

УДК 537.32

Анатичук Л.І.^{1,2}, Іващук О.І.³, Кобилянський Р.Р.^{1,2},
Постевка І.Д.³, Бодяка В.Ю.³, Гушул І.Я.³

¹Інститут термоелектрики, вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

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

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

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ І ГУСТИНИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ "АЛТЕК-10008"

У роботі представлено конструкцію, принцип роботи та технічні характеристики розробленого термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку, в якому передбачено зв'язок з персональним комп'ютером для збереження, обробки і візуалізації результатів вимірювань у реальному часі. Показано результати експериментальних досліджень тепловиділення прищепленого новоутворення молочної залози дослідного щура, залежно від термінів розвитку новоутворення. Встановлено, що отримані результати можуть бути використані для розробки способу ранньої діагностики раку молочної залози.

Ключові слова: термоелектричний сенсор, температура, густина теплового потоку, рак молочної залози, діагностика онкозахворювань.

This paper presents the design, operating principle and specifications of thermoelectric device developed for temperature and heat flux density measurement which involves connection to personal computer for saving, processing and visualization of measurement results in real-time mode. The results of experimental research on heat release of implanted breast neoplasm of trial rat as a function of neoplasm progression stage are presented. It is established that the results obtained can be used for development of a method for early diagnostics of breast cancer.

Key words: thermoelectric sensor, temperature, heat flux density, breast cancer, diagnostics of oncologic diseases.

Вступ

Перспективними для дослідження локальних тепловиділень людини є напівпровідникові термоелектричні сенсори теплового потоку [1 – 11], які поєднують в собі мініатюрність, високу чутливість, стабільність параметрів у широкому інтервалі робочих температур і узгоджуються із сучасною реєструючою апаратурою [12 – 17]. Використання таких сенсорів дає можливість досягати високої локальності й точності теплотричних вимірювань. Це, в свою чергу, дає можливість отримувати інформацію про характеристики досліджуваних об'єктів і детально їх аналізувати з метою виявлення на ранніх стадіях запальних процесів організму людини та онкозахворювань.

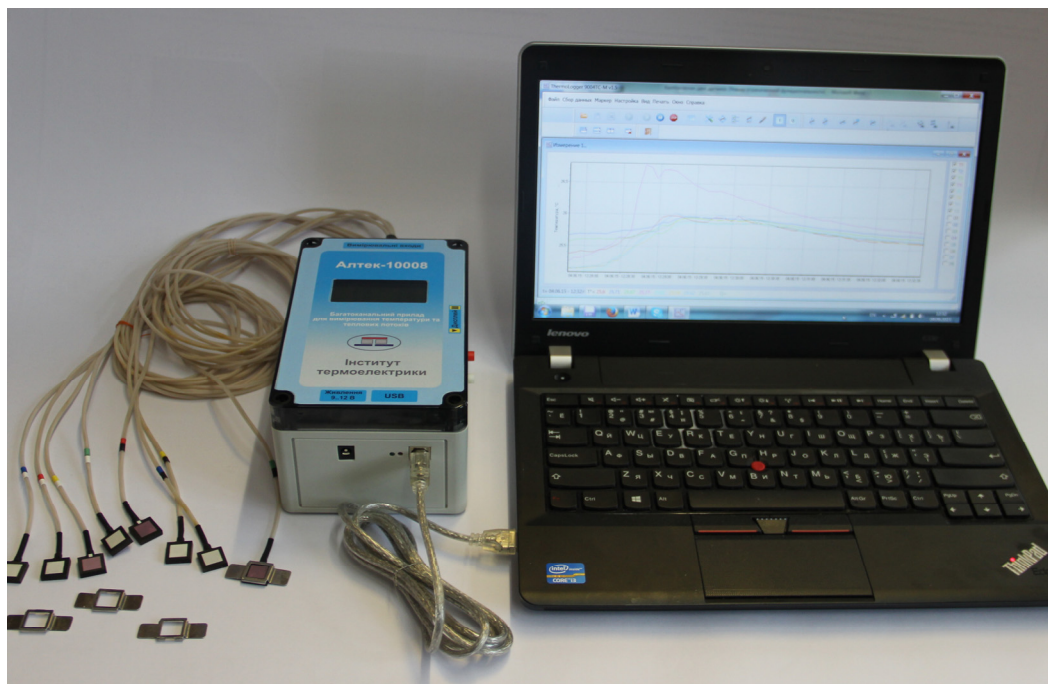
Важливим фактором при дослідженні теплових потоків тіла людини за допомогою термоелектричних сенсорів є точність та швидкодія реєстрації сигналів термоелектричних сенсорів.

Ранні розробки реєстраторів сигналів [3 – 9] мають відносно високу похибку вимірювань, великі габаритні розміри, невисоку швидкодію та не мають автономних джерел живлення. Подальші розробки в цьому напрямку привели до створення сучасних електронних реєстраторів з обробкою інформації термоелектричних сенсорів теплового потоку [18 – 20], які мають внутрішню пам'ять для збереження результатів вимірювань та автономні джерела живлення. Однак недоліки таких приладів – неможливість підключення одразу кількох термоелектричних сенсорів, відсутність одночасного вимірювання температури і густини теплового потоку та відсутність зв'язку з персональним комп'ютером в реальному часі для обробки, збереження і візуалізації результатів вимірювань. Крім того, досі недостатньо відомостей про кореляцію між тепловиділенням та станом здоров'я організму [21 – 27].

Мета роботи – розробка багатоканального термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку та дослідження з його допомогою тепловиділення прищепленого новоутворення молочної залози дослідного щура залежно від термінів розвитку новоутворення.

Конструкція та технічні характеристики приладу

Термоелектричний прилад для вимірювання температури і густини теплового потоку "АЛТЕК-10008" розроблено в Інституті термоелектрики НАН і МОН України в рамках договору про співдружність з Буковинським державним медичним університетом МОЗ України. Прилад призначений для одночасного вимірювання температури та густини теплового потоку з поверхні тіла людини контактним способом, що дає можливість виявляти на ранніх стадіях запальні процеси та онкозахворювання. Зовнішній вигляд і технічні характеристики приладу наведено на рис. 1 і таблиці 1 відповідно.



*Рис. 1. Зовнішній вигляд термоелектричного приладу.
для вимірювання температури і густини теплового потоку "АЛТЕК - 10008".*

Таблиця 1.

Технічні характеристики термоелектричного приладу

№	Характеристики приладу, один. вимірювання	Значення
1.	Кількість зондів, шт.	8
2.	Габарити зонда, мм	14 × 14 × 3
3.	Склад зонда	давач температури, давач теплового потоку
4.	Тип давача температури	термістор
5.	Габарити давача температури, мм	2.2 × 2 × 0.7
6.	Тип сенсора теплового потоку	термопарна термоелектрична батарея
7.	Габарити термоелектричної батареї, мм	10 × 10 × 3
8.	Довжина з'єднувальних проводів зонда, м	1.5
9.	Тип електронного реєстратора	TRITON 9004TC A
10.	Діапазон вимірювання температури, °C	0 ÷ + 50
11.	Точність вимірювання температури, °C	0.05
12.	Діапазон вимірювання густини теплових потоків, Вт/м ²	5 · 10 ⁻⁵ ÷ 10 ⁻¹
13.	Швидкодія електронного реєстратора, с	3 ÷ 5
14.	Живлення електронного реєстратора: а) мережевий AC/DC-адаптер, В б) три гальванічних елементи AA, В	220/5 4.5
15.	Можливість виведення результатів вимірювання на дисплей електронного реєстратора у реальному часі	+
16.	Можливість виведення результатів вимірювання на персональний комп'ютер у реальному часі	+
17.	Можливість збереження результатів вимірювання на карту пам'яті microSD у реальному часі	+

Прилад складається з електронного блоку керування та 8-ми ідентичних термоелектричних зондів. Електронний блок керування являє собою 16-канальний мікропроцесорний модуль реєстрації електричних сигналів, виконаний на основі реєстратора Triton-9004TCA. Живлення приладу може здійснюватися двома шляхами: три гальванічних елементів типу AA (4.5 В) або зовнішнє джерело живлення напругою 5 В (мережевий AC/DC-адаптера (220/5 В), USB-порт персонального комп'ютера чи ноутбука). За одночасного підключення до приладу зовнішнього джерела живлення та гальванічних елементів відбувається підзарядка останніх.

Прилад є повністю автономний – результати вимірювань відображаються на дисплеї в режимі реального часу та зберігаються на карту пам'яті microSD із заданим часовим інтервалом. Крім того, для зручності обробки і аналізу результатів вимірювань передбачено передачу даних по інтерфейсу USB на персональний комп'ютер за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми.

Термоелектричний зонд містить розміщені в спільному корпусі датчик температури (термістор) та термопарний сенсор теплового потоку. Схему термоелектричного зонда наведено на рис. 2.

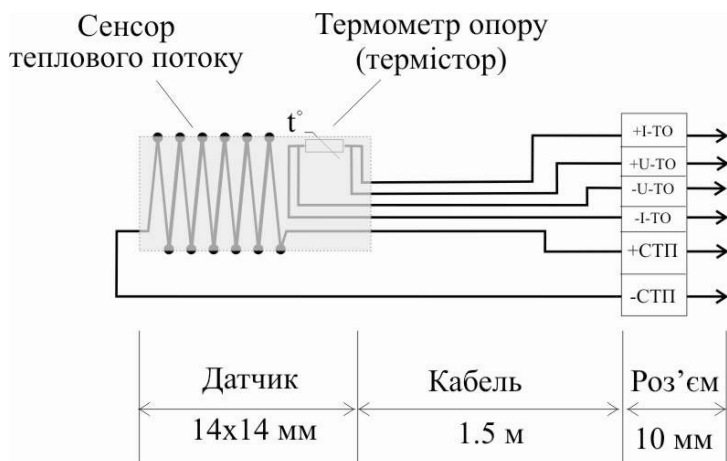


Рис. 2. Схема термоелектричного зонда.

Сенсор теплового потоку являє собою щільно упаковану батарею термопарних елементів, виготовлених з високоефективних напівпровідникових матеріалів на основі $Bi - Te$ [1]. Проміжки між термопарними елементами заповнені епоксидним компаундом, а робочі поверхні батареї герметично захищені керамічними пластинами. Повна герметичність термоелектричних зондів дає можливість проводити їх якісну дезінфекцію. Для зручності заміни термоелектричного зонда передбачено його з'єднання з електронним блоком керування (здійснюється через роз'єм). Кріплення термоелектричних зондів до об'єкту дослідження здійснюється за допомогою рамок з пелюстками, виготовлених з харчової нержавіючої сталі.

Опис експерименту

Експеримент виконано на 48 статевозрілих нелінійних щурах середнього віку масою не менше 180 г, жіночої статі, які жодного разу не вагітніли.

Всі дослідні тварини були поділені на дві групи – порівняння та основну. Основну групу становили 32 щури, яким в ділянку розташування тканин черевної молочної залози шляхом ін'єкції суспензії клітин було прищеплено пухлину Герена (рис. 3).



Рис. 3. Новоутворення лівої черевної молочної залози дослідного щура (10-та доба після уведення суспензії клітин пухлини Герена).

Суспензію клітин пухлини Герена отримували шляхом видалення останньої з іншої тварини. Пухлину подрібнювали до отримання фрагментів розмірами від 0.05 до 1.0 мм, видаляючи при цьому сполучнотканинні елементи. Виконували також очистку в фіколовому градієнті, добиваючись видалення клітинного детриту, елементів крові, слизу, сполучнотканинних клітин та великих фрагментів. Для трансплантації використовували зразок добової культури клітин у середовищі культивування, за їх вмісту $4 \cdot 10^8$ в 1 мл.

Основна група була поділена на дві підгрупи. Першій підгрупі тварин сенсор температури і теплового потоку розміщували в проекції патологічно незмінених тканин черевної молочної залози, другій – в проекції розташування пухлини. До складу групи порівняння увійшло 16 інтактних тварин, яким розташовували сенсор температури і теплового потоку в проекції тканин черевної молочної залози.

З метою вимірювання теплового потоку черевної молочної залози тварину фіксували лежачу на спині. Сенсор теплового потоку фіксували до шкіри за допомогою двох окремовузлових швів, попередньо поголивши шкіру та двічі обробивши цю ділянку 70% розчином спирту (рис. 4).



Рис. 4. Розташування та фіксація окремо вузловими швами термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку в проекції пухлини черевної та пахової молочних залоз.

Вимірювання температури і густини теплового потоку поверхні шкіри молочної залози дослідних щурів проводили впродовж 5 хвилин, з 8-ї по 16-ту добу після прищеплення пухлини. Зазначені терміни експериментальних досліджень обумовлені розміром прищепленого новоутворення, а також початком деструктивних процесів останнього. Температура повітря в приміщенні впродовж експериментальних досліджень була в межах $20 \div 21$ °С. Тваринам групи порівняння вимірювання температури і густини теплового потоку проводили, розташували термоелектричний сенсор у горизонтальному положенні на шкірі в проекції черевної молочної залози.

Експеримент виконано в умовах віварію Буковинського державного медичного

університету відповідно до національних вимог “Загальних етичних принципів експериментів на тваринах” (Україна, 2011), що узгоджені з положенням “Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментів та інших наукових цілей” (Страсбург, 1985).

Евтаназію лабораторних щурів здійснювали згідно із етичними стандартами та діючими рекомендаціями у стані глибокого наркозу шляхом уведення надлишкової кількості наркотичного препарату, згідно із законом України № 3447-1 від 21.02.2006 р. "Про захист тварин від жорстокого поводження".

Результати експериментальних досліджень

У табл. 2 наведено результати експериментальних досліджень густини теплового потоку молочної залози дослідних щурів. Отримані результати засвідчують на вірогідно нижчі значення густини теплового потоку у тварин основної групи впродовж усього терміну спостереження. Показники густини теплового потоку тварин першої підгрупи основної групи вірогідно вищі за показники другої підгрупи впродовж усього терміну дослідження. В обох підгрупах основної групи відмічається вірогідне зниження густини теплового потоку після 8 – 10-ї доби спостереження.

Таблиця 2.

Динаміка густини теплового потоку новоутворення молочної залози дослідного щура залежно від терміну після прищеплення пухлини ($M \pm m$), мВт

Термін після прищеплення пухлини	Група тварин		
	Основна група $n = 32$		Група порівняння $n = 16$
	Перша підгрупа	Перша підгрупа	
8 – 10-та доби	19.26 ± 0.31 $p < 0.001$	15.07 ± 0.30 $p < 0.001; p_1 < 0.001$	28.99 ± 0.60
11 – 13-та доби	17.93 ± 0.31 $p < 0.001^*$	13.08 ± 0.26 $p < 0.001; p_1 < 0.001^*$	
14 – 16-та доби	13.65 ± 0.32 $p < 0.001^*$	9.17 ± 0.38 $p < 0.001; p_1 < 0.001^*$	

Примітки: n – кількість спостережень; p – по відношенню до групи порівняння; p_1 – по відношенню до першої підгрупи основної групи; * – вірогідно проти 8 – 10-ї доби спостереження.

Оцінюючи результати експериментальних досліджень температури поверхні шкіри в проекції молочної залози дослідних щурів, слід відмітити вірогідно менші значення температури у тварин основної групи впродовж усього терміну спостереження (таблиця 3). Температура поверхні шкіри в проекції молочної залози у тварин першої підгрупи основної групи вірогідно вища, ніж у тварин другої підгрупи. Відмічається вірогідне зниження температури поверхні шкіри в проекції молочної залози у тварин основної групи впродовж усього терміну дослідження із вірогідною різницею на 14 – 16-ту доби.

Таблиця 3.

Динаміка температури поверхні шкіри новоутворення молочної залози дослідного щура залежно від терміну після прищеплення пухлини ($M \pm m$), °C

Термін після прищеплення пухлини	Група тварин		
	Основна група n=32		Група порівняння n = 16
	Перша підгрупа	Перша підгрупа	
8-10 доби	25.45 ± 0.58 $p < 0.001$	22.90 ± 0.31 $p < 0.001; p_1 < 0.001$	31.50 ± 0.63
11-13 доби	24.98 ± 0.42 $p < 0.001$	22.33 ± 0.36 $p < 0.001; p_1 < 0.001$	
14-16 доби	24.11 ± 0.30 $p < 0.001^*$	21.72 ± 0.40 $p < 0.001; p_1 < 0.001^*$	

Примітки: n – кількість спостережень; p – по відношенню до групи порівняння; p_1 – по відношенню до першої підгрупи основної групи; * – вірогідно проти 8 – 10-ї доби спостереження.

Підсумовуючи результати експериментальних досліджень слід зазначити, що у випадку наявності пухлини молочної залози дослідного щура спостерігаються вірогідно менші значення моди та медіани температури і густини теплового потоку порівняно з інтактними тваринами. Відмічаються вірогідно менші вищезазначені показники ураженої пухлиною молочної залози, ніж у інтактної, в організмі однієї тварини. Розвиток пухлини молочної залози характеризується вірогідним зниженням моди, а також медіани густини теплового потоку і температури поверхні шкіри, хоча для останньої характерні менш виражені зміни, про що свідчить невірогідна різниця на 11 – 13-ту доби спостереження.

Отже, густина теплового потоку і температура поверхні шкіри в проекції злоякісного новоутворення молочної залози має вірогідно менші значення, що знижуються у міру росту останнього. Отримані результати можуть бути використані для розробки способу ранньої діагностики раку молочної залози. Впровадження термоелектричного приладу для вимірювання температури і густини теплового потоку "Алтек-10008" в медичну практику надасть простий і дешевий метод діагностики на ранніх стадіях запальних процесів та онкозахворювань.

Висновки

1. Розроблено та виготовлено багатоканальний термоелектричний прилад, що призначений для одночасного вимірювання температури і густини теплового потоку поверхні тіла людини контактним способом та має можливість збереження, обробки і візуалізації результатів вимірювань на персональному комп'ютері в реальному часі.
2. В експерименті встановлено, що величина густини теплового потоку, а також температури поверхні шкіри молочної залози ураженої пухлиною нижча за інтактну та знижується з ростом новоутворення. Отримані результати можуть бути використані для розробки способу ранньої діагностики раку молочної залози.

3. Запропонований прилад є перспективним для моніторингу температурного та теплового стану організму людини, що дає можливість виявляти на ранніх стадіях запальні процеси, онкозахворювання та проводити експрес-діагностику під час масового профілактичного огляду пацієнтів.

Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатычук // Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
2. Геращенко О.А. Основы теплотриии / О.А. Геращенко // Киев: Наукова думка, 1971. – 192 с.
3. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер / Л.И. Анатычук, Н.Г. Лозинский, П.Д. Микитюк [и. др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – №5. – С. 236.
4. Термоэлектрический тепломер / Л.И. Анатычук, Л.П. Булат, Д.Д. Гуцал, [и. др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – №4. – С. 248.
5. Ладыка Р.Б. Полупроводниковые тепломеры в диагностике и лечении заболеваний суставов / Р.Б. Ладыка, Д.Н. Москаль, В.Д. Дидух // Медицинская техника. – 1992. – №6. – С. 34 – 35.
6. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении / Р.Б. Ладыка, О.Н. Дакалюк, Л.П. Булат [и. др.] // Медицинская техника. – 1996. – №6. – С. 36 – 37.
7. Демчук Б.М. Термоелектричні датчики для ортопедії / Б.М. Демчук, Л.Я. Кушнерик, І.М. Рубленик // Термоелектрика. – 2002. – №4. – С. 80 – 85.
8. Пат. 53104 А Україна, МПК H01L 35/00. Датчик для попередньої діагностики запальних процесів молочних залоз / Ащеулов А.А., Клепіковський А.В., Кушнерик Л.Я., Раренко А.І., Черченко В.І.; Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича. – № u2002031955; заявл. 12.03.2002; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.
9. Ащеулов А.А., Термоэлектрический прибор для медико-биологической экспрес-диагностики / А.А. Ащеулов, Л.Я. Кушнерик // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – №4. – 2004. – С. 38 – 39.
10. Demchuk B.M. Primary thermoelectric converters based on semi-conductor materials for gradient heat meters / B.M. Demchuk, R.R. Kobylyansky, A.V. Prybyla // The 31-st International and 10-th European Conference on Thermoelectrics. – 2012. – Aalborg, Denmark. – P. 277.
11. Анатычук Л.И. Термоэлектрические преобразователи для градиентных тепломеров / Л.И. Анатычук, Р.Р. Кобылянський // Доклады XIII Межгосударственного семинара “Термоэлектрики и их применения” 13-14 ноября 2012 г. – Санкт-Петербург, Россия. – С. 440 – 444.
12. Пат. 71619 Україна, МПК H01L 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.
13. Пат. 72032 Україна, МПК H01L 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.
14. Пат. 73037 Україна, МПК H01L 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.
15. Пат. 78619 Україна, МПК H01L 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.

16. Пат. 79929 Україна, МПК H01L 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.
17. Анатичук Л.І. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку / Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський, І.А. Константинович // Труды XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» 26-30 травня 2014 року. – Т. 2. – Одеса, Україна. – 2014. – С. 30 – 31.
18. Гищук В.С. Електронний реєстратор сигналів сенсорів теплового потоку людини / В.С. Гищук // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 105 – 108.
19. Гищук В.С. Електронний реєстратор з обробкою сигналів термоелектричного сенсора теплового потоку / В.С. Гищук // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 82 – 86.
20. Гищук В.С. Модернізований прилад для вимірювання теплових потоків людини / В.С. Гищук // Термоелектрика. – № 2. – 2013. – С. 91 – 95.
21. Анатичук Л.І. Дослідження впливу термоелектричного тепломіра на визначення тепловиділення людини / Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський // Термоелектрика. – № 4. – 2012. – С. 60 – 66.
22. Анатичук Л.І. 3D-модель для визначення впливу термоелектричного тепломіра на точність вимірювання тепловиділення людини / Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 2, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2012. – С. 15 – 20.
23. Анатичук Л.І. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного тепломіра в умовах реальної експлуатації / Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – С. 53 – 60.
24. Анатичук Л.І. Про деякі особливості використання медичних тепломірів при дослідженні локальних тепловиділень людини / Л.І. Анатичук, Р.Г. Гіба, Р.Р. Кобилянський // Термоелектрика. – № 2. – 2013. – С. 67 – 73.
25. Роль теплового потоку черевної порожнини в моніторингу гострого деструктивного панкреатиту / О.І. Іващук, І.К. Морар, Р.Р. Кобилянський // Збірник тез науково-практичної конференції "Актуальні питання хірургії", м. Чернівці, Україна. – 2013. – С. 254 – 259.
26. Анатичук Л.І. Про вплив термоелектричного джерела живлення на точність вимірювання температури і теплового потоку / Л.І. Анатичук, Р.Р. Кобилянський, І.А. Константинович // Термоелектрика. – № 6. – 2013. – С. 53 – 61.
27. Кобилянський Р.Р. Використання термоелектричних тепломірів у медичній діагностиці / Р.Р. Кобилянський, В.В. Бойчук // Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка. – Т. 4, Вип. 1. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2015. – С. 90 - 96.

Надійшла до редакції 26.02.2016.