Національна академія наук України та Міністерство освіти і науки України

ІНСТИТУТ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ

РОЗРОБКА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ МЕДИЦИНИ

КОБИЛЯНСЬКИЙ РОМАН РОМАНОВИЧ

кандидат фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

Інституту термоелектрики НАН та МОН України

Чернівці – 2019

Актуальність роботи. Термоелектричне перетворення енергії являється однією із галузей народного господарства, яка сьогодні дуже швидко розвивається як в нашій країні, так і за кордоном. Теорія енергетичного застосування термоелектричних явищ відкрила широкі можливості для використання напівпровідникових термоелектричних перетворювачів у різних галузях науки і техніки, зокрема в медицині. За останні десятиліття ця галузь отримала особливо значний розвиток, оскільки з'явилась реальна можливість створювати малогабаритні пристрої для регулювання температурних режимів функціонування різної апаратури, забезпечувати отримання локального охолодження та інтенсифікувати процеси теплопередачі у складних конструкціях.

Проведені протягом багатьох років дослідження щодо використання термоелектричного перетворення енергії у медицині підтверджують його успішне практичне застосування. Термоелектричні пристрої успішно застосовуються в таких галузях медицини, як кріотерапія, кріохірургія, офтальмологія, травматологія, нейрохірургія, пластична хірургія, урологія, дерматологія тощо. Однак, досвід використання термоелектричних медичних приладів виявив і ряд їх недоліків. Тому одним із перспективних напрямків розвитку термоелектрики є вдосконалення та створення сучасної, надійної, компактної та багатофункціональної термоелектричної медичної апаратури, що за своїми характеристиками перевершуватиме відомі світові аналоги та підвищить конкурентоспроможність вітчизняної продукції. Впровадження такої термоелектричної медичної апаратури надасть медикам ефективний засіб діагностики та лікування різноманітних захворювань організму людини.

Однак для розробки та проектування термоелектричної медичної апаратури нового покоління необхідно розробити фундаментальні наукові теоретичні основи для її створення, узагальнені фізичні моделі та комп'ютерні методи моделювання теплових та електричних процесів у системі «термоелектричний перетворювач – тіло людини». Саме такі теоретичні основи дають можливість оптимізувати конструкції та режими роботи термоелектричних перетворювачів, що є основними елементами термоелектричних приладів медичного призначення.

Мета роботи – розробка теоретичних основ, фізичних моделей та комп'ютерних методів моделювання теплових та електричних процесів у системі «термоелектричний перетворювач – тіло людини» для проектування і створення на їх основі сучасної термоелектричної медичної апаратури.

Об'єкт дослідження – теплові та електричні процеси, що мають місце при взаємодії термоелектричного перетворювача з тілом людини; теплофізичні процеси в біологічній тканині та їх кореляція зі станом здоров'я людини; розподіли температури і теплових потоків на поверхні тіла людини та їх використання для отримання електричної енергії; теплообмінні процеси в організмі людини та керований вплив на них термоелектричного охолодження та нагріву.

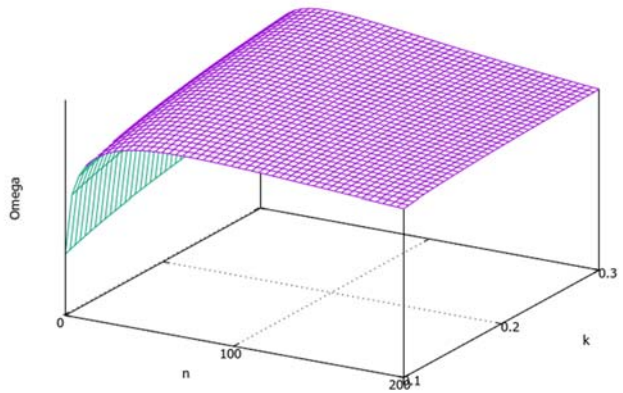
Предмет дослідження – термоелектричні перетворювачі енергії, що взаємодіють з тілом людини, та прилади на їх основі.

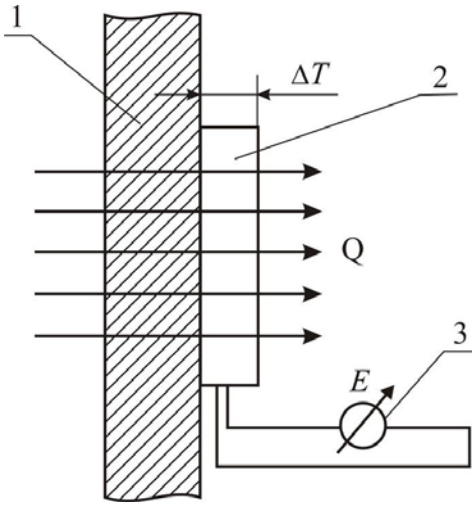
Методи дослідження – методи математичної фізики для визначення розподілів фізичних полів у біологічній тканині тіла людини та в термоелектричних перетворювачах енергії, об'єктно-орієнтоване комп'ютерне моделювання теплових та електричних процесів, розрахункові методи, експериментальні методи термоелектрики та теплофізики.

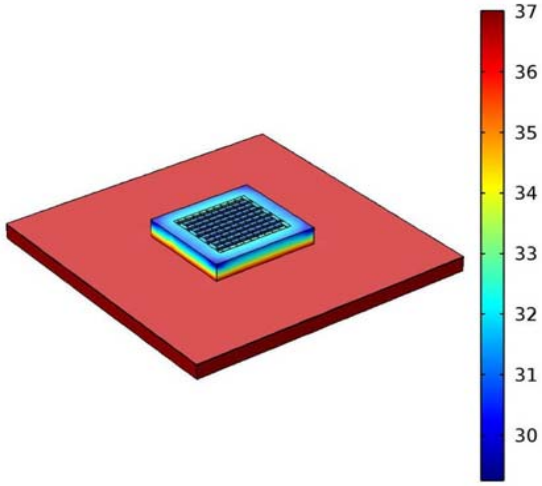
ТЕОРІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ МЕДИЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

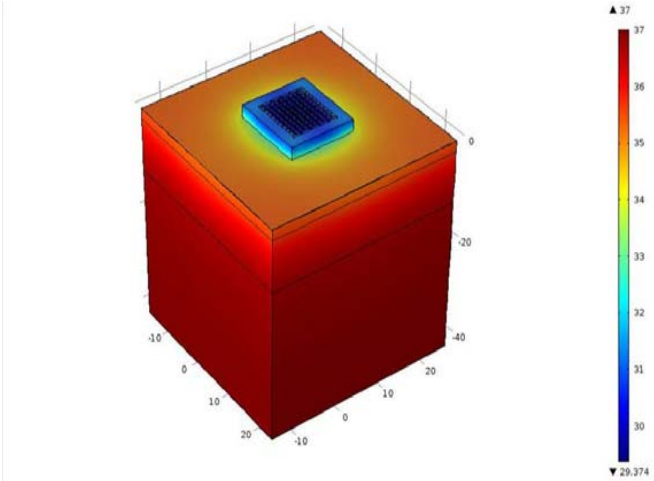
Розвинуто інформаційно-енергетичну теорію термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку медичного призначення. Визначено асиметричний максимум інформативності як функції кількості елементів термоелектричної батареї (ТЕБ). Визначено оптимальну кількість елементів ТЕБ в залежності від вольт-ватної чутливості елемента і потужності шумів елемента для заданого рівня розрізнювальної здатності реєструючого приладу.

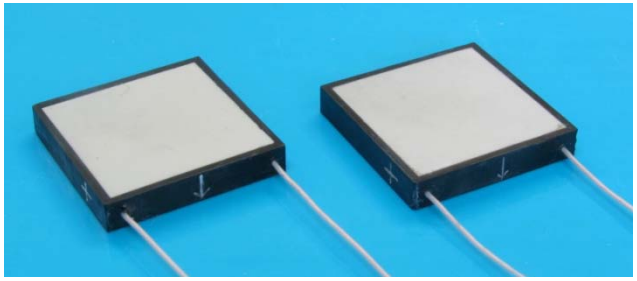
$$\Omega(n) = \frac{\tau_r + \tau_p}{\tau_r \tau_r} \log \frac{D}{\sqrt{2\pi e}\left(A_t \left(\frac{1}{n} + \frac{r_0}{R_r} \right) u_0 + k_c n \right)}$$

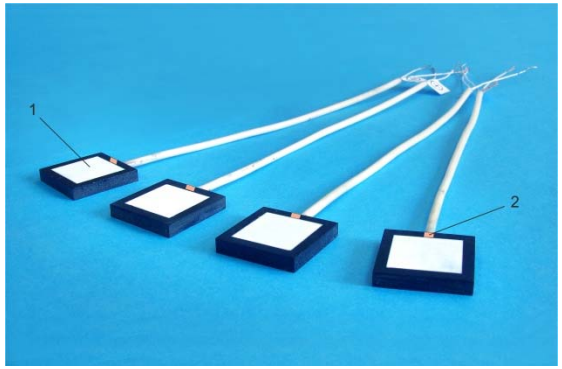


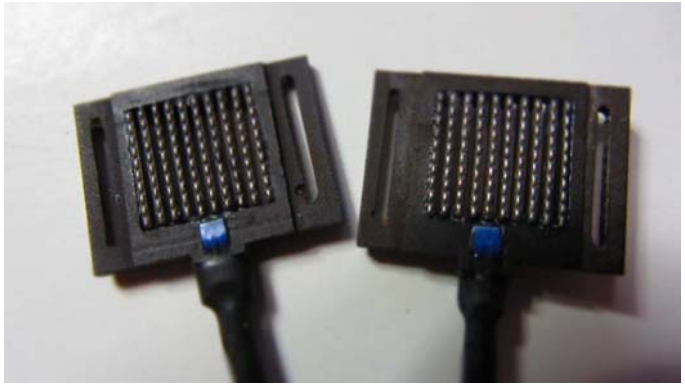








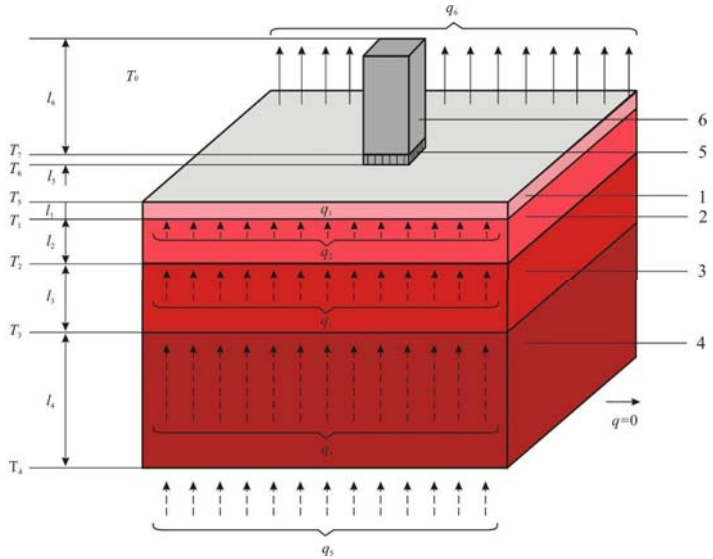




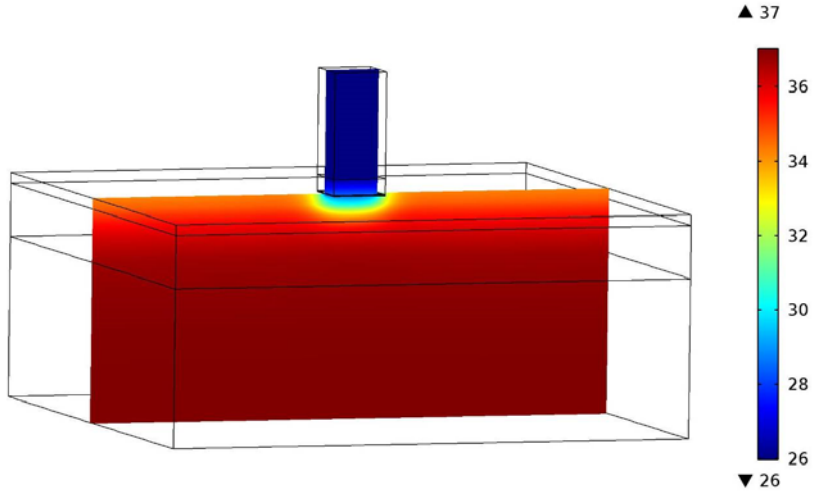
ТЕОРІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МЕДИЦИНИ

Розвинуто узагальнену теорію термоелектричного перетворення теплової енергії тіла людини для живлення малопотужної електронної медичної апаратури. Загальне рівняння теплообміну в біологічній тканині: $\rho_i \cdot C_i \cdot \dfrac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa_i \cdot \nabla T) + \rho_b \cdot C_b \cdot \omega_{b_i} \cdot (T_b - T) + q_{met_i}$.

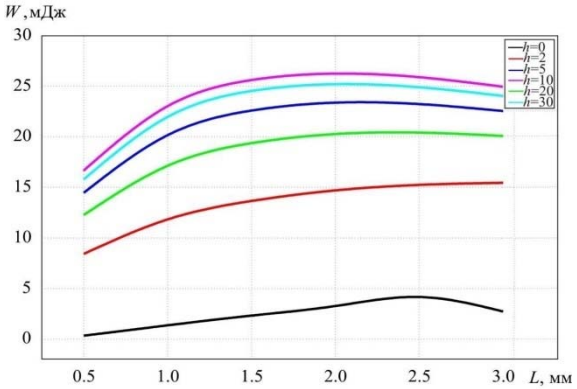
За допомогою об’єктно-орієнтованого комп’ютерного моделювання отримано розподіли температури та ліній густини теплового потоку в біологічній тканині тіла людини, термоелектричному мікрогенераторі та акумуляторі тепла.



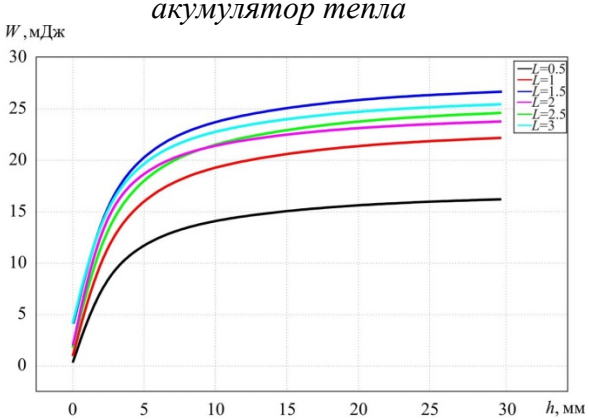
Фізична модель біологічної тканини



Розподіл температури в перерізі біологічної тканини тіла людини, на поверхні якої розміщено термоелектричний мікрогенератор та акумулятор тепла



а)

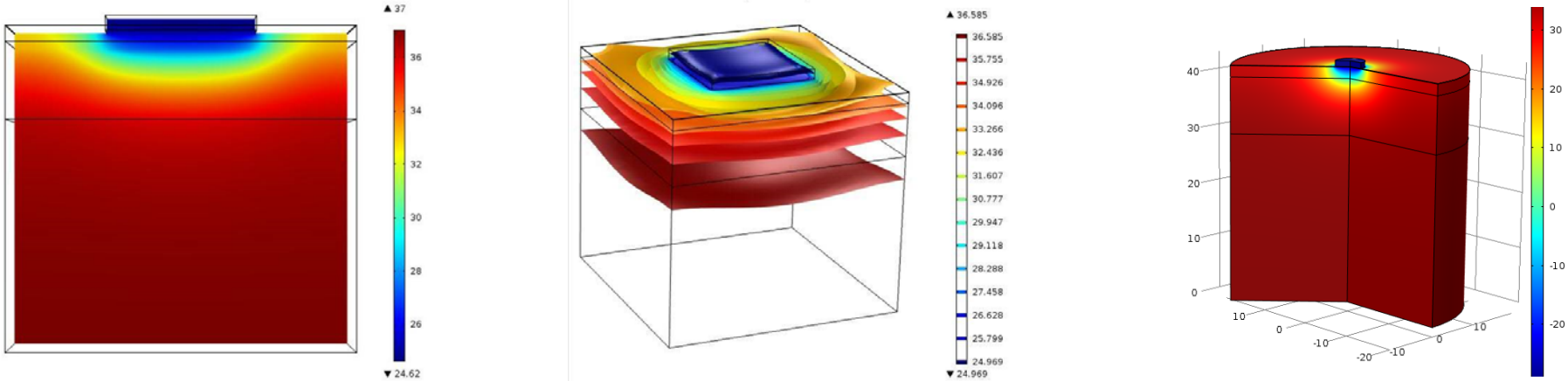


б)

Залежність електричної енергії, отриманої за час t = 20 с:
а) від довжини віток L за різних довжин акумулятора тепла h; б) від довжини акумулятора тепла h за різних довжин віток L

ТЕОРІЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ТА НАГРІВУ ДЛЯ МЕДИЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Вперше розроблено теорію оптимального керування часовою залежністю температури охолодження у термоелектричних пристроях: $I(t)=\dfrac{1}{\alpha T_c(t)}\left[\dfrac{r_c}{s}I^2(t)+\dfrac{\kappa}{c}\dfrac{\rho}{sl}\int_0^{at}K(t-\tau)I^2(\tau)d\tau+\Phi(t,T_c(t))\right]$



Розподіл температури в об'ємі біологічної тканини, на поверхні якої розміщено охолоджуючий елемент

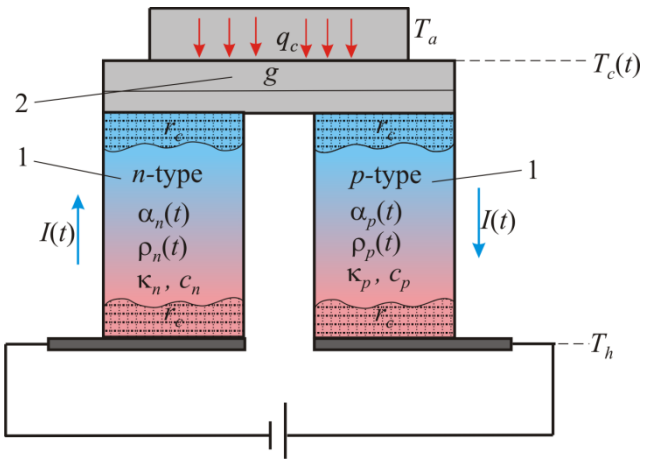
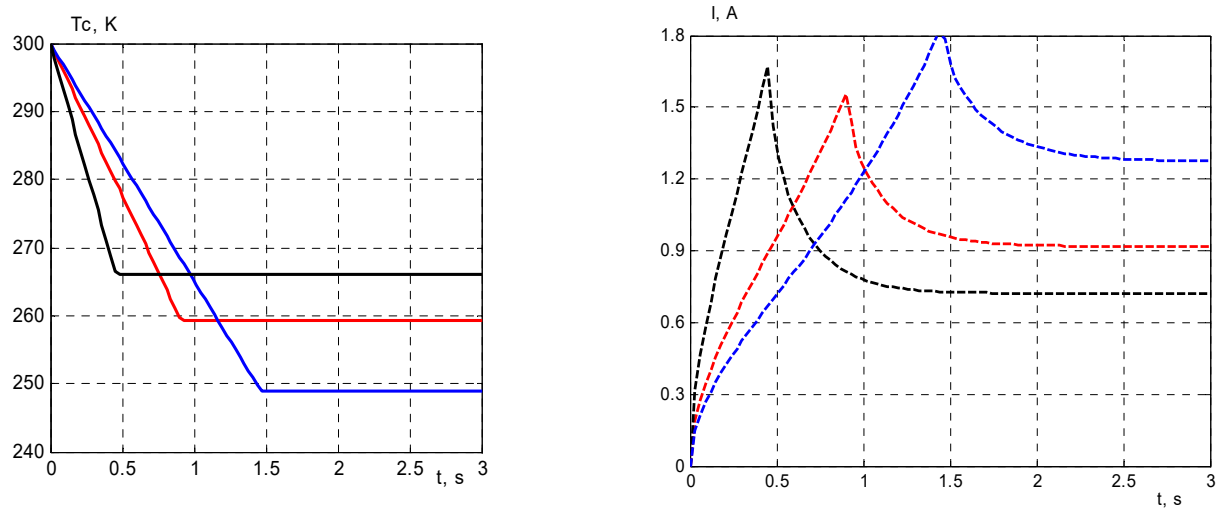
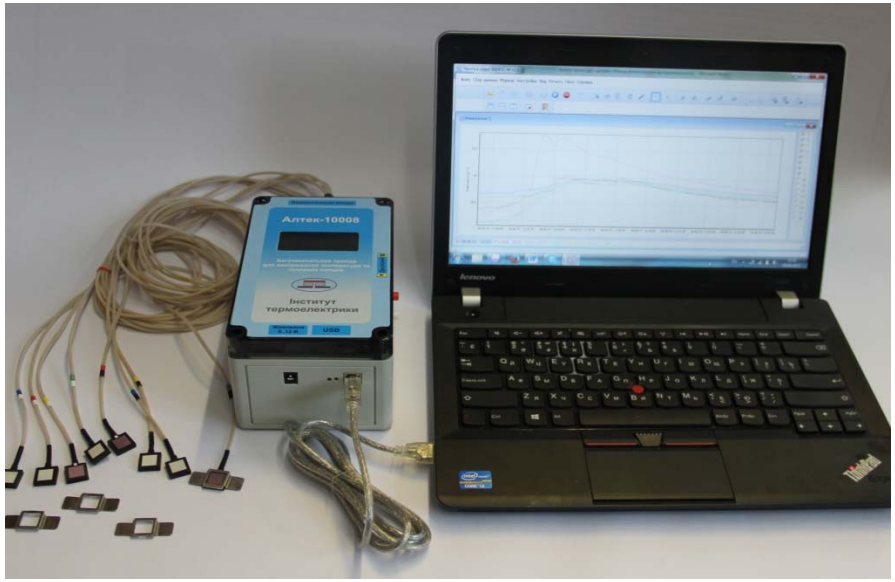


Схема термоелемента в нестаціонарному режимі охолодження

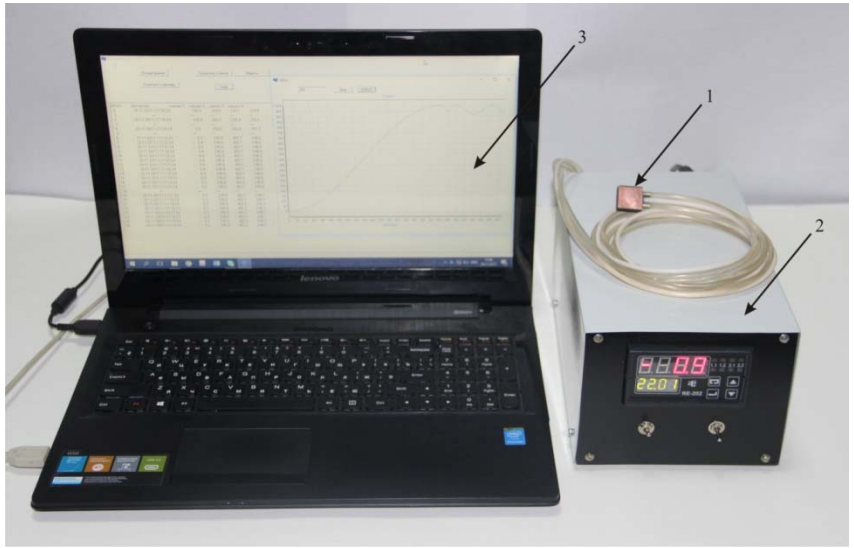


Задані часові залежності температури охолодження $T_c(t)$ і відповідні функції керування струмом живлення термоелемента $I(t)$, q_0=0 Вт

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ПРИЛАДИ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ



Термоелектричний прилад для діагностики онкозахворювань молочної залози

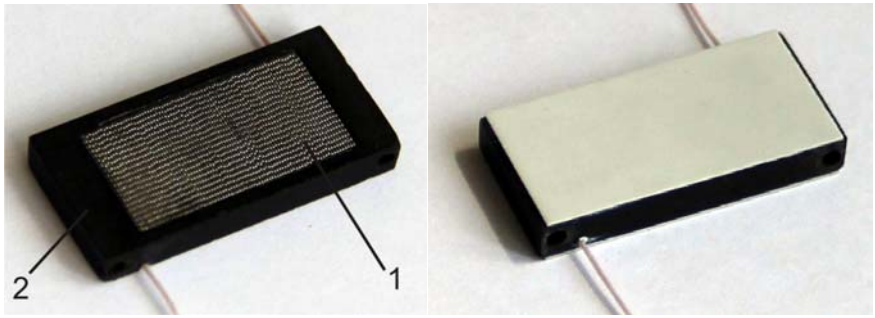


Термоелектричний прилад для діагностики запальних процесів організму людини

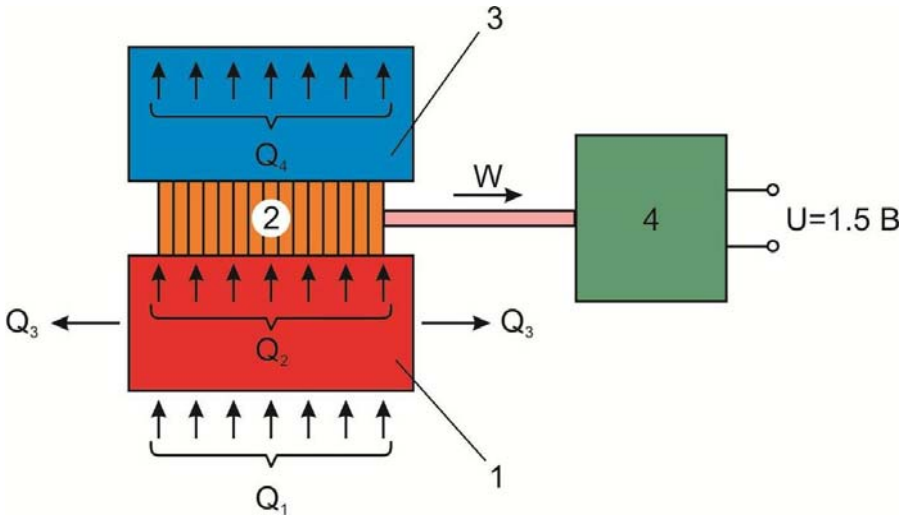
Термоелектричний прилад для визначення внутрішньоочної температури

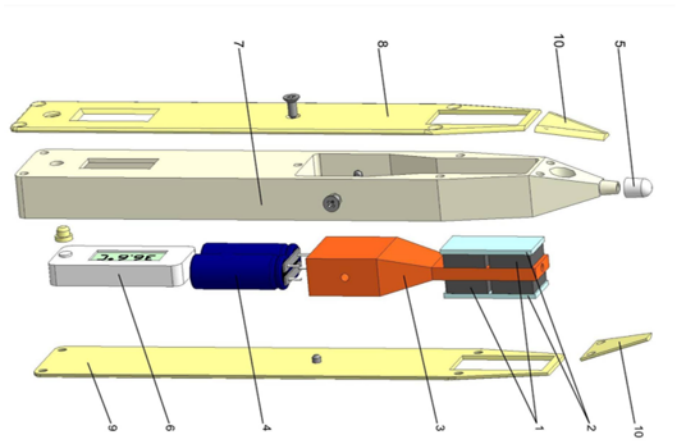
Термоелектричний прилад для діагностики запальних процесів при неврологічних проявах остеохондрозу хребта людини

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЛЮДИНИ



Термоелектричний браслет

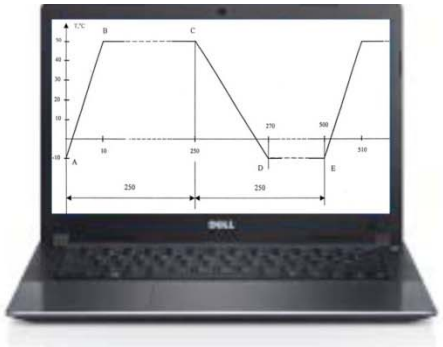


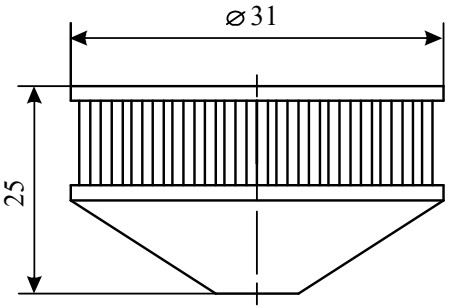


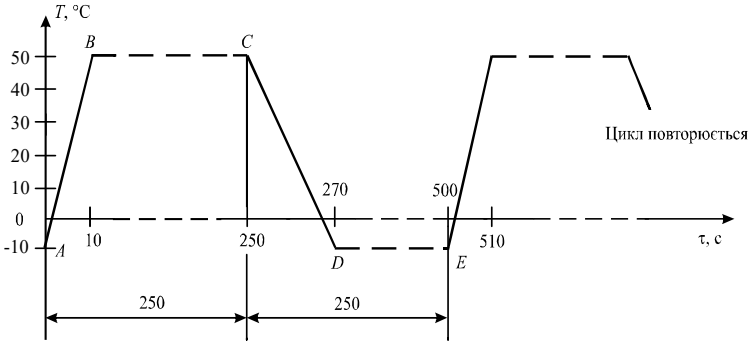
Електронний медичний термометр з термоелектричним джерелом живлення

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ МЕДИЦИНИ

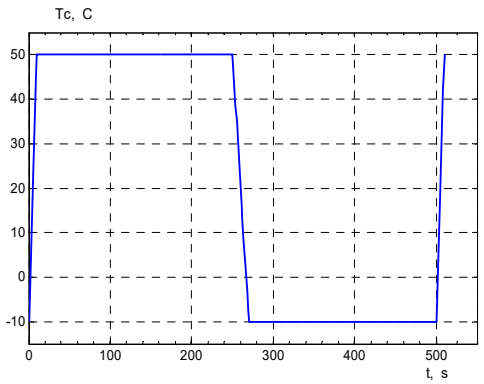
Термоелектричний прилад для рефлексотерапії

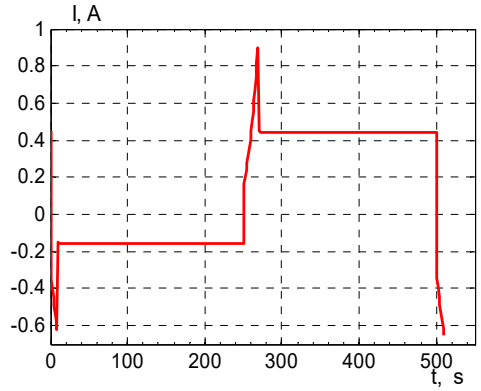






Графік повного циклу роботи термоелектричного приладу для рефлексотерапії

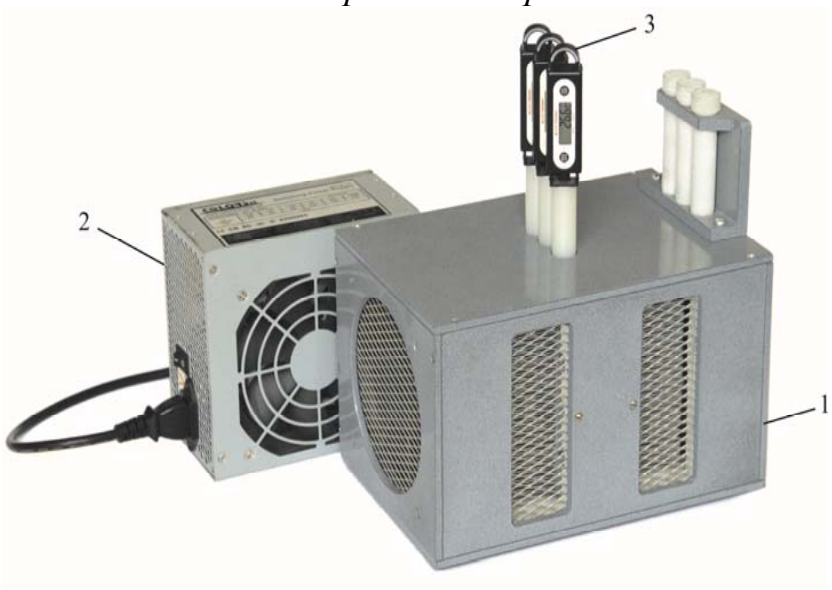




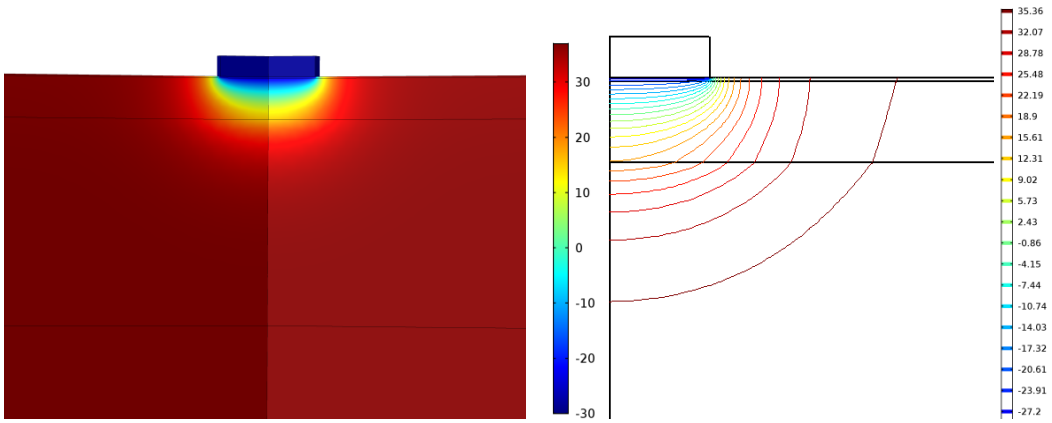
Розрахована функція керування струмом живлення I(t) термоелектричного модуля

Термоелектричний прилад для лікування захворювань шкіри

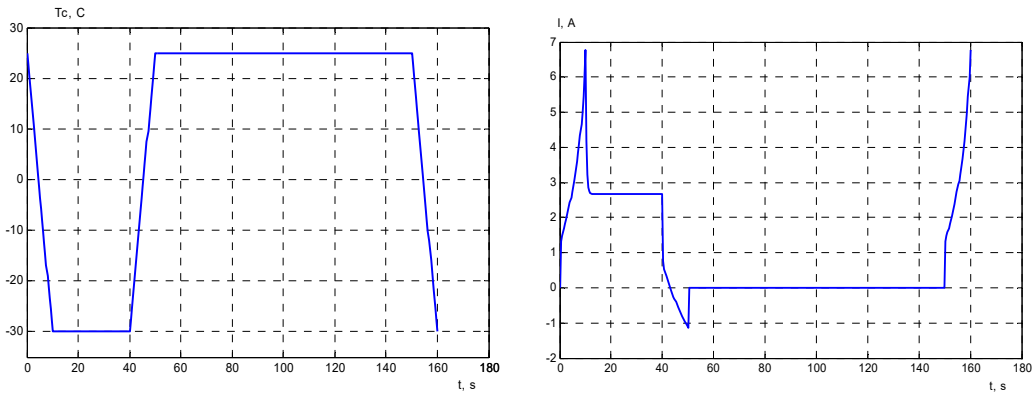
Термоелектричний прилад для лікування захворювань шкіри



Об'єктно-орієнтоване комп'ютерне моделювання



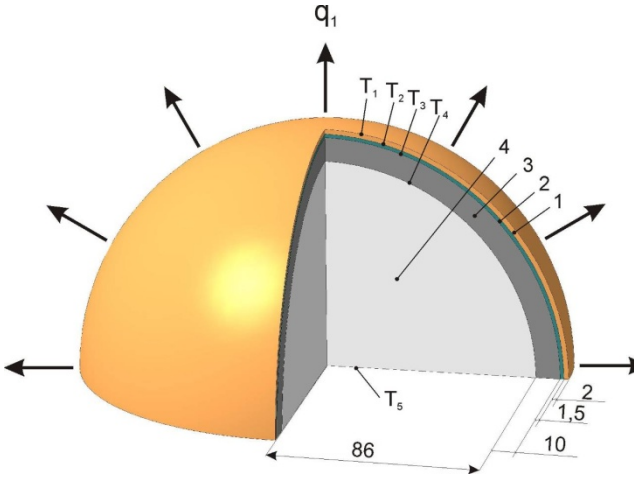
Охолоджуючий робочий інструмент



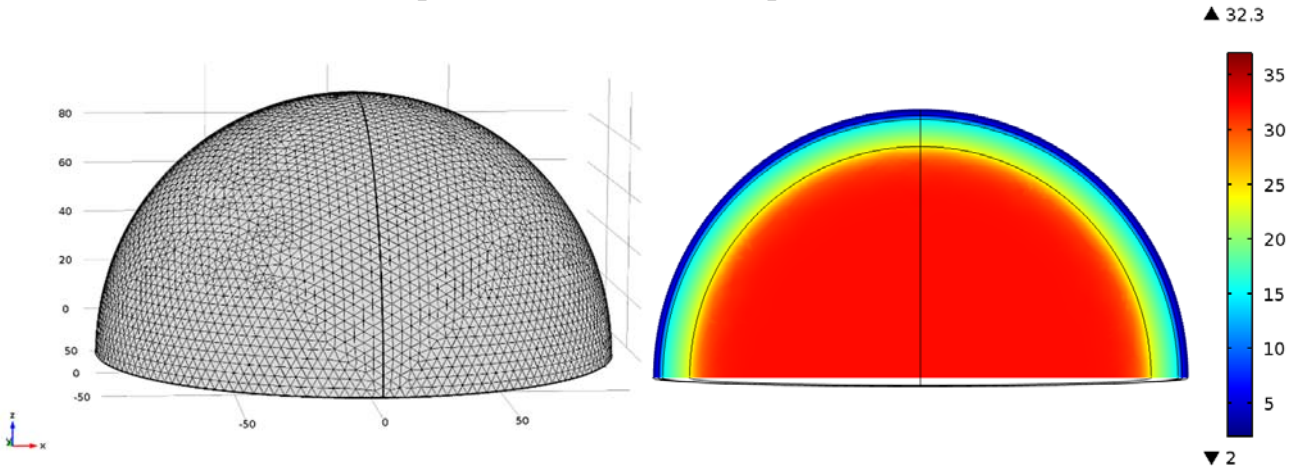
Задані часові залежності температури охолодження $T_c(t)$ та стуруму живлення $I(t)$ приладу для лікування захворювань шкіри

Термоелектричний прилад для охолодження голови людини

Фізична модель



Об'єктно-орієнтоване комп'ютерне моделювання



Охолоджуючий шолом

Термоелектричний блок

Прилад для охолодження голови людини

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ

1. Розвинуто інформаційно-енергетичну теорію термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку медичного призначення, яку використано для оптимізації конструкцій та енергетичних характеристик приладів на їх основі.
2. Розвинуто узагальнену теорію термоелектричного перетворення теплової енергії тіла людини для живлення малопотужної електронної медичної апаратури. Визначено закономірності розподілів теплових потоків тіла людини, теплообмінних процесів та механізмів теплопродукції в організмі людини.
3. Вперше побудовано теорію термоелектричних приладів охолодження для створення заданих динамічних змін температури і теплових потоків у біологічній тканині. Створена теорія оптимального керування динамічними тепловими процесами при лікуванні людини не має аналогів у світі. Побудовано теорію динамічних процесів у медичній термоелектричній апаратурі та методи її реалізації в конкретних медичних приладах.
4. Вперше розроблено узагальнену фізичну модель системи «термоелектричний перетворювач – тіло людини» з врахуванням теплофізичних властивостей біологічної тканини, кровообігу та процесів метаболізму.
5. Розроблено комп’ютерні методи моделювання теплових та електричних процесів у системі «термоелектричний сенсор – тіло людини» для розрахунку інформаційно-енергетичних характеристик термоелектричних сенсорів температури і теплового потоку. За допомогою комп’ютерних методів встановлено закономірності теплової взаємодії термоелектричних сенсорів та поверхні тіла людини.
6. Розроблено комп’ютерні методи моделювання теплових та електричних процесів у системі «термоелектричний перетворювач – тіло людини» для проектування та оптимізації конструкцій термоелектричних перетворювачів, що використовують теплову енергію людини. Встановлено доцільність використання динамічних режимів роботи для досягнення максимальної ефективності термоелектричних перетворювачів.
7. Розроблено комп’ютерні методи моделювання теплових та електричних процесів у системі «термоелектричний тепловий насос – тіло людини – блок керування електричним струмом». Застосовано метод комп’ютерного моделювання для визначення оптимальних часових функції керування струмом живлення термоелементів, якими забезпечуються задані залежності зміни температури охолодження і нагріву з часом у приладах медичного призначення.
8. Розроблено методику комп’ютерного моделювання розподілу температур у шкірі людини в динамічному режимі, що дає можливість прогнозувати результати локального температурного впливу на шкіру та визначати розподіли температури в різних шарах шкіри при наперед заданій довільній часовій функції зміни температури робочого інструменту Tf(t).

Отримані результати дають можливість прогнозувати глибину промерзання біологічної тканини при заданому циклічному температурному впливі.

9. Розроблено новий тип термоелектричного сенсора для одночасного вимірювання температури і теплового потоку поверхні тіла людини. Визначено особливості фізичних процесів у термоелектричних сенсорах температури і теплового потоку для медицини.
10. Розроблено спеціальну технологію виготовлення термоелектричних мікробатарей з підвищеною щільністю елементів на основі високоефективних напівпровідникових матеріалів, що значно спрощує та механізує методику виготовлення термоелектричних сенсорів теплового потоку та мікрогенераторів для живлення малопотужної медичної апаратури.
11. Розроблено конструкцію та виготовлено експериментальні зразки термоелектричної медичної апаратури з термоелектричними сенсорами та електронними реєстраторами з комп'ютерною обробкою результатів вимірювань для моніторингу температурного та теплового стану людини у реальному часі.
12. На основі проведених медичних випробувань визначені характеристики теплових процесів у тілі людини для експрес-діагностики запальних процесів та онкозахворювань на ранніх стадіях.
13. Розроблено конструкцію та виготовлено експериментальні зразки малопотужної електронної медичної апаратури з термоелектричними джерелами живлення, що використовують теплову енергію людини. Розроблені термоелектричні джерела живлення є оригінальними, за своїми характеристиками переважають вітчизняні та зарубіжні аналоги.
14. Застосовано результати фундаментальних досліджень теорії оптимального керування динамічними тепловими процесами при лікуванні людини для проектування та створення термоелектричних медичних приладів охолодження і нагріву, які за своїми характеристиками перевершують відомі зарубіжні аналоги. Технологічний рівень отриманих результатів істотно перевищує світовий, що забезпечує конкурентоспроможність вітчизняної термоелектричної продукції на міжнародному ринку.
15. Проведено клінічні випробування створеної термоелектричної медичної апаратури для діагностики та лікування різноманітних захворювань організму людини, зокрема запальних та післяопераційних процесів, онкозахворювань, офтальмологічних хвороб, захворювань шкіри тощо. Вперше створено методики лікування різноманітних захворювань шкіри холодом шляхом використання термоелектричних медичних приладів у комплексній терапії з лікарськими засобами.

Практична значимість отриманих результатів

полягає у створенні на основі проведених фундаментальних досліджень термоелектричної медичної апаратури, що за своїми характеристиками перевершує відомі світові аналоги та підвищує конкурентоспроможність вітчизняної продукції. Впровадження такої термоелектричної медичної апаратури надасть медикам ефективний засіб діагностики та лікування різноманітних захворювань організму людини.

Клінічні випробування розроблених термоелектричних приладів

ДУ "Інститут травматології і ортопедії НАМН України",
ДУ "Національний Інститут серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова НАМН України",
ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В.П.Філатова НАМН України»
ВДНЗУ «Буковинський державний медичний університет»

Результати випробувань свідчать про високу перспективність використання таких приладів у медичній практиці, що підтверджено відповідними актами. У подальшому планується постановка термоелектричної медичної апаратури на виробництво у ТОВ «АЛТЕК-М».

Академія медичних наук України
ДУ НАЦІОНАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ СЕРЦЕВО-СУДИННОЇ ХІРУРГІЇ ім.М.М.Амосова
Україна, 03680, м. Київ-110, Вул. М.Амосова 6
Тел.: (044) 275-40-22, 275-10-04
Факс: (044) 275-10-04

Academy of Medical Sciences of Ukraine
GF NATIONAL M.M.Amosov INSTITUTE OF CARDIO-VASCULAR SURGERY
6, M.Amosov street
03680 Kyiv-110, Ukraine
Tel.: (044) 275-40-22, 275-10-04
Fax: (044) 275-10-04

На №_____від_____
№ 1-54/526 від 31.01.13

АКТ
про використання термоелектричних вимірювачів теплових потоків та температури для медицини

Інститутом термоелектрики НАН та МОН молоді і спорту України проведені дослідження та розроблена апаратура медичного призначення для визначення температури та теплових потоків ділянок людського організму.

Згідно договору про творчу співдружність такі прилади передані для випробувань Національному Інституту серцево-судинної хірургії ім. М.М. Амосова. Експлуатація цих приладів підтвердила їх ефективність при визначенні температури крові у області серця та післяопераційних запальних процесів.

Було також встановлено широкі можливості застосування термоелектрики в хірургії серця шляхом використання пониженних температур при операціях і, в цілому, створення нових методів у хірургії серця, що переважають відомі світові аналоги.

Визначено шляхи для забезпечення серійного виробництва такої апаратури.

Директор

Академік НАН України
Г.В. Книшов

ПУБЛІКАЦІЇ

За темою наукової роботи опубліковано **90 робіт:**

- 30 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до науково-метричних баз даних Scopus та Google Scholar,
- 3 статті у авторитетних міжнародних журналах,
- 6 статей у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій,
- 15 статей у наукових фахових виданнях України, що не входять до науково-метричних баз даних
- 36 патентів України на корисні моделі.

МІЖНАРОДНІ КОНФЕРЕНЦІЇ, ФОРУМИ ТА СЕМІНАРИ

- XIII Міжнародному форумі з термоелектрики, **Україна, Київ, 2009**;
- The 9th European Conference on Thermoelectrics, **Thessaloniki, Greece, 2011**;
- The 31st International & 10th European Conference on Thermoelectrics, **Aalborg, Denmark, 2012**;
- VII Міжнародній школі з термоелектрики, **Яремче, Україна, 2012**;
- XV Міжнародному форумі з термоелектрики, **Таллін, Естонія, 2013**;
- VIII Міжнародній школі з термоелектрики, **Чернівці, Україна, 2014**;
- 12th European Conference on Thermoelectrics, **Madrid, Spain, 2014**;
- XVI Міжнародному форумі з термоелектрики, **Париж, Франція, 2015**;
- 16th International Balkan Workshop on Applied Physics, **Constanta, Romania, 2016**;
- 7th International Scientific and Technical Conference «Sensor Electronics and Microsystem Technologies», **Одеса, Україна, 2016**;
- 14th European Conference on Thermoelectrics, **Lisbon, Portugal, 2016**;
- XVII Міжнародному форумі з термоелектрики, **Белфаст, Північна Ірландія, 2017**;
- IX Міжнародній школі з термоелектрики, **Чернівці, Україна, 2017**.

РОЗРОБЛЕНА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА МЕДИЧНА АПАРАТУРА БУЛА ПРЕДСТАВЛЕНА НА БАГАТЬОХ ВІТЧИЗНЯНИХ ТА МІЖНАРОДНИХ ВИСТАВКАХ:

- Міжнародна спеціалізована виставка «PHARMComplEX-2012» (25-27 вересня 2012 року, Київ, Україна);
- Міжнародна спеціалізована виставка «BioMedComplEX-2013» в рамках IV Міжнародного медичного форуму «Інновації в медицині – здоров'я нації» (16-19 квітня 2013 року, Київ, Україна);
- Міжнародний науково-технологічний форум "НАУКА, ІННОВАЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЇ – 2013" (15-17 жовтня 2013 року, Київ, Україна);
- Міжнародна спеціалізована виставка «MEDICAEXPO» в рамках V Міжнародного медичного форуму «Інновації в медицині – здоров'я нації» (14-16 жовтня 2014 року, Київ, Україна);
- Міжнародна спеціалізована виставка «Наука та інновації для потреб оборони та національної безпеки України» (14-16 жовтня 2014 року, Київ, Україна);
- Міжнародна спеціалізована виставка "MEDICAEXPO" в рамках VII Міжнародного медичного форуму «Інновації в медицині – здоров'я нації» (19-21 квітня 2016 року, Київ, Україна);
- XXI Міжнародна виставка індустрії безпеки «БЕЗПЕКА 2016» (18-21 жовтня 2016 року, Київ, Україна);
- Виставка інновацій і науково-технічних розробок НАН України та Міжнародний Форум «INNOVATION MARKET» (22-24 листопада 2016 року, Київ, Україна);
- Міжнародна виставка в галузі охорони здоров’я "MEDICAEXPO" в рамках VIII Міжнародного медичного форуму «Інновації в медицині – здоров'я нації» (25-27 квітня 2017 р., Київ, Україна);
- Виставка-презентація наукових досягнень установ НАН України в рамках XII Всеукраїнського фестивалю науки (16-18 травня 2018 року, Київ, Україна);
- Ювілейна виставка-презентація наукових та науково-технічних розробок установ НАН України, присвячена до 100-літнього ювілею НАН України (6 грудня 2018 р., Київ, Україна).

Участь у Міжнародних виставках по медичній тематиці

Отримано дипломи за активну участь та вагомі наукові розробки, а також сертифікат за впровадження сучасних досліджень медичної науки в практику охорони здоров'я України!