічна схема виготовлення мікромодулів включає наступні етапи: синтез низькотемпературних термоелектричних сплавів *p*- і *n*- типів провідності; дроблення злитків сплавів до порошку з необхідним розміром зерен з подальшою його екструзією через фільтри розміром 7×7 мм² або 5×10 мм². Отримані термоелектричні вітки з відповідним перетином характеризуються високим значенням параметрів в інтервалі температур $200 \div 600$ К і хорошими механічними властивостями, що дозволяє використовувати їх в умовах виробництва. З цих віток алмазним диском нарізуються бруски потрібної довжини і середнім значенням $\alpha \geq 180 \div 200$ мкВ/К та $\sigma \geq 900 \div 1200$ Ом⁻¹см⁻¹. Далі бруски розрізаються за допомогою механічної струнної різки на пластини товщиною 0.7 мм і після відповідної хімічної обробки пластини склеюються між собою, зберігаючи послідовність чергування *p*- і *n*- провідності. Електричною ізоляцією між пластинами служить поліамідна плівка

товщиною 10 мкм, в якості клею вибрано епоксидний компаунд К-400 з пластифікатором. Отримані після сушки блоки розрізались на ряди віток необхідної товщини (в нашому випадку – 0.7 мм). Після хімічного травлення кінці рядів склеєних віток покривалися анти дифузійним шаром з наступним створенням комутаційного покриття. Після цих операцій отримуємо потрібну кількість одиниць мікромодулів, кожен з яких містить вибране число напівелементів (віток), зкомутованих електрохімічним чином.

Структура фрагменту мікромодуля зображена на рис. 4.

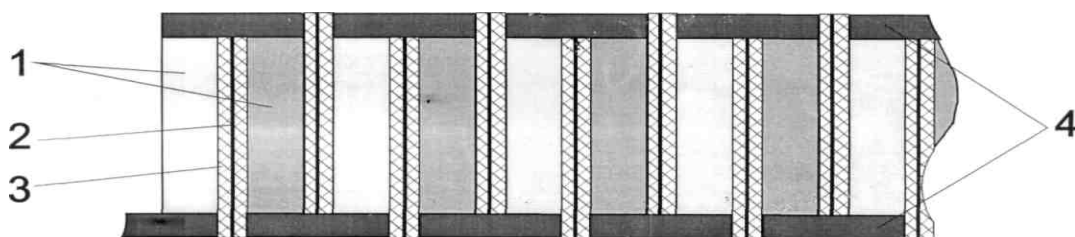


Рис. 4. Фрагмент мікромодуля ТЕБ: 1 – напівелементи р- і n- типу провідності, 2 – поліамідна плівка, 3 – епоксидний компаунд, 4 – комутація.

По вищезгаданій технологічній схемі зібрано 4 одиниці мікромодулів, які через поліамідну плівку були склеєні в блок і зкомутовані між собою з боку тепловиділяючої сторони. На рис. 5 представлено зібраний та зкомутований мікромодуль.

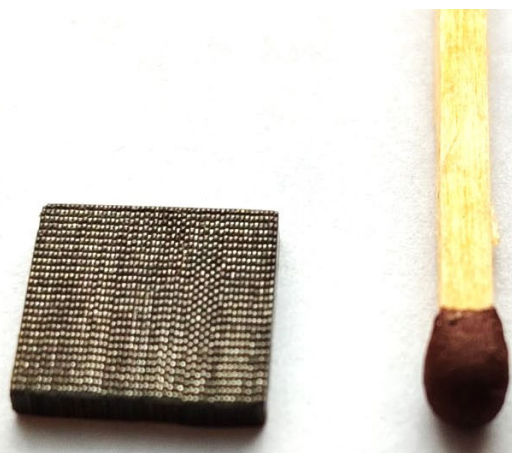


Рис. 5. Зібраний та зкомутований мікромодуль термоелектричної батареї.

До блоку мікромодулів, який фактично являє собою ТЕБ, припаювали електричні виводи, а його теплообмінні сторони покривалися теплопровідним захисним шаром, який містить нітрит бору.

У загальному технологічній ланцюжок виготовлення термоелектричної батареї можна звести до наступної схеми (рис. 6):

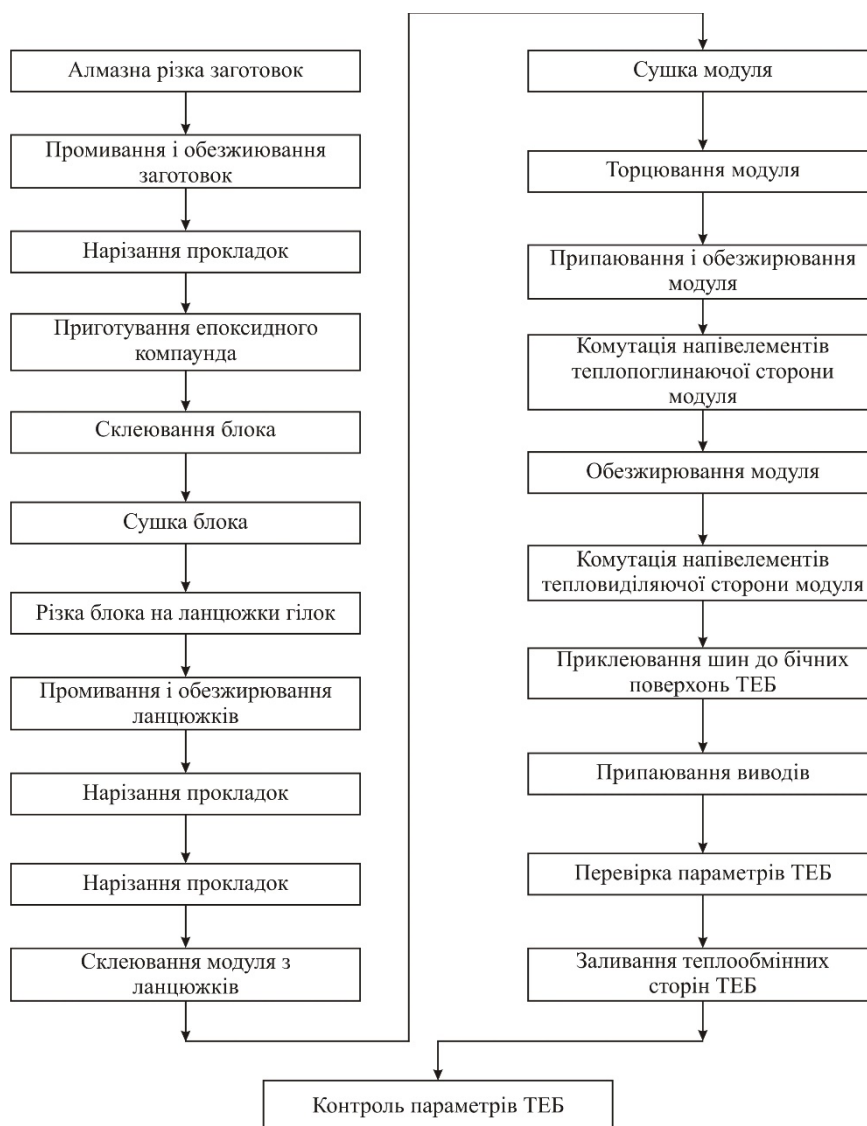


Рис. 6. Технологічна схема виготовлення ТЕБ.

3.1. Антидифузійні шари та комутація термоелектричних мікромодулів

Для створення ТЕБ використовують високоефективні низькотемпературні термоелектричні матеріали, яким являються потрійні сплави на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3 [1 – 3] і які набувають *p*- або *n*-тип провідності в залежності від їх легування.

Відносно висока робоча температура гарячих спаїв напівелементів мікромодулів вимагає застосування антидифузійних шарів на контактних поверхнях напівелементів. Відомі різні технології та методи наплення антидифузійних металевих шарів: хімічні, електрохімічні, занурення у розплав, механічне нанесення, наплення у вакуумі, осадження з газової фази, катодне розпилення, плазмове розпилення. Кожний з вищенаведених методів має негативні і позитивні риси. Найкращі результати забезпечує катодне розпилення. Але надзвичайно мала швидкість осадження покриття і велика енергоємність процесу не дозволяють використовувати цей метод. Плазмове розпилення дозволяє значно збільшити швидкість осадження покриттів, але вимагає застосування досить складного та енергоємного технологічного обладнання. В той же час гальванічні методи не характеризуються малою вартістю технологічного процесу, відносною

простотою обладнання і досить високою якістю металевих шарів. Вибір матеріалів для гальванічних антидифузійних шарів досить обмежений. Справа в тому, що необхідно забезпечити, окрім значної адгезії, ще й малий контактний опір r_0 , який суттєво впливає на термоелектричну добротність Z_{TE} термоелемента [1-3]:

$$Z_{TE} = Z_{ТЕМ} \frac{1}{1 + \frac{2r_0}{r}}, \quad (5)$$

де $Z_{ТЕМ}$ – добротність термоелектричного матеріалу, r – опір напівелемента.

Одним з найбільш придатних для створення антидифузійних контактних шарів вважається нікель Ni . Він забезпечує контактний опір на рівні $1 \div 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Надійність антидифузійних шарів Ni визначається існуванням внутрішніх напруг в металевих покриттях. Класичні сірчаноокислі електроліти Уотса характеризуються досить великими значеннями внутрішніх напруг, тому не можуть використовуватись для створення антидифузійних шарів і комутації високонадійних термоелектричних мікробатарей.

Покриття Ni з нульовими значеннями внутрішніх напруг можливо отримувати використовуючи сучасні електроліти: фтороборатний, сульфаноокислий, сульфаміноокислий фтороборатний, сульфаміново сірчаноокислий.

Найбільш перспективним є сульфаміноокислий електроліт, який дозволяє за рахунок зміни режимів електроосадження регулювати значення напруг від розтягуючих до стискуючих. У роботі досліджено вплив концентрації сульфаміноокислого Ni на значення напруг в осаджених шарах, отриманих в електролітах наступного складу:

1. Нікель сульфаміноокислий, г/л	100 – 800
2. Нікель хлористий, г/л	20
3. Борна кислота, г/л	30
pH	4.0
$t_e, ^\circ C$	40 – 60
$I_k, A/дм^2$	3.10

Отримані результати свідчать, що при збільшенні концентрації сульфаміно-кислого Ni від 100 до 800 г/л напруга розтягування σ в осаджених шарах зменшується і досягає нульових значень при 650 г/л ($t_e = 40$ °С). Якщо надалі збільшувати концентрацію сульфаміно-кислого Ni , то напруги розтягування трансформуються в напруги стискування.

Для нанесення антидифузійних шарів і комутації в мікромодулях був використаний саме сульфаміноокислий нікелевий електроліт. Товщина шару Ni становила 100 – 120 мкм для забезпечення мінімальних значень внутрішніх напруг осадження проводилося при зменшених значеннях густини катодного струму. Також з метою зменшення напруг зразу після закінчення процесу нікелювання термобатарея відпалювалася при температурі 150 °С на протязі 4 годин. У результаті було отримано якісне захисне комутуюче покриття з адгезією не менше ніж 120 кг/см² і великою циклічною стійкістю.

3.2. Підвищення надійності термоелектричної мікробатареї

Одним із ефективних методів підвищення надійності багатоелементних систем є використання резервуючих елементів, які при відмові елемента системи перебирають на себе

повністю або частково функції елемента, що вибув з ладу. У даній роботі був використаний так званий метод пасивного резервування. Він полягає у тому, що вітки багатоелементної ТЕБ шунтуються пасивними резисторами, які при відмові вітки запобігають розмиканню електричного кола ТЕБ і тому відмова спричиняє лише зменшення потужності ТЕБ, але не повну відмову батареї (рис. 7).

Такий метод є економічним і ефективним при оптимальному виборі співвідношення опорів резервованих віток і резервуючих шунтів, яке залежить від критерію відмови ТЕБ. Таким критерієм при пасивному резервуванні є допустимий процент зменшення вихідної потужності ТЕБ за гарантований час працездатності.

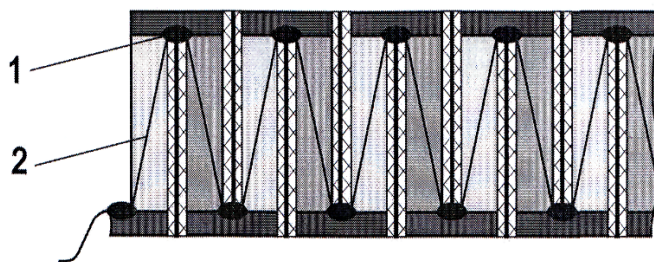


Рис. 7. Фрагмент мікромодуля ТЕБ з пасивними резисторами:
1 – пайка пасивного резистора, 2 – пасивний резистор.

Для розрахунку надійності ТЕБ і оптимізації співвідношення опорів ТЕБ і резервуючи елементів використовувались розроблені в Інституті термоелектрики НАН та МОН України методи і комп'ютерні програми. Результати розрахунку приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність параметрів ТЕБ від кількості зламаних віток

Кількість зламаних віток	$T_x - 50\text{ }^\circ\text{C}$		$T_2 - 250\text{ }^\circ\text{C}$			
	$U, \text{В}$	%	W	%	$\eta, \%$	%
0	6.75	0	0.180	0	2.95	0
1	6.61	2.0	0.172	4.1	2.85	3.5
2	6.53	3.2	0.168	6.9	2.77	6.0
3	6.45	4.4	0.164	9.0	2.65	10.0
4	6.36	5.8	0.159	11.7	2.57	13.0
5	6.27	7.1	0.155	13.8	2.45	17.0

Експериментальні дослідження з вивчення залежності параметрів термоелектричної мікробатарей від кількості зламаних віток показали хорошу відповідність і співпадіння з результатами розрахунку, які приведені в таблиці 1.

Висновки

1. Розроблено спеціальні технологічні режими виготовлення термоелектричних мікробатарей з підвищеною щільністю елементів (до декількох тисяч) на основі високоефективних

напівпровідникових матеріалів, що значно спрощує та механізує методику виготовлення термоелектричних сенсорів теплового потоку медичного призначення та мікрогенераторів для живлення малопотужної медичної апаратури.

2. Встановлено залежності параметрів термоелектричних мікробатерей від кількості зламаних віток та способи підвищення рівня відмови таких мікробатерей шляхом оптимального вибору співвідношення опорів резервованих віток і резервуючих шунтів, чим досягається допустимий процент зменшення вихідної потужності ТЕБ за гарантований час працездатності.
3. Встановлено, що термоелектричні сенсори теплового потоку є перспективними для моніторингу та ранньої діагностики запальних процесів та онкозахворювань. Впровадження таких сенсорів у медичну практику стане ефективним засобом діагностики різноманітних захворювань людини.

Література

1. Анатичук Л.І. Термоелектрика. Т.2. Термоелектричні перетворювачі енергії. Київ, Чернівці: Інститут термоелектрики, 2003. – 376 с.
2. Anatyshuk L.I. (1998). *Thermoelectricity. Vol.1. Physics of thermoelectricity*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
3. Анатичук Л.І. Сучасний стан і деякі перспективи термоелектрики // Термоелектрика. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
4. Демчук Б.М., Кушнерик Л.Я., Рубленік І.М. Термоелектричні датчики для ортопедії.// Термоелектрика. – 2002. – №4. – С. 80 – 85.
5. Патент України 53104 А. Датчик для попередньої діагностики запальних процесів молочних залоз // А.А. Ашеулов, А.В. Клепиковський, Л.Я. Кушнерик та ін. – 2003.
6. Ашеулов А.А., Кушнерик Л.Я. Термоелектричний прилад для медико-біологічної експрес-діагностики // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. – №4. – 2004. – С. 38 – 39.
7. Пат. 71619 Україна, МПК Н01L 35/00. Термоелектричний медичний тепломір / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № u 2011 14007; заявл. 28.11.11; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14.
8. Пат. 72032 Україна, МПК Н01L 35/00. Термоелектричний сенсор для вимірювання температури і теплового потоку / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № u 2011 14005; заявл. 28.11.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.
9. Пат. 73037 Україна, МПК Н01L 35/02. Термоелектричний медичний пристрій / Микитюк П.Д., Кобилянський Р.Р., Слепенюк Т.В.; Інститут термоелектрики. – № u 2012 01922; заявл. 20.02.12; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17.
10. Пат. 78619 Україна, МПК Н01L 35/00. Метод визначення густини теплового потоку / Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р.; Інститут термоелектрики. – № u 2012 11018; заявл. 21.09.12; опубл. 25.03.13, Бюл. № 6.
11. Пат. 79929 Україна, МПК Н01L 35/00. Термоелектричний перетворювач теплового потоку для градієнтних тепломірів / Анатичук Л.І.; Інститут термоелектрики. – № u 2012 11857; заявл. 15.10.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.
12. Гищук В.С. Електронний реєстратор сигналів сенсорів теплового потоку людини // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 105 – 108.

13. Гищук В.С. Електронний реєстратор з обробкою сигналів термоелектричного сенсора теплового потоку // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 82 – 86.
14. Гищук В.С. Модернізований прилад для вимірювання теплових потоків людини // Термоелектрика. – №2. – 2013. – С. 91 – 95.
15. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Дослідження впливу термоелектричного тепломіра на визначення тепловиділення людини // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 60 – 66.
16. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. 3D-модель для визначення впливу термоелектричного тепломіра на точність вимірювання тепловиділення людини // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 2, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2012. – С. 15 – 20.
17. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного тепломіра в умовах реальної експлуатації // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 53 – 60.
18. Анатичук Л.І., Гіба Р.Г., Кобилянський Р.Р. Про деякі особливості використання медичних тепломірів при дослідженні локальних тепловиділень людини // Термоелектрика. – № 2. – 2013. – С. 67 – 73.
19. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А. Про вплив термоелектричного джерела живлення на точність вимірювання температури і теплового потоку // Термоелектрика. – № 6. – 2013. – С. 53 – 61.
20. Іващук О.І., Морар І.К., Кобилянський Р.Р., Непеляк Л.В., Делей В.Д. Роль теплового потоку черевної порожнини в моніторингу гострого деструктивного панкреатиту // Збірник тез науково-практичної конференції "Актуальні питання хірургії", м. Чернівці, Україна. – 2013. – С. 254 – 259.
21. Кобилянський Р.Р. Про вплив теплової ізоляції на покази термоелектричного сенсора медичного призначення // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 5, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. – С. 45 – 49.
22. Кобилянський Р.Р. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного сенсора медичного призначення // Термоелектрика. – № 4. – 2016. – С. 69 – 77.
23. Гищук В.С., Кобилянський Р.Р., Черкез Р.Г. Багатоканальний прилад для вимірювання температури і густини теплових потоків // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 3, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2014. – С. 96 – 100.
24. Кобилянський Р.Р., Бойчук В.В. Використання термоелектричних тепломірів у медичній діагностиці // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 90 – 96.
25. Анатичук Л.І., Іващук О.І., Кобилянський Р.Р., Постевка І.Д., Бодяка В.Ю., Гушул І.Я. Термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку "АЛТЕК-10008" // Термоелектрика. – № 1. – 2016. – С. 76 – 84.
26. Анатичук Л.І., Юрик О.Є., Кобилянський Р.Р., Рой І.В., Фіщенко Я.В., Слободянюк Н.П., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Термоелектричний прилад для діагностики запальних процесів та неврологічних проявів остеохондрозу хребта людини // Термоелектрика. – № 3. – 2017. – С. 54 – 67.

27. Юрик О.Є., Анатичук Л.І., Рой І.В., Кобилянський Р.Р., Фіщенко Я.В., Слободянюк Н.П., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Особливості теплового обміну у пацієнтів з неврологічними проявами остеохондрозу в попереково-крижовому відділі хребта // Травма. – Т.18. – № 6. – 2017.
28. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Кобилянський Р.Р. Інформаційно-енергетична теорія термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку медичного призначення // Термоелектрика. – № 4. – 2017. – С. 5 – 20.
29. Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskyi V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature – Technology and Design in Electronic Equipment*, 6, 44 – 48.
30. Анатичук Л.І., Іващук О.І., Кобилянський Р.Р., Постевка І.Д., Бодяка В.Ю., Гушул І.Я., Чупровська Ю.Я. Про вплив температури навколишнього середовища на покази термоелектричних сенсорів медичного призначення // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – Т. 15. – № 1. – 2018. – С. 17 – 29.
31. Анатичук Л.І., Пасєчнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Гаврилюк М.В., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для визначення теплового потоку з поверхні очей // Термоелектрика. – № 5. – 2018. – С. 52 – 67.
32. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку // Труды XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» 26-30 травня 2014 року. – Т. 2. – Одеса, Україна. – 2014. – С. 30 – 31.
33. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А., Лисько В.В., Пуганцева О.В., Розвер Ю.Ю., Тюменцев В.А. Стенд для градування термоелектричних перетворювачів теплового потоку // Термоелектрика. – № 5. – 2016. – С. 71 – 79.
34. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Константинович І.А., Кузь Р.В., Маник О.М., Ніцович О.В., Черкез Р.Г. Технологія виготовлення термоелектричних мікробатарей // Термоелектрика. – № 6. – 2016. – С. 49 – 54.
35. Анатичук Л.І., Разіньков В.В., Бухараєва Н.Р., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний браслет // Термоелектрика. – № 2. – 2017. – С. 58 – 72.
36. Анатичук Л.І., Тодуров Б.М., Кобилянський Р.Р., Джал С.А. Про використання термоелектричних мікрогенераторів для живлення електрокардіостимуляторів // Термоелектрика. – № 5. – 2019. С. 63 – 88.
37. Анатичук Л.І., Юрик О.Є., Страфун С.С., Сташкевич А.Т., Кобилянський Р.Р., Чев'юк А.Д., Юрик Н.Є., Дуда Б.С. Теплометричні показники у пацієнтів з хронічним болем у попереку // Термоелектрика. – № 1. – 2021. С. 51 – 64.
38. Chunzhi Wang, Hongzhe Jiao, Lukyan Anatychuk, Nataliya Pasyechnikova, Volodymyr Naumenko, Oleg Zadorozhnyy, Lyudmyla Vikhor, Roman Kobylanskyi, Roman Fedoriv, Orest Kochan (2022). Development of a temperature and heat flux measurement system based on microcontroller and its application in ophthalmology. *Measurement Science Review*, 22 (2), 73 – 79.
39. Кобилянський Р.Р., Прибила А.В., Константинович І.А., Бойчук В.В. Результати експериментальних досліджень термоелектричних медичних сенсорів теплового потоку // Термоелектрика №3-4. – 2022. С. 70 – 83.
40. Yuryk O., Anatychuk L., Kobylanskyi R., Yuryk N. (2023). *Measurement of heat flux density as a new method of diagnosing neurological diseases*. Kharkiv: PC Technology Center, 31 – 68.

Надійшла до редакції: 01.12.2023.

Kobylianskyi R.R., Cand.Sc.(Phys-Math) ^{1,2}

Lysko V.V., Cand. Sc (Phys-Math) ^{1,2}

Prybyla A.V., Cand. Sc (Phys-Math) ^{1,2}

Konstantynovych I.A., Cand. Sc. (Phys-Math) ^{1,2}

Kobylianska A.K., Cand. Sc (Phys-Math) ¹

Bukharayeva N.R., ¹

Boychuk V.V. ²

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

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

² Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,

Chernivtsi, 58000, Ukraine, e-mail: anatykh@gmail.com

TECHNOLOGICAL MODES OF MANUFACTURING MEDICAL PURPOSE THERMOELECTRIC SENSORS

This work presents technological modes of manufacturing thermoelectric heat flux converters. It has been established that the optimal thermoelectric material for a thermopile is low-temperature materials based on Bi₂Te₃. The effectiveness of using such technological modes for manufacturing thermoelectric microthermopiles capable of recording laser radiation with an improved conversion coefficient of 1 – 1.5 orders of magnitude compared to existing measuring transducers has been experimentally confirmed. The specified technological modes significantly simplify and mechanize the method of manufacturing medical purpose thermoelectric heat flux sensors and microgenerators for powering low-power medical equipment.

Key words: technological mode, thermoelectric converter, medical purpose thermoelectric heat flux sensor.

References

1. Anatykhuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
2. Anatykhuk L.I. (1998). *Thermoelectricity. Vol.1. Physics of thermoelectricity*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.
3. Anatykhuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20.
4. Demchuk B.M., Kushneryk L.Ya., Rublenyk I.M. (2002). Thermoelectric sensors for orthopaedics. *J. Thermoelectricity*, 4, 80 – 85.
5. Patent of Ukraine 53104 A. (2003). Sensor for preliminary diagnosis of inflammatory processes of the mammary glands. A.A. Ashcheulov, A.V. Klepikovsky, L.Ya. Kushneryk, et al.
6. Ashcheulov A.A., Kushneryk L.Ya. (2004). Thermoelectric device for medico-biological express diagnostics. *Technology and Design in Electronic Equipment*, 4, 38 – 39.
7. *Patent of Ukraine 71619* (2012). Thermoelectric medical heat meter. L.I. Anatykhuk, R.R. Kobylianskyi. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
8. *Patent of Ukraine 72032* (2012). Thermoelectric sensor for temperature and heat flux measurement. L.I. Anatykhuk, R.R. Kobylianskyi. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).

9. *Patent of Ukraine 73037* (2012). Thermoelectric medical device. P.D. Mykytiuk, R.R. Kobylanskyi, T.V. Slepniuk. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
10. *Patent of Ukraine 78619* (2013). Method for determination of heat flux density. L.I. Anatyshchuk, R.R. Kobylanskyi. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
11. *Patent of Ukraine 79929* (2013). Thermoelectric converter of heat flux for gradient heat meters. L.I. Anatyshchuk. Institute of Thermoelectricity (In Ukrainian).
12. Gischuk V.S. (2012). Electronic recorder of human heat flux sensor signals. *J. Thermoelectricity*, 4, 105 – 108.
13. Gischuk V.S. (2013). Electronic recorder with signal processing of thermoelectric heat flux sensor. *J. Thermoelectricity*, 1, 82 – 86.
14. Gischuk V.S. (2013). Modernized device for measuring human heat fluxes. *J. Thermoelectricity*, 2, 91 – 95.
15. Anatyshchuk L.I., Kobylanskyi R.R. (2012). Study of the influence of thermoelectric heat meter on determination of human heat release. *J. Thermoelectricity*, 4, 60 – 66.
16. Anatyshchuk L.I., Kobylanskyi R.R. (2012). 3D-model for determination of the influence of thermoelectric heat meter on the accuracy of measuring human heat release. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 2, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 15 – 20.
17. Anatyshchuk L.I., Kobylanskyi R.R. (2013). Computer simulation of thermoelectric heat meter readings in real-world operating conditions. *J. Thermoelectricity*, 1, 53 – 60.
18. Anatyshchuk L.I., Giba R.G., Kobylanskyi R.R. On some features of the use of medical heat meters in the study of local human heat release. *J. Thermoelectricity*, 2, 67 – 73.
19. Anatyshchuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovich I.A. (2013). On the influence of a thermoelectric power source on the accuracy of temperature and heat flux measurement. *J. Thermoelectricity*, 6, 53 – 61.
20. Ivashchuk O.I., Morar I.K., Kobylanskyi R.R., Nepelyak L.V., Deley V.D. (2013). The role of abdominal heat flow in monitoring acute destructive pancreatitis. *Abstracts of scientific and practical conference "Current issues in surgery"*, Chernivtsi, Ukraine, 254 – 259.
21. Kobylanskyi R.R. (2016). The influence of thermal insulation on the readings of thermoelectric medical sensor. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 5, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 45 – 49.
22. Kobylanskyi R.R. (2016). Computer simulation of readings of a medical thermoelectric sensor. *J. Thermoelectricity*, 4, 69 – 77.
23. Gischuk V.S., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G. (2014). Multichannel device for measuring the temperature and density of heat fluxes. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 3, Issue. 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 96 – 100.
24. The use of thermoelectric heat meters in medical diagnostics. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Collected papers. Physics. Electronics. Vol. 4, Issue 1*. Chernivtsi: Chernivtsi National University, 90 – 96.
25. Anatyshchuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylanskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya. (2016). Thermoelectric device for measuring the temperature and density of heat flux "ALTEC-10008". *J. Thermoelectricity*, 1, 76 – 84.
26. Anatyshchuk L.I., Yuryk O.E., Kobylanskyi R.R., Roy I.V., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., Yuryk N.E., Duda B.S. (2017). Thermoelectric device for diagnosing inflammatory processes and neurological manifestations of osteochondrosis of the human spine. *J. Thermoelectricity*, 3, 54 – 67.

27. Yuryk O.E., Anatyshuk L.I., Roy I.V., Kobylanskyi R.R., Fishchenko Ya.V., Slobodianuk N.P., Yuryk N.E., Duda B.S. (2017). Peculiarities of heat exchange in patients with neurological manifestations of osteochondrosis in the lumbosacral spine. *Trauma*, 18 (6).
28. Anatyshuk L.I., Luste O.J, Kobylanskyi R.R. (2017). Information and energy theory of thermoelectric temperature and heat flux sensors for medical purposes. *J. Thermoelectricity*, 4, 5 – 20.
29. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Cherkez R.G., Konstantynovych I.A., Hoshovskiy V.I., Tiumentsev V.A. (2017). Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature – Technology and Design in Electronic Equipment*, 6, 44 – 48.
30. Anatyshuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylanskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Gushul I.Ya., Chuprovskaya Yu.Ya. (2018). On the influence of ambient temperature on the readings of thermoelectric medical sensors. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 15 (1), 17 – 29.
31. Anatyshuk L.I., Pasychnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Havryliuk M.V., Kobylanskyi R.R. (2018). Thermoelectric device for determination of heat flux from the surface of eyes. *J. Thermoelectricity*, 5, 52 – 67.
32. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A. (2014). Calibration of thermoelectric heat flux sensors. *Proc. of XV International scientific and practical conference “Modern information and electronic technologies”* (Odesa, Ukraine, May 26-30, 2014.) Vol. 2, 30 – 31.
33. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A., Lysko V.V., Pugantseva O.V., Rozver Yu.Yu., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric heat flux converters. *J. Thermoelectricity*, 5, 71 – 79.
34. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Manyk O.M., Nitsovich O.V., Cherkez R.G. (2016). Manufacturing technology of thermoelectric microthermopiles. *J. Thermoelectricity*, 6, 49 – 54.
35. Anatyshuk L.I., Razinkov V.V., Bukharayeva N.R., Kobylanskyi R.R. (2017). Thermoelectric bracelet. *J. Thermoelectricity*, 2, 58 – 72.
36. Anatyshuk L.I., Todurov B.M., Kobylanskyi R.R., Dzhal S.A. (2019). On the use of thermoelectric microgenerators to power pacemakers. *J. Thermoelectricity*, 5, 63 – 88.
37. Anatyshuk L.I., Yuryk O.E., Strafun S.S., Stashkevich A.T., Kobylanskyi R.R., Cheviuk A.D., Yuryk N.E., Duda B.S. (2021). Thermometric indicators in patients with chronic low back pain. *J. Thermoelectricity*, 1, 51 – 64.
38. Chunzhi Wang, Hongzhe Jiao, Lukyan Anatyshuk, Nataliya Pasychnikova, Volodymyr Naumenko, Oleg Zadorozhnyy, Lyudmyla Vikhor, Roman Kobylanskyi, Roman Fedoriv, Orest Kochan (2022). Development of a temperature and heat flux measurement system based on microcontroller and its application in ophthalmology. *Measurement Science Review*, 22 (2), 73 – 79.
39. Kobylanskyi R.R., Prybyla A.V., Konstantynovych I.A., Boychuk V.V. (2022). Results of experimental investigations of thermoelectric medical heat flux sensors, *J. Thermoelectricity*, 3-4, 70 – 83.
40. Yuryk O., Anatyshuk L., Kobylanskyi R., Yuryk N. (2023). *Measurement of heat flux density as a new method of diagnosing neurological diseases*. Kharkiv: PC Technology Center, 31 – 68.

Submitted: 01.12.2023.