

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

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

№ 1

2016

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

П.І. Баранський

Б.І. Стадник

Л.М. Вихор

Ю.М. Лобунець

В.В. Лисько

О.І. Рогачова

С.В. Мельничук

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

А.І. Касіян, *Молдова*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л.П. Булат, *Росія*

М.І. Федоров, *Росія*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Ю. Грін, *Німеччина*

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

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

Зав. редакцією О.В. Пуганцева

Редактори

Л.М. Вихор, В.М. Крамар, В.М. Катеринчук, О.Я. Лусте, А.О. Фаріон, О.О. Боднарук

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

Адреса редакції:

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

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

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

Підписано до друку: 25.03.2016 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

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

© Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України, 2016

ЗМІСТ

Загальні проблеми

Кадзікава Т., Фунахаши Р. Новітні розробки в галузі термоелектричної технології вироблення електроенергії в Японії 5

Прибила А.В. Фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини (частина перша) 16

Теорія

Черкез Р.Г. Про моделювання проникних термоелементів 41

Матеріалознавство

Анухин А.І., Разінков В. В. Кристалізація твердих розчинів телуридів вісмуту і сурми зонною плавкою і нормальною кристалізацією 47

Конструювання

Михайловський В.Я., *Максимук М.В.* Комп'ютерне проектування термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі 52

Константинович І.А., Рендигевич О.В. Про ефективність гіротропних термоелементів у режимі генерації 66

Надійність

Антонюк В.В., Скрипський І.М. Контактні комутаційні структури підвищеної надійності для ТЕМ на основі телуриду вісмуту 72

Термоелектричні вироби

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" 76

Анатичук Л.І., Гаверлюк М.В., Лисько В.В., Тюменцев В.А. Автоматизований вимірювальний комплекс «АЛТЕК-10003» для визначення термоелектричних властивостей злитків матеріалів 85

УДК 537.32

Кадзікава Т., Фунахаші Р.



Кадзікава Т.



Фунахаші Р.

¹Технологічний інститут Шонан,
²Національний інститут передової промислової
науки й техніки

**НОВІТНІ РОЗРОБКИ В ГАЛУЗІ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЯПОНІЇ**

Технологія термоелектричного генерування електроенергії (ТЕГЕЕ) у Японії сприймається як одна з інноваційних енергетичних технологій, що сприяють становленню суспільства комфортного життя в реальному світі в найближчому майбутньому під тиском існуючих глобальних екологічних і серйозних енергетичних проблем (3E + S). За підтримки держави або її приватних підприємств у Японії активно виконуються науково-дослідні проекти за технологією ТЕГЕЕ: 1) дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій для утилізації невикористаного тепла в соціальному середовищі, 2) розробка додатка ТЕГЕЕ для газової цементаційної печі, 3) розробка термоелектричного генерування з використанням відпрацьованого тепла на сталеливарному заводі, 4) розробка трубчастого термоелектричного генератора, 5) розробка системи опріснення на сонячній енергії з використанням технології термоелектричного генерування електроенергії, 6) практична розробка термоелектричного генератора без рідких металів для рекуперації тепла вихлопних газів автомобілів, 7) практичне застосування багатосарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним живленням. Як перспектива на майбутнє – такі аспекти, як вдосконалені наноструктурні ТЕ матеріали, органічні/гібридні ТЕ матеріали, наука про надійність, техніка безпеки, у тому числі аналіз загроз, розглянуті з метою планомирного впровадження додатків ТЕГЕЕ у практику.

Ключові слова: технології вироблення електроенергії, наноструктурні ТЕ матеріали, термоелектричне генерування.

Thermoelectric power generation (TEPG) technology in Japan has been noticed as one of the innovative energy technologies in order to contribute to the establishment of comfortable society and individual life in the real world in the near future due to push-forward by globally environmental issues and serious energy problems (3E + S). Several R&D projects on TEPG technology in Japan have been actively ongoing such as 1) Thermal Management, Materials and Technology Research to utilize unused heat in the social environment, 2) Development of TEPG Application to a Gas Carburizing Furnace, 3) Development of Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, 4) Development of Tubular Thermoelectric Generator (TTEG), 5) Development of Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, 6) Practical Development of Rare-Metal-Free Thermoelectric Generator for Automotive Waste Heat Recovery, 7) Practical-use of Multilayer type Thermoelectric Generator for Self-powered Wireless Sensor Network Node supported by government and /or private enterprise funds. As the future prospects several aspects, such as advanced nano-structured TE materials, organic/hybrid TE materials, durability science, safety engineering including hazard analysis have been discussed aiming the smooth promotion of TEPG applications to the real world.

Key words: thermoelectric power generation, nano-structured TE, thermoelectric generation.

Вступ

Відповідно до паризької угоди – рамкової конвенції ООН про зміну клімату №21 (COP21) і базового науково-технічного плану Японії №5 (2016 – 2020), перед Японією поставлено завдання впоратися із серйозними енергетичними проблемами з так званих (3E + S), які розшифровуються як енергетична безпека (E), збереження навколишнього середовища (E), активація економіки (E) і безпека (S), у зв'язку з обмеженістю викопних ресурсів, невеликою територією країни, збереженням неймовірно високого рівня валового національного продукту й підвищенням рівня розуміння безпеки здоров'я й загроз [1]. Загальний ККД використання енергії по всій енергетичній системі в Японії становив усього близько 34 %. Це означає, що 66 % енергії, що поставляється, виділяється в навколишнє середовище у вигляді низькопотенційної теплової енергії. Тому є розуміння того, що необхідно терміново розробити передові технології тепла на основі 3 R (Reduce (зниження), Reuse (повторне використання) і Recycle (утилізація)). За цих обставин технологія ТЕГЕЕ сприймається як одна з інноваційних енергетичних технологій, що сприяють створенню суспільства комфортного життя в найближчому майбутньому. Тому державні організації, такі як Міністерство економіки, торгівлі й промисловості (METI), Міністерство освіти, культури, спорту, науки й техніки (MEXT) і Міністерство навколишнього середовища (MOE), а також різні галузі промисловості, такі як сталеливарна, хімічна, інформаційна, енергетична і т.д. мають намір приділити увагу дослідженням і розробкам за різними видами додатків ТЕГЕЕ. У Японії виконуються науково-дослідні проекти в сфері технології ТЕГЕЕ:

1. Дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій для утилізації невикористаного тепла в соціальному середовищі.
2. Розробка додатка ТТВЕ для газової цементаційної печі.
3. Розробка термоелектричного генерування з використанням відпрацьованого тепла на сталеливарному заводі.
4. Розробка трубчастого термоелектричного генератора.
5. Розробка системи опріснення на сонячній енергії з використанням технології термоелектричного генерування електроенергії.
6. Практична розробка термоелектричного генератора без рідких металів для рекуперації тепла вихлопних газів автомобілів.
7. Практичне застосування багаточарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним живленням і т.д.

У даній статті наведено аналіз новітніх розробок в області термоелектричної технології в Японії, а також розглянуто перспективи комерціалізації додатків ТТВЕ.

Деякі актуальні теми досліджень і розробок у Японії.

Дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій (Thermat)

Це підтримуваний урядом 10-літній проект наукових досліджень і розробок, мета якого – створення нових вискоелективних систем, здатних забезпечити значне зниження споживання енергії й, в остаточному підсумку, допомогти раціональному використанню енергії в багатьох аспектах соціальних систем [2]. Проект Thermat здійснюється з 2013 року під керівництвом Х. Обара Національним інститутом передової промислової науки й технології (AIST) і складається з 8 основних розділів:

1. Технологія акумулювання тепла.
2. Технологія теплозахисту.
3. Технологія теплоізоляції.

4. Технологія термоелектричного перетворення.
5. Технологія рекуперації відпрацьованого тепла.
6. Технологія теплових насосів.
7. Технологія керування тепловим процесом.
8. Базова енергетична технологія.

Загальний бюджет на дослідження й розробки в 2015 році становив близько 15.4 млн \$, у тому числі близько 1.7 ~ 2.0 млн \$ на розділ технології термоелектричного перетворення.

Завдання щодо розділу технології термоелектричного перетворення полягає в наступному(кінцева мета в 2023 році):

1. Ствердження технології ТЕГЕЕ модулів на рівень $ZT = 4$ для систем неорганічних матеріалів.
2. Ствердження технології ТЕГЕЕ модулів на рівень $ZT = 2$ для систем органічних матеріалів, включаючи гібридні. Для досягнення кінцевої мети проміжна мета передбачає створення систем удосконалених ТЕГЕЕ матеріалів на основі неорганічних матеріалів $ZT = 2$ і органічних матеріалів $ZT = 1$ до 2018 року.

Шість вітчизняних частин компаній, AIST і кілька університетів об'єдналися в групу ТЕГЕЕ.

Проект ТЕГЕЕ включає 8 позицій:

1. Високоєфективні термоелектричні матеріали й пристрої на базі нанотехнології й/або технології шаруватих структур від AIST.
2. Термоелектричні пристрої й матеріали на основі високомолекулярного полімеру від AIST і Університету Осака.
3. Термоелектричний пристрій, що використовує вуглецеву систему, таку як вуглецева нанотрубка (УНТ), графіт і т.д. від AIST; зразок гнучкого термоелектричного пристрою на основі УНТ, отриманого за допомогою друкованої технології, наведено на рис. 1;

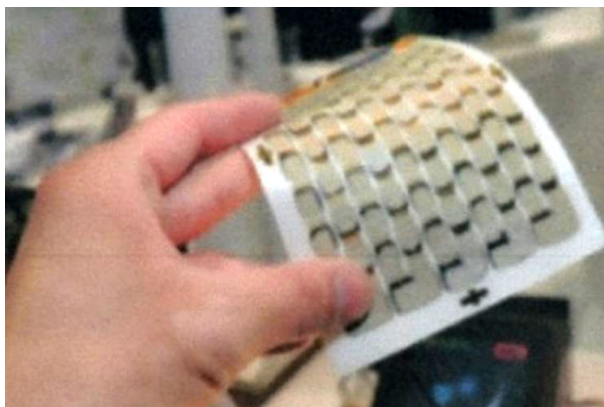


Рис. 1. Гнучкий термоелектричний пристрій на основі вуглецевої нанотрубки.

4. Термоелектричний пристрій на основі довговічних скутерудитних матеріалів, що забезпечують $ZT > 1.1$, тобто коефіцієнт перетворення 8 %, від FURUKAWA, як показують експериментальні результати щодо довговічності скутерудитних термоелектричних модулів на рис. 2.
5. Система рекуперації відпрацьованого тепла класу 5 – 10 кВт із використанням технології термоелектричного генерування електроенергії від HITACHI.
6. Гнучкі органічні термоелектричні матеріали й пристрій, що контролюють орієнтацію й розподіл УНТ і розробка вдосконаленого гібрида на основі технології одержання наночасток від FUJIFILM.

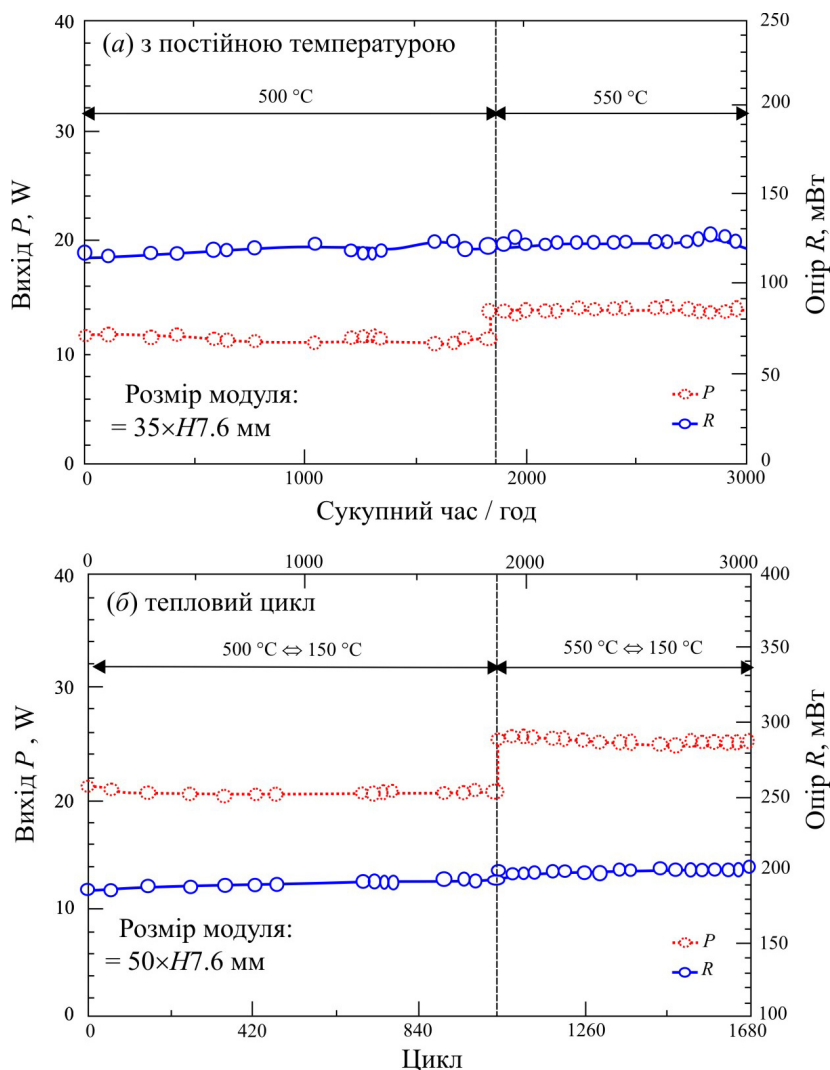


Рис. 2. Результат випробування на довговічність скутерудитних термоелектричних модулів для (а) режиму постійної температури й (б) режиму теплового циклу.

7. Високоєфективний спечений клатратний пристрій з використанням технології електродного зварювання для практичного застосування від FURUKAWA DENKO.
8. Силіцидні термоелектричні матеріали, пристрої й оптимальні системи для автомобільних додатків від Університету Ямагучи й Nippon Thermostat Inc.

Розробка технології термоелектричного генерування електроенергії (ТЕГЕЕ) із застосуванням рекуперації відпрацьованого тепла сталеплавильної системи

Сталеливарна промисловість Японії досягла значного зниження споживання енергії для одержання високоякісної сталі й прагне до подальшого підвищення ефективності цієї технології. Встановлено, що технологія рекуперації відпрацьованого тепла дуже важлива для кожної виробничої ділянки сталеливарного заводу. Технологія термоелектричного генерування електроенергії одержала перевагу з погляду надійності, компактності й екологічної безпеки.

Демонстраційний експеримент для системи ТЕГЕЕ класу 10 кВт, установлені на лінії безперервного лиття JFE, було проведено з метою комерціалізації великомасштабного застосування ТЕГЕЕ класу 100 кВт на основі відомого генераторного модуля телуриду вісмуту KELK, як показано на рис. 3.

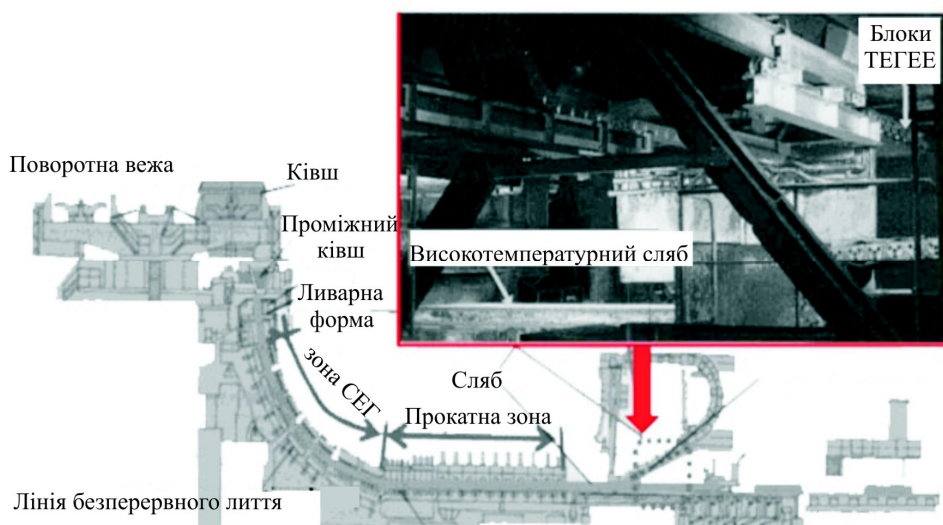


Рис. 3. Лінія безперервного лиття JFE із установленими блоками ТТВЕ.

Цей проект здійснений командою JFE, KELK й університетом Хоккайдо за часткової підтримки NEDO та індивідуального фонду по закінченні проекту NEDO [3]. Джерелом високотемпературного тепла служить теплота випромінювання від сляба, що рухається, температура якого становить близько 1073 К ~ 1273 К, а джерелом низької температури служить заводська вода приблизно кімнатної температури. Система ТЕГЕЕ має 2 м завширшки й 4 м у довжину й складається з 56 блоків ТТВЕ, як показано на рис. 4, для генерування близько 10 кВт постійного струму із встановленим на ній пристроєм аварійних контрзаходів.

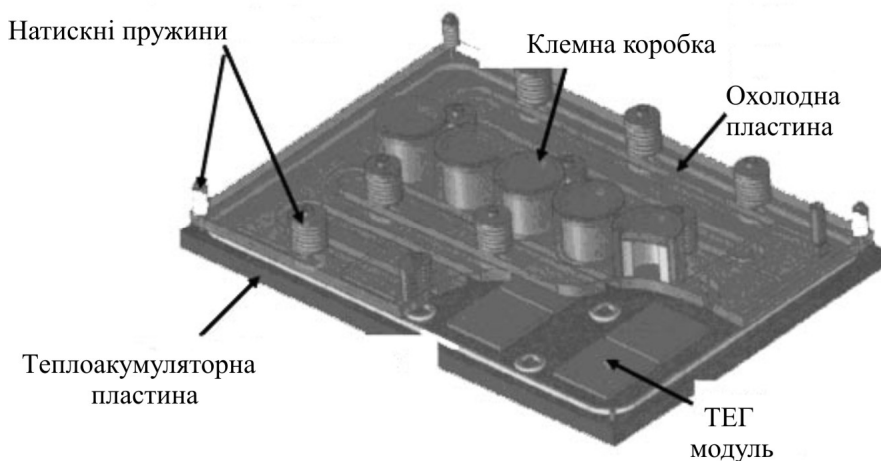


Рис. 4. Компоненти блока ТЕГ (розмір: 400мм × 280мм), що складаються з 16 промислових вискоефективних модулів ТЕГ 50 мм × 50 мм × 4.2мм виробництва KELK.

Вихідна потужність цієї технології термоелектричного генерування електроенергії становить близько 9 кВт (тобто 1.7 кВт/м² на підставу модуля) за температури сляба 1188 К і ширині сляба 1.7 м. Експериментальні результати задовільно узгоджуються з розрахованими значеннями, отриманими в ході аналізу з використанням моделювання, як показано на рис. 5.

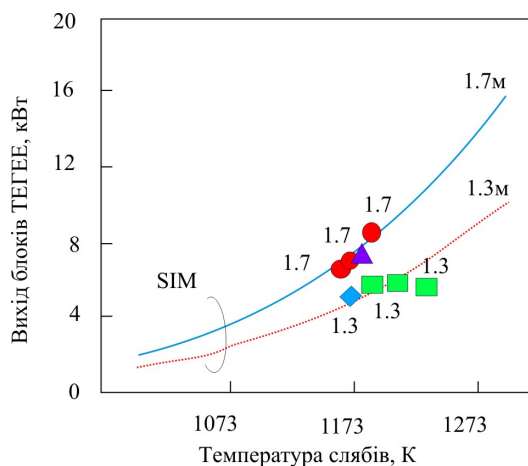


Рис. 5. Експериментальні результати виходу потужності залежно від температури сляба для системи ТТВЕ JFE у порівнянні з імітаційними моделями.

1. ● – ширина плити = 1.7 м, експеримент;
2. ▲ – ширина плити = 1.6 м, експеримент;
3. ◆ – ширина плити = 1.4 м, експеримент;
4. ■ – ширина плити = 1.3 м, експеримент;
5. — (синя) – ширина плити = 1.7 м, експеримент;
6. ■■■■ (червоні) – ширина плити = 1.3 м, експеримент.

У майбутньому, безсумнівно, будуть отримані більш високі значення вихідної потужності завдяки розробці надійних ТЕГЕЕ модулів на рівні температури, вищій від верхньої температурної межі для модулів $Bi-Te$. Оскільки на даному етапі температура поверхні ТЕГЕЕ модулів на основі $Bi-Te$ обмежується, щоб уникнути теплової деградації.

Дослідження й розробки системи опріснення на сонячних батареях із застосуванням технології термоелектричного генерування електроенергії

Недолік прісної води – одна з найбільших соціальних проблем для всього світу в найближчому майбутньому. Виникла нагальна потреба розробки економної технології системи опріснення в поєднанні з поновлюваними джерелами енергії, такими як сонячна енергія, без споживання великого обсягу ресурсів викопного палива.

Виходячи із принципу простоти й безперервності роботи без технічного обслуговування, високої якості свіжої води, концепція гібридної системи багатоступінчастого опріснення й зворотного осмосу на сонячних батареях із застосуванням технології термоелектричного генерування електроенергії була запропонована конференцією TDS, заснованої декількома приватними компаніями й університетами під керівництвом професора І. Хорита (Токійський технологічний інститут), з міжнародним співробітництвом з 2010 року [4]. Пропонована система складається з установки концентрованої сонячної енергії з високотемпературним (близько 850 К) накопичувачем теплової енергії, новим ТЕПГ (термоелектричним і парогенератором) і двох видів систем опріснення (багатоступінчастого опріснення й зворотного осмосу) як основних підсистем, які показані на рис. 6.

Для ТЕПГ гаряча сторона ТТВЕ обладнань нагрівається високотемпературним сольовим розплавом з накопичувача теплової енергії, що живиться блоком концентрованої сонячної енергії, а холодна сторона ТТВЕ обладнань прохолоджується більшим схованим теплом постійно подаваної води для одержання низькотемпературної пари, яка використовується першим каскадом блока багатоступінчастого опріснення.

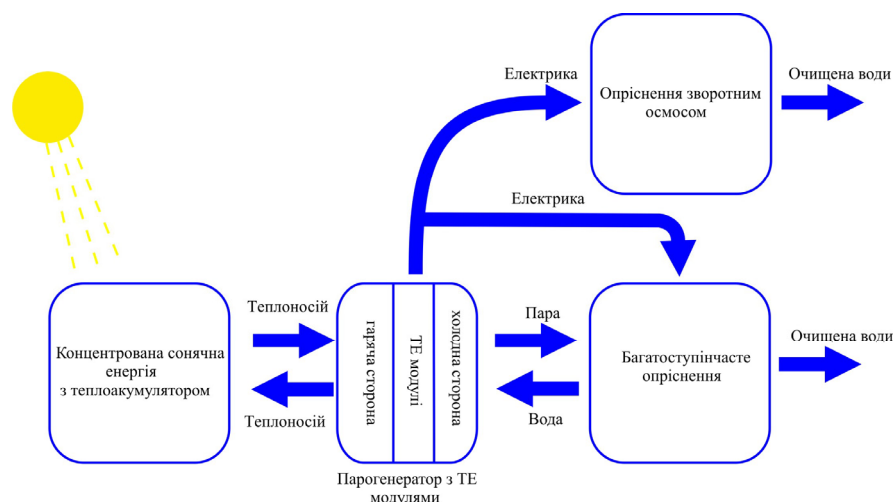


Рис. 6. Принцип системи опріснення на сонячних батареях із застосуванням термоелектричного генерування потужності.

Вся витрачена теплова енергія використовується для охолодження ТЕГЕЕ обладнань у системі ТЕПГ, ефективно й безупинно утилізується в системі, тоді як для систем ТЕГЕЕ, як звичайно, вода, що проохолоджує холодну сторону ТЕ обладнань, відводиться від системи в навколишнє середовище. Аналіз здійсненості з урахуванням оцінки вартості показав, що запропонована система опріснення має високий потенціал, щоб бути найбільш конкурентоспроможним рішенням, принаймні на Середньому й Близькому Сході. Невеликий експеримент для підтвердження правильності концепції системи ТЕПГ як найбільш важливого компонента було проведено з метою підтвердження характеристик системи, таких як статичний тепловий баланс, динамічний відгук на баланс маси, які необхідні для точного проектування прототипу системи опріснення, що використовує сонячну енергію, в поєднанні із системою ТЕГЕЕ. Експериментальну установку показано на рис. 7.



Рис. 7. Експериментальна установка підтвердження концепції.

Практичне застосування багатосарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним джерелом живлення

Murata Manufacturing Co., Ltd на власні засоби розробила термоелектричний генератор з метою відбору енергії для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним джерелом живлення й практичного використання із застосуванням багатосарового керамічного конденсатора для виробництва ТЕГЕЕ [5]. Термоелектричний пристрій складається з композита $Ni_{0.9}Mo_{0.1}$ і $Ni_{1-x}Mo_x$ для p -типу, і $(La,Sr_{1-x})TiO_3$ для n -типу. У термоелектричному пристрої матеріали p - і n -типу з'єднані безпосередньо без електродного металу. Між ними вставлений тонкий шар ізолятора $(Yb, Zr)O_2$. Ці матеріали були обрані завдяки однаковим

коефіцієнтам теплового розширення, що знижують термічну напругу між ними. Зразок ТТВЕ пристрою показано на рис. 8.

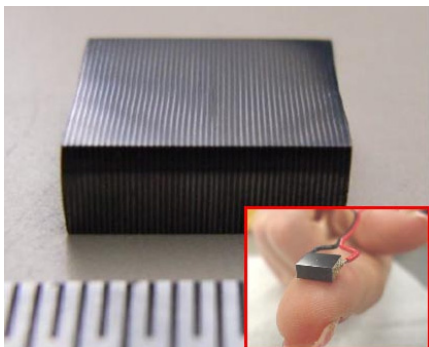


Рис. 8. Зразок ТТВЕ модуля багатопшарового типу для ТТВЕ пристрою акумулювання енергії.

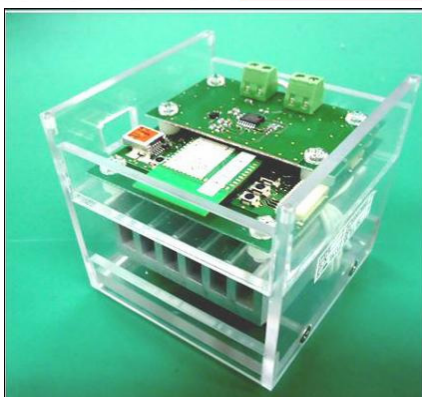


Рис. 9. Промисловий прототип вбудованого в ТТВЕ бездротового сенсорного вузла.



Рис. 10. Установка вбудованого в ТТВЕ бездротового сенсорного вузла на трубу.

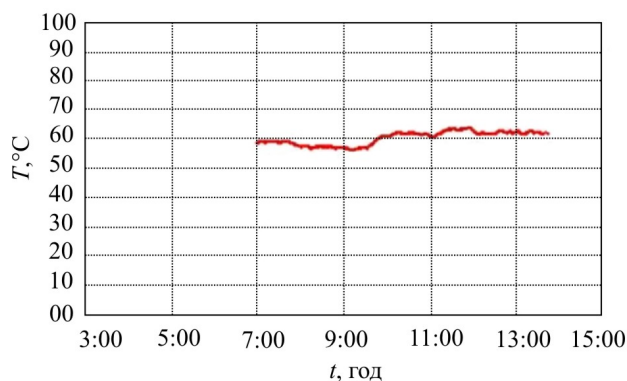


Рис. 11. Демонстраційний результат монітора температури труби.

Промисловий прототип, ТЕГЕЕ інтований з ТЕГЕЕ бездротового сенсорного вузла, був установлений, як показано на рис. 9, і закріплений на заводському сталевому трубопроводі, як показано на рис. 10. Силкові характеристики термоелектричного пристрою на 50 пар розміром 6.0 мм × 6.9 мм × 2.7 мм виглядають у такий спосіб: напруга холостого ходу й максимальна вихідна потужність становлять відповідно 52.3 мВ і 105 мкВт за різниці температур 10 К. Демонстраційні

випробування успішно проводилися упродовж більше як 12 місяців з метою контролю температури через кожні 20 секунд, як показано на рис. 11.

Майбутні перспективи

Ми займалися численними дослідженнями з метою вдосконалювання технології ТЕГЕЕ для практичного застосування паралельно з описаними вище розробками для академічної науки й промислового сектора за підтримки METI, NEDO, MEXT, JST і/або часток підприємств:

- Складна наноструктурна ТЕ технологія для збільшення ZT методом «знизу-нагору» ($ZT > 4$);
- Розробка поліпшених граничних/гібридних ТЕ матеріалів;
- Прогрес науки про надійність і техніки безпеки в області ТЕГЕЕ;
- Затвердження міжнародної стандартизації для виміру ТЕГЕЕ.

Складна наноструктурна технологія ТЕ обладнань заснована на тому, що наноструктура для Mg легованого $PbTe$ не погіршує електричні властивості, такі як коефіцієнт Зеебека й електропровідність, але незалежно знижує ґраткову теплопровідність, як встановлено AIST [6]. Отже, для оптимального наноструктурного ТЕ пристрій Mg легованого $PbTe - 4\% Na$ максимальне значення ZT можна підвищити до 1.8 за 810 К у порівнянні з максимальним значенням ZT 1.1 за 710 К для нелегованого матеріалу, як показано на рис. 12.

Зразок ТЕ модуля, що складається з восьми пар наноструктурних спечених гілок Mg легованого $PbTe - 4\% Na$ p -типу й спечених гілок $PbTe - 0.2\% PbI_2$ n -типу був успішно виготовлений і генерував 3.55 Вт за 570 К за різниці температур (високої температури 873 К і низької температури 303 К на електроді, відповідно). Визнано важливим, щоб контрольовані наноструктурні технологічні прийоми були встановлені для всіх систем термоелектричних матеріалів за формою, розміром, густиною, компонентами, і т.д. Значна увага приділялася останнім часом полімерним термоелектричним матеріалам, за такі їх переваги, як низька вартість, простота збирання, легка вага і доступність ефективного методу висхідного проектування для розширення областей застосування термоелектрики.

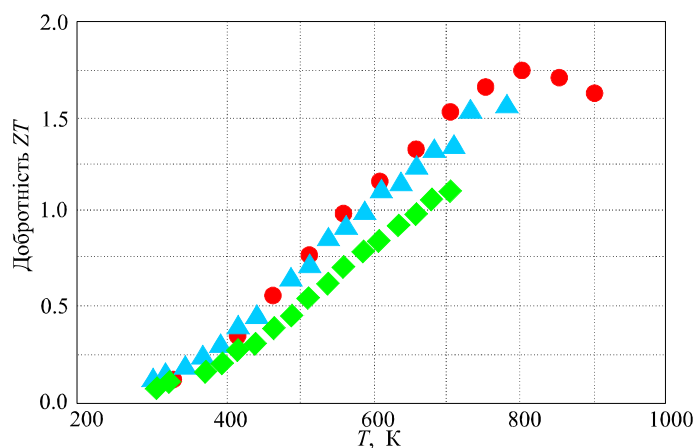


Рис. 12. Ефект підвищення ZT завдяки наноструктурних технологій для системи $PbTe - 4\% Na$.

1. ● – Mg – легований $PbTe - 4\% Na$ спечений;
2. ▲ – Mg – легований $PbTe - 4\% Na$ плавлений;
3. ◆ – $PbTe - 4\% Na$ плавлений.

Було досліджено потрійні органічні-неорганічні гібридні системи, що походять із провідного полімера (Ni – етилететратіонат: $Ni - pett$), ПВХ (полівініл хлорид) і УНТ (вуглецева нанотрубка) і

отримано помітні експериментальні результати ZT 0.28 за 340 К у порівнянні з характеристиками плівки PEDOT-PSS (полі 3, 4 – етілендіоксітіофен-полі стіросульфонат) і плівки PEDDOT-TSS/CNT, як показано на рис. 13 групою Toshiba [7, 8].

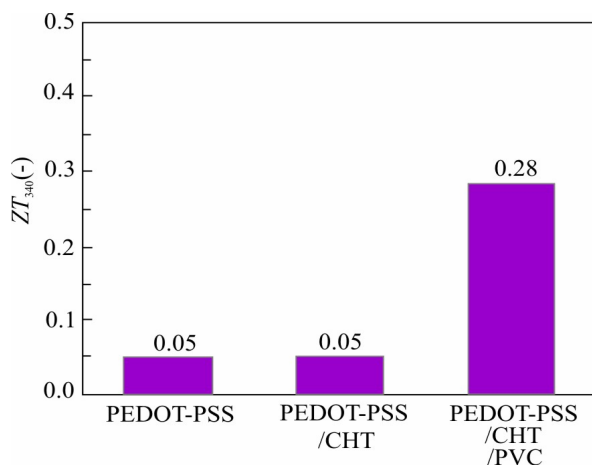


Рис. 13. Ефект поліпшення ZT для потрібної органічної-неорганічної гібридної системи в порівнянні із системами PEDOT-PSS і PEDOT-PSS/CNT.

Можна стверджувати, що новітні експериментальні результати досліджень за різними видами органічних термоелектричних матеріалів, включаючи гібридні системи, будуть досить перспективні в майбутньому.

Екологічно чисті термоелектричні матеріали вважаються дуже важливими для внеску термоелектричних додатків у реальний світ. У Японії здійснюється багато науково-дослідних робіт з термоелектричних матеріалів, що не містять телуру таких, як системи силіцидів, оксидів, сульфідів, включаючи колузіти [9], гейслерові сполуки, у тому числі напівгейслерові, скутерудити, клатрати, і т.д.

Для планомірного впровадження технології термоелектричного генерування електроенергії в практику вона має заздалегідь одержати суспільне визнання. Це значить, що ми повинні дати наочне підтвердження контролю факторів ризику для систем ТЕГЕЕ паралельно з розробкою науки про надійність [10] і техніку безпеки в області ТЕГЕЕ [11]. Необхідно зробити аналіз загроз і включити заходи протидії в систему ТЕГЕЕ ще на етапі демонстраційних випробувань. Для аналізу загроз виділяються три види загроз, обумовлених робочим навантаженням на підсистеми й компоненти, тимчасовою залежністю в процесі експлуатації й взаємозв'язком компонентів трьох основних підсистем: головною системою генерування електроенергії, системою передачі-перетворення енергії й системами джерел і відводу тепла. На практиці, на демонстраційній установці ТЕГЕЕ класу 10 кВт, що використовує відпрацьоване тепло від сталеливарного заводу JFE, і блоках ТЕГЕЕ, установлених на кожній цементній печі заводу з виробництва зубчастих передач Awazu, Komatsu Ltd., встановлено кілька резервних підблоків для захисту в першу чергу головної системи й систем ТТВЕ від серйозних неполадок у роботі. Важливо підкреслити, що системи ТЕГЕЕ з орієнтацією на ринок мають поступово піднятися до суспільного життя.

На закінчення необхідно відзначити, що для утвердження на практиці нової технології, такої як термоелектрика, найважливіше значення має людський фактор. Число членів Термоелектричного товариства Японії з кожним роком зростає й 2015 року становило більше як 500. У країні зберігається високий рівень досліджень і розробок в області термоелектрики. Наприклад, у Міжнародній конференції з органічної і гібридної термоелектрики, що відбулася в Кіото в січні 2016 року, взяло участь близько 150 людей.

Заключні зауваження

З одного боку, у дослідженнях і розробках із покращенням ТЕ характеристик різних систем ТЕ матеріалів спостерігався стійкий прогрес. Щорічно повідомляються значущі експериментальні результати

для ТЕ матеріалів, таких як сульфідів, самозібрані й штучні наноструктурні ТЕ матеріали, і гібридні органічні ТЕ матеріали.

З іншого боку, демонстраційні випробування систем ТЕГЕЕ, що використовують модулі $Bi - Te$, були пов'язані з енергосистемою для підтвердження її надійності для систем класу 500 Вт і систем класу 10 кВт. Вони змогли дати нам перспективу реалізації практичного використання для системи ТТВЕ системи класу понад 100 кВт. Вбудований в ТЕГЕЕ бездротовий сенсорний вузол установлений для етапу практичного застосування як додаток ТЕГЕЕ в області збирання енергії.

Системи ТТВЕ наблизилися до сучасної стадії практичних систем термоелектричних генераторів. На цій стадії будуть надзвичайно необхідні пошуки про надійність, техніку безпеки й різні оцінки. Можна вважати, що в найближчому майбутньому технологія ТЕГЕЕ може стати незамінною базовою технологією для створення високоефективної енергетичної системи у світі.

Подяка

Автори висловлюють сердечну вдячність за сумлінну співпрацю таким дослідникам: д-р Х. Обара (AIST), проф. К. Коумото (Нагойський університет), д-р М. Мікамі (AIST), проф. Х. Нішіно (Нагойський технологічний інститут), п. Н. Учіяма (Atsumitec), д-р Х. Кайбе (KELK), д-р Х. Хачівума (KELK), д-р Т.Канно (Panasonic), проф. І. Хоріта (Токійський технологічний інститут), п. А. Ямамото (AIST), проф. Т. Ііда (Токійський університет), і д-р Т.Накамура (Murata Manufacturing Co., Ltd.).

Література

1. www8.cao.go.jp.
2. www.thermat.jp/.
3. T.Kuroki, K.Kabeya, K.Makino, T.Kajihara, H.Kaibe, H.Hachiuma, H.Matsuno, and A.Fujibayashi, Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, *J. of Electronic Materials* 43 (6), 2405 –2410 (2014).
4. Y.Saito, M.Inomata, T.Oono, T.Kannari, H.Hachiuma, R.Chu, Y.Horita, Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, *Proc. of the 3rd Joint SQU-JCCP Environment Symposium, Muscat, Oman, 2010*.
5. T.Nakamura, Fabrication of Multi-Layer Type Thermoelectric Modules using Multi-Layer Co-fired Ceramics (MLCC) Process and Application for Energy Harvesting, *Thermoelectric Power Generation System Technology*, 226 – 242, SST Press, 2013.
6. M.Ohta, Matured but Novel $Pb - Te$ Thermoelectric Material: Marvelous Performance due to the Nano-Structure Technology, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86(3), 213 – 220(2016).
7. A.Yoshida, N.Toshima, Gold Nanoparticles and Gold Nanorod Embedded PEDOT:PSS Thin Films as Organic Thermoelectric Materials, *J. of Electronic Materials* 43(6), 1492 – 1497(2014).
8. N.Toshima, Thermoelectric Performance of Organic Materials Including Hybrid Systems, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology* 86(3), 221 – 229 (2016).
9. K.Kim, K.Suekuni, H.Nishiata, M.Ohta, H.Tanaka, and T.Takabatake, High Thermoelectric Performance in Coulsites $Cu_{26-x}Zn_xV_2M_6S_{32}(M = Ge, Sn)$, *Extended Abstract of TSJ 2014*, 27, 2014.
10. K.Nagase, A.Yamamoto, Development of Durability Testing for Thermoelectric Power Generation Module, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86 (3), 230 – 236 (2016).
11. T.Kajikawa, Present Status on Thermoelectric Power Generation Systems and their Safety, *J. of Japan Society*.

Надійшла до редакції 27.01.2016



Прибила А.В.

Прибила А.В.

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

ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ІНДИВІДУАЛЬНИХ КОНДИЦІОНЕРІВ ДЛЯ ЛЮДИНИ (частина перша)

В роботі розглядаються перспективи використання індивідуальних кондиціонерів для людини, якими може бути здійснена економія енергетичних ресурсів, зменшення термічного забруднення навколишнього середовища та покращення умов проживання людини. З метою визначення можливостей розробки раціональних варіантів кондиціонерів здійснено їх класифікацію за способом кондиціонування та призначенням. У результаті класифікації знайдено майже 20 нових конструктивних можливостей кондиціонерів може бути корисним при розробці варіантів кондиціонерів як масового, так і спеціального призначення. З аналізу цих можливостей випливає перспективність використання термоелектричного охолодження або нагріву у індивідуальних кондиціонерах для людини. Розглянуто ці використання як перспективний засіб масового застосування термоелектрики.

Ключові слова: тепловий насос, термоелектрика, кондиціонер, фізична модель.

This paper is focused on the prospects of using personal air-conditioners that are capable of saving energy resources, reducing environment thermal pollution and improving living standards. With a view to determine possible development of rational variants of air-conditioners, they have been classified according to the method and purpose of air-conditioning. From the classification more than 20 new design opportunities of air-conditioners have been found. They can be useful in the development of mass and special-purpose air-conditioners. From the analysis of these opportunities follows the promising outlook for the use of thermoelectric cooling or heating in personal air-conditioners. Such applications are defined as a promising way of wide use of thermoelectricity.

Key words: heat pump, thermoelectricity, air conditioning, physical model.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Загальновідомою є тенденція до економії енергоресурсів для покращення екологічного стану на Землі, зокрема, зменшення її термального забруднення. Один із важливих напрямків такої економії – зменшення енергетичних затрат на створення комфортних умов життєдіяльності людини [1]. Значними є витрати електричної енергії для кондиціонування житла, місць роботи та громадського використання (кінотеатри, театральні зали, місця колективного харчування та ін.). Енергетичні потреби на кондиціонування, особливо в критичних погодних умовах (літній період), настільки великі, що потужність наявних електричних мереж іноді не може їх забезпечити. Загальні витрати на кондиціонування в останні десятиліття досягли $\approx 800 \cdot 10^9$ кВт·год. у рік і за прогнозами до 2100 року вони зростуть у 30 разів [2]. Разом з тим, немає необхідності у кондиціонуванні великих об'ємів житла, промислових підприємств. Насправді, для створення таких умов досить здійснити кондиціонування самої людини, що дає можливість у десятки і сотні разів зменшити енергетичні затрати.

Більше того, як показують медичні дослідження, у багатьох випадках не потрібно кондиціонувати весь корпус людини. Для забезпечення комфортних умов досить вплинути теплом або холодом на певні ділянки організму [4], наприклад, на голову в умовах перегріву або на кінцівки в умовах переохолодження. Крім того, можна чекати, що використання кондиціонованого одягу призведе до істотного зниження застудних захворювань, а створення відповідних температурних умов перебування людини має дати і лікувальний ефект при різних запальних процесах, хронічних захворюваннях суглобів та інших органів людського організму.

Індивідуальне кондиціонування ефективне не тільки для економії електричної енергії при підвищених температурах навколишнього середовища, а й в умовах його понижених температур. Такі кондиціонери можуть знизити вимоги до температурних умов перебування людини. За оцінками використання індивідуальних кондиціонерів у режимі нагріву можна зекономити $4 \cdot 10^{12}$ кВт·год теплової енергії в рік (від світового рівня споживання енергії на опалення в рік $40 \cdot 10^{12}$ кВт·год) [3], що відповідатиме зниженню споживання енергоресурсів орієнтовно на 10 %.

Наявність індивідуальних кондиціонерів дає можливість покращити і в цілому якість життя людей. Це зумовлено можливостями таких кондиціонерів підтримувати комфортні умови зі зміною зовнішніх температурних умов (у широких межах) або зміні тепловіддачі тіла людини залежно від механічних навантажень організму (від 100 Вт у спокійному стані до 1 кВт, наприклад, під час бігу або важкої праці) [5] шляхом автоматичної зміни дії на людину теплом або холодом.

Наведене вказує на важливість та актуальність досліджень, направлених на створення індивідуальних кондиціонерів для людини, які, по великому рахунку, можуть вплинути на умови і стиль життя людства, що буде зумовлено переходом від «пасивного» одягу, який до цього часу виконує в основному функцію теплової ізоляції людського організму, до використання «активного» одягу, який реагує на зміни температурних умов діяльності людини.

Зважаючи на викладене, є важливим розглянути засоби, якими у наш час може бути досягнуто кондиціонування одягу для людини і як ці засоби або їх комбінації можуть бути використані для розв'язання цього завдання. Останнє зводиться до вивчення фізичних моделей, які можуть бути використані для створення таких кондиціонерів та їх аналізу з метою визначення найбільш раціональних варіантів. Це і є предметом дослідження у пропонованій роботі. При цьому особливий інтерес у створенні оптимальних конструкцій становлять кондиціонери, в яких використовуються термоелектричні явища охолодження та нагріву [6], що, як показують дослідження, за невеликих потужностей тепла та холоду можуть переважати всі інші способи.

Аналіз літератури. Роботи, направлені на створення кондиціонованого одягу, вже активно проводяться у багатьох країнах світу [7–18]. Найбільш поширеним у наш час виявився одяг пасивного кондиціонування, так званий термічний одяг (термобілина) [19]. Його використання уможливує зберегти тепло (за теплоізоляційними властивостями він еквівалентний двом і більше шарам традиційного одягу) і при цьому забезпечити відвід вологи від тіла за рахунок використання синтетичних тканин складної внутрішньої структури. Як правило, такий одяг складається з трьох шарів: нижній – поглинає і відводить вологу, середній – відводить вологу назовні і зберігає тепло, верхній – захищає від несприятливих погодних умов.

Щодо активного кондиціонування, то це в основному кондиціонери спеціального призначення для створення відповідних умов, що пов'язані з професійною діяльністю в екстремальних температурних умовах. Зокрема в роботах [7, 8] показано спеціальний одяг для захисту від перегрівання робітників гарячих цехів, у якому використано акумулятори холоду у вигляді співполімера акрилата калія [7] або сухого льоду [8]. В першому випадку для «зарядки» акумулятора одяг замочується у воді упродовж кількох годин, матеріал акумулятора поглинає

рідину, що забезпечує охолодження впродовж 8 годин, поглинаючи при цьому до 12.5 кДж/см² за годину. Кондиціонер [8], що використовує розміщений у внутрішній підкладці одягу сухий лід, здійснює охолодження шляхом циркуляції охолодженого газоподібного діоксиду вуглецю в просторі між внутрішньою поверхнею куртки і тілом людини.

У [9, 10] використано метод охолодження організму шляхом його обдуву навколишнім повітрям. Такий кондиціонер виготовляється у вигляді комбінезону з каналами для проходження повітря, яке нагнітається в одяг електричним вентилятором.

У [11 – 13] описано одяг з охолодженням для військовослужбовців, спортсменів та лікарів, що базується на поглинанні теплової енергії внаслідок фазового переходу речовини. Такий одяг виготовляється у вигляді курток, колінних або ліктєвих пов'язок тощо з каналами, що заповнені водою. Охолодження в такому випадку здійснюється шляхом випаровування води через спеціальну пористу зовнішню поверхню кондиціонера. Час його неперервної роботи становить до 6 годин, що забезпечує зниження температури до 15°C від температури навколишнього середовища (за відносної вологості повітря 30 %).

У роботах [14, 15] розкриваються аспекти створення кондиціонерів-нагрівачів для захисту від переохолодження. Зокрема в [14] описано конструкцію нагрівача повітря у вигляді маски для гірників, що працюють при екстремально низьких температурах, у якій підігрів повітря здійснюється резистивним нагрівником.

Особливий інтерес викликають роботи [16 – 18], у яких показані результати розробки термоелектричних кондиціонерів. Вони являють собою розміщені у одязі модулі Пельтьє, що здійснюють охолодження або нагрів одягу залежно від напрямку електричного струму.

Всі перераховані методи кондиціонування одягу мають свої специфічні переваги але водночас і вагомні недоліки. Тому важливо розглянути всі сучасні методи, що використовуються для індивідуального кондиціонування організму людини, та визначити, як ці методи або їх комбінації можуть бути використані для створення нових ефективних індивідуальних кондиціонерів для людини.

Мета пропонованої роботи – визначення можливих варіантів індивідуальних кондиціонерів, їх класифікація та аналіз для дальшого покращення їх якості з урахуванням специфічних умов експлуатації.

Класифікація індивідуальних кондиціонерів для людини

У пропонованій роботі індивідуальні кондиціонери для людини класифікуються за таким ознаками: функціональним призначенням, типом джерела тепла та холоду, об'єктом охолодження або нагріву та за призначенням одягу (рис. 1).

За функціональним призначенням розрізняють індивідуальні кондиціонери, що використовуються лише для охолодження, лише для нагріву або для охолодження і нагріву залежно від потреб. Кожен із цих кондиціонерів відрізняється за типом джерела тепла або холоду.

За об'єктом охолодження або нагріву індивідуальні кондиціонери можна розділити на такі, що забезпечують кондиціонування всього тіла (комбінезон з персональним кондиціонером) або його ділянок – голови (головний убір з кондиціонером), тулуба (жилет з кондиціонером), ліктєвих або колінних суглобів (пов'язка з кондиціонером), попереку (пояс з кондиціонером), живота (накладка з кондиціонером, що закріплена на животі), кистей рук (рукавиці з кондиціонером), стоп (взуття з кондиціонером).

Залежно від сфер застосування кондиціонованого одягу вони поділяються на кондиціонери для побутового одягу (створення комфортних умов у побуті та на відпочинку), для спортсменів

(одяг, що забезпечує відведення тепла під час екстремальних фізичних навантажень), для лікарів (наприклад, захисний одяг для хірургів під час проведення довготривалих операцій або операцій у одязі, що захищає від шкідливого випромінювання), для водіїв транспортних засобів (пілотів, космонавтів, водіїв автомобілів та мотоциклів), для військовослужбовців (наприклад, кондиціонер для бронезилетів, що забезпечить комфортні умови виконання завдань військовими в різних кліматичних умовах), для робітників (наприклад, одяг, що захищає від довготривалої дії підвищених температур на металургійних заводах або навпаки – захист від понижених температур робітників на півночі).

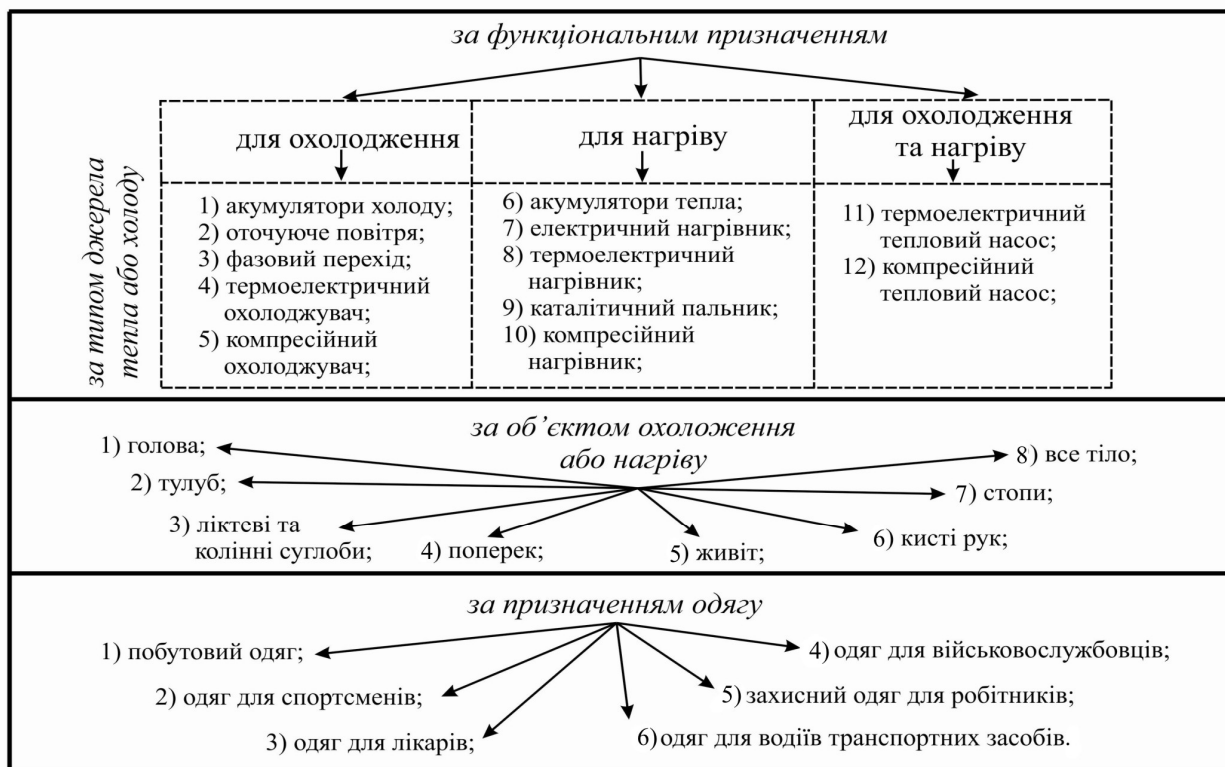


Рис. 1. Класифікація індивідуальних кондиціонерів для одягу.

Найбільш визначальною ознакою, що відрізняє кондиціонери один від одного, є тип джерел тепла або холоду. Від них у першу чергу залежить ефективність функціонування кондиціонерів. Тому розглянемо нижче класифікацію індивідуальних кондиціонерів для людини за типами джерел тепла та холоду.

Класифікація фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для людини

Аналіз літератури свідчить про значну недослідженість проблеми створення індивідуальних кондиціонерів для людини, що поєднували б основні переваги відомих методів одержання тепла і холоду. Спочатку розглянемо всі можливі комбінації джерел тепла та холоду, якими здійснюється кондиціонування. Цим забезпечується повний перелік фізичних моделей кондиціонерів. Їх варіанти наведено в табл.1. У ній: 1 – акумулятори тепла або холоду (зокрема, в яких використано фазовий перехід речовини); 2 – навколишнє повітря; 3 – електричний нагрівник; 4 – каталітичний нагрівник; 5 – компресійний тепловий насос; 6 – термоелектричний тепловий насос.

Таблиця містить як відомі варіанти кондиціонерів (12 фізичних моделей, переважно найпростіших з одним типом джерела тепла або холоду), так і такі, що в нині час недоцільно реалізовувати (28 моделей). Проте вона дає можливість виокремити нові фізичні моделі кондиціонерів, що можуть бути перспективними для практичного використання.

Спочатку розглянемо фізичні моделі відомих кондиціонерів. Вони оцифровані згідно з таблицею.

Таблиця

Варіанти фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для людини

| | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1.2 |
| 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| 3.4 | 3.5 | 3.6 | 4.5 | 4.6 | 5.6 | 1.2.3 | 1.2.4 |
| 1.2.5 | 1.2.6 | 1.3.4 | 1.3.5 | 1.3.6 | 1.4.5 | 1.4.6 | 1.5.6 |
| 2.3.4 | 2.3.5 | 2.3.6 | 2.4.5 | 2.4.6 | 2.5.6 | 3.4.5 | 3.4.6 |
| 3.5.6 | 4.5.6 | 1.2.3.4 | 1.2.3.5 | 1.2.3.6 | 1.2.4.5 | 1.2.4.6 | 1.2.5.6 |
| 1.3.4.5 | 1.3.4.6 | 1.3.5.6 | 1.4.5.6 | 2.3.4.5 | 2.3.4.6 | 2.3.5.6 | 2.4.5.6 |
| 3.4.5.6 | 1.2.3.4.5 | 1.2.3.4.6 | 1.2.3.5.6 | 1.2.4.5.6 | 1.3.4.5.6 | 2.3.4.5.6 | 1.2.3.4.5.6 |

| | |
|--|-----------------------------|
| | - уже використані; |
| | - перспективні; |
| | - використання не доцільне. |

Фізичні моделі відомих індивідуальних кондиціонерів для людини

Фізичні моделі з акумуляторами тепла або холоду

Один із найпростіших простих способів охолодження або нагріву – використання акумуляторів тепла або холоду, відповідно [7, 8]. Принцип роботи таких кондиціонерів засновано на використанні речовин з великою теплоємністю, що поступово виділяють або поглинають тепловий потік від людини.

Фізичні моделі індивідуального кондиціонера із акумулятором тепла або холоду показаної на рис. 2.

У режимі охолодження (рис. 2а) тепловий акумулятор поглинає кількість тепла, що дорівнює:

$$Q_{\text{акум.}} = V \cdot \rho \cdot C \cdot (T_2 - T_1) \cdot t, \quad (1)$$

де $Q_{\text{акум.}}$ – теплова енергія, що поглинається тепловим акумулятором (Дж), V – об'єм теплового акумулятора (м^3), ρ – його густина ($\text{кг}/\text{м}^3$), C – питома теплоємність ($\text{Вт}/\text{кг} \cdot \text{К}$), $(T_2 - T_1)$ – різниця між кінцевою T_2 і початковою T_1 температурами речовини теплового акумулятора, t – час розрядки акумулятора (сек.) від температури T_1 до T_2 .

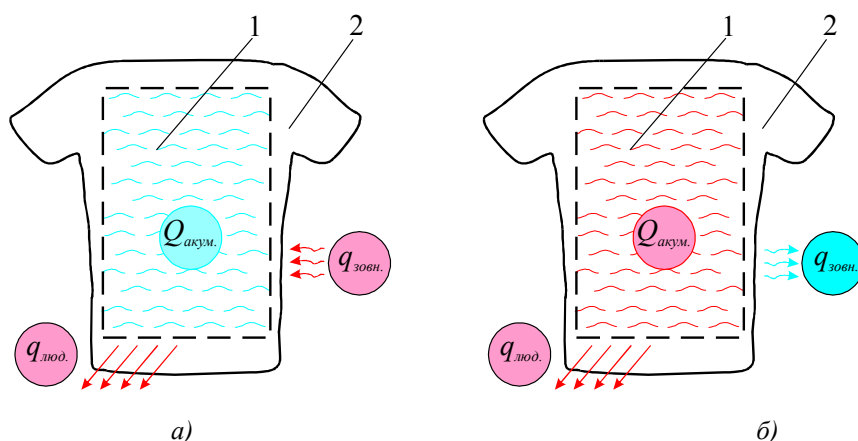


Рис. 2. Фізична модель індивідуального кондиціонера із акумулятором тепла або холоду: 1 – сміть з тепловим акумулятором, 2 – кондиціонований одяг, а) режим охолодження, б) режим нагріву.

У такому випадку рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$Q_{\text{акум.}} = (q_{\text{люд.}} + q_{\text{зовн.}}) \cdot t, \quad (2)$$

де $q_{\text{люд.}}$ – потужність тепловиділення з тіла людини (Вт), $q_{\text{зовн.}}$ – потужність тепловиділення з навколишнього середовища (Вт), наприклад, теплове випромінювання від нагрітих об'єктів, t – час розрядки акумулятора (сек.) від температури T_2 до T_1 .

У режимі нагріву (рис. 2б) рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$Q_{\text{акум.}} = (q_{\text{зовн.}} - q_{\text{люд.}}) \cdot t. \quad (3)$$

Із (2), (3) видно, що нормальний теплообмін з тіла людини можна забезпечити упродовж часу t , що залежить від параметрів теплового акумулятора та потужності тепловиділення з тіла людини $q_{\text{люд.}}$ і навколишнього середовища $q_{\text{зовн.}}$.

Недоліком такої схеми кондиціонування є потреба в постійній заміні («зарядці») акумулятора, що унеможливує його тривале використання.

Різновидом кондиціонерів, де використовуються теплові акумулятори, є охолоджувачі з фазовим переходом речовини [11 – 13]. У них робоча речовина (рідина, сухий лід) випаровується, поглинаючи при цьому теплову енергію. Така схема кондиціонування ефективніша, ніж попередній варіант, проте має свої недоліки – відсутність можливості нагріву одягу, сильна залежність від умов навколишнього середовища, зокрема вологості та температури повітря.

Теплова енергія $Q_{\text{ф.п.}}$ (Дж), що відводиться у навколишнє середовище таким кондиціонером, буде дорівнювати:

$$Q_{\text{ф.п.}} = L \cdot V \cdot \rho, \quad (4)$$

де L – питома теплота пароутворення (Дж/кг), V – об'єм речовини, що випаровується (м^3), ρ – її густина ($\text{кг}/\text{м}^3$).

У такому випадку рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$Q_{\text{акум.}} = (q_{\text{люд.}} + q_{\text{зовн.}}) \cdot t, \quad (5)$$

де t – час повного випаровування речовини.

Як видно з (5), вагомим недоліком такої моделі кондиціонера є потреба в постійній заміні робочої речовини, що унеможлиблює його тривале використання.

Фізична модель з використанням теплової енергії навколишнього повітря

Поширеним методом, що використовується лише для охолодження тіла людини, є використання теплообміну з навколишнім середовищем [9, 10] (рис. 3). В цьому випадку необхідною для забезпечення охолодження організму є умова, щоб температура навколишнього повітря була нижчою від температури тіла. Крім того, така схема кондиціонування одягу передбачає наявність електричного вентилятора, що споживає певну потужність $W_{\text{вент}}$, і відповідно джерела його живлення.

Теплова потужність $q_{\text{пов.}}$ (Вт), що відводиться у навколишнє середовище таким кондиціонером, буде рівною:

$$q_{\text{пов.}}(W_{\text{вент}}, T_1) = G(W_{\text{вент}}) \cdot \rho \cdot C \cdot (T_2 - T_1). \quad (6)$$

Тут G – витрата повітря ($\text{м}^3/\text{сек}$), що є функцією потужності вентилятора $W_{\text{вент}}$, ρ – густина повітря ($\text{кг}/\text{м}^3$), C – питома теплоємність повітря ($\text{Вт}/\text{кг} \cdot \text{К}$), $(T_2 - T_1)$ – різниця між температурами повітря на виході T_2 і вході T_1 у кондиціонер.

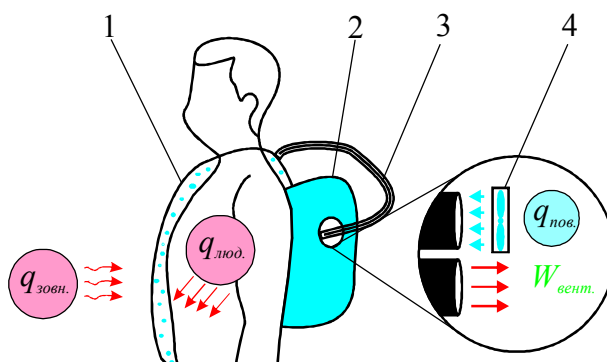


Рис. 3. Фізична модель індивідуального кондиціонера із теплообміном з навколишнім середовищем: 1 – одяг із каналами для проходження повітря, 2 – блок кондиціонера, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 3 – канали для обміну повітрям.

Рівняння теплового балансу в такому випадку можна записати таким чином:

$$q_{\text{пов.}} = q_{\text{люд.}} + q_{\text{зовн.}}. \quad (7)$$

Недоліки такого способу кондиціонування – низька ефективність, відсутність можливості нагріву, сильна залежність від умов навколишнього середовища, потреба в джерелі електричного живлення.

Фізична модель з використанням ефекту Джоуля

Простим способом для підігріву одягу є використання електричних резистивних нагрівників [14, 15] (рис. 4). Такий кондиціонер містить вмонтований в одяг нагрівник у вигляді провідника, через який протікає електричний струм та джерело електричного живлення з блоком регулювання. Попри свою простоту, такий кондиціонер має свої недоліки – відсутність можливості охолодження та потребу у постійній підзарядці джерела живлення (електричного акумулятора).

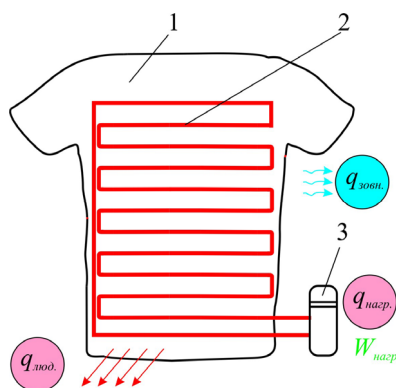


Рис. 4. Фізична модель індивідуального кондиціонера, де використовується ефект Джоуля: 1 – кондиціонований одяг, 2 – електричний нагрівник, 3 – джерело живлення.

Теплова потужність $q_{нагр.}$ (Вт), що виділяється таким нагрівником, буде дорівнювати:

$$q_{нагр.} = I^2 \cdot r, \quad (8)$$

де I – сила струму (А), r – електричний опір нагрівника (Ом).

Рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$q_{нагр.} = q_{зовн.} - q_{люд.} \quad (9)$$

Коефіцієнт ефективності такого нагрівача близький до одиниці, оскільки майже уся затрачена електрична потужність $W_{нагр.}$ перетворюється у тепловий потік $q_{нагр.}$.

Фізична модель з каталітичним згоранням палива

Ще одним способом підігріву одягу є використання каталітичного згорання газу в пальнику [20]. Принцип роботи такого кондиціонера-нагрівача полягає у виділенні тепла при безполум'яному окисненні (згоранні) газової суміші в наявності каталізатора. Нагріте таким способом повітря потрапляє через систему каналів в одяг, нагріваючи його. Продукти згорання газу відводяться у навколишнє середовище.

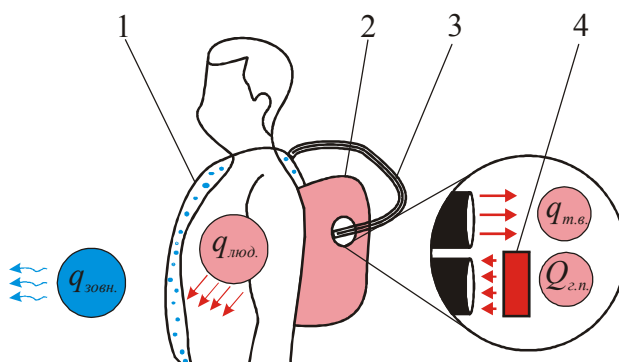


Рис. 5. Фізична модель індивідуального кондиціонера із каталітичним згоранням газу: 1 – одяг із каналами для проходження нагрітого повітря каналами 3, 2 – контейнер, в якому знаходиться пальник 4.

Теплова енергія $Q_{г.п.}$ (Дж), що виділяється при згоранні палива, буде дорівнювати:

$$Q_{г.п.} = g \cdot m, \quad (10)$$

де g – питома теплота згоряння палива (Дж/кг), m – маса палива (кг).

Рівняння теплового балансу матиме вигляд

$$Q_{г.п.} = (q_{зовн.} - q_{люд.} + q_{т.в.}) \cdot t, \quad (11)$$

де $q_{т.в.}$ – теплова потужність (Вт), що виділяється у навколишнє середовище із продуктами згоряння палива і відпрацьованим повітрям.

До переваг описаного методу кондиціонування одягу слід віднести відносно малу потребу у джерелі тепла (бензин, спирт), до недоліків – відсутність можливості охолодження одягу.

Фізична модель з компресійним тепловим насосом

В основі роботи компресійних теплових насосів лежить холодильний цикл [21]. Простий паровий цикл механічної холодильної машини реалізується за допомогою чотирьох елементів, що утворюють замкнутий холодильний контур – компресора, конденсатора, дросельного вентиля і випарника або охолоджувача (рис. 6). Пара з випарника поступає в компресор і стискається, внаслідок чого його температура підвищується. Після виходу з компресора, пара, що має високі температуру і тиск, надходить у конденсатор, де охолоджується і конденсується. З конденсатора рідина проходить через дросельний вентиль. Оскільки температура кипіння (насичення) для даного тиску виявляється нижчою від температури рідини, починається її інтенсивне кипіння; при цьому частина рідини випаровується, а температура решти опускається до рівноважної температури насичення (тепло рідини витрачається на її перетворення в пару). Таким чином реалізується охолодження або нагрів необхідних ділянок одягу. До недоліків такого способу кондиціонування можна віднести потребу в забезпеченні зарядки джерела електричного живлення компресора (акумуляторної батареї), наявність холодоагента (зокрема, фреону, що є достатньо токсичним), масогабарити, а також шумність роботи.

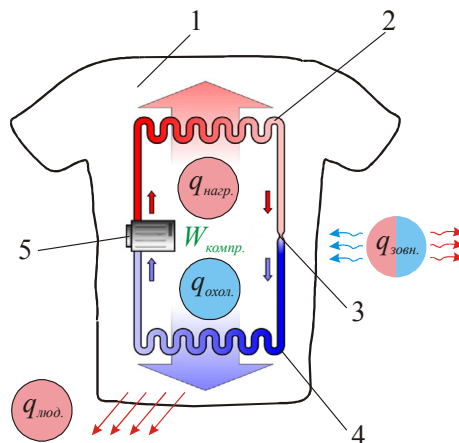


Рис. 6. Фізична модель індивідуального кондиціонера із компресійним тепловим насосом: 1 – одяг, 2 – випарник, 3 – дросельний вентиль, 4 – конденсатор, 5 – компресор.

Теплова потужність $q_{охол.}$ (Вт), що відбирається на холодній стороні компресорного холодильника (холодопродуктивність), визначається співвідношенням

$$q_{охол.} = q_{нагр.} - W_{компр.}, \quad (12)$$

де $q_{нагр.}$ – теплова потужність (Вт), що відводиться з гарячої сторони у навколишнє середовище,
 $W_{компр.}$ – затрачена компресором електрична потужність (Вт).

Для забезпечення теплового балансу в режимі охолодження

$$q_{охол.} = q_{зовн.} + q_{люд.} \quad (13)$$

У режимі нагріву (13) переписеться так:

$$q_{нагр.} = q_{зовн.} - q_{люд.} \quad (14)$$

Слід зазначити, що, попри свої недоліки, компресійні теплові насоси мають високе значення коефіцієнта ефективності перетворення енергії (холодильний коефіцієнт на рівні 3).

Фізична модель із термоелектричним тепловим насосом

Зручним способом охолодження або нагріву одягу є використання термоелектричних теплових насосів, що працюють на ефекті Пельтьє [16 – 18] (рис. 7). Такий кондиціонер в залежності від напрямку електричного струму в термоелектричних модулях може використовуватися як для охолодження, так і для нагріву.

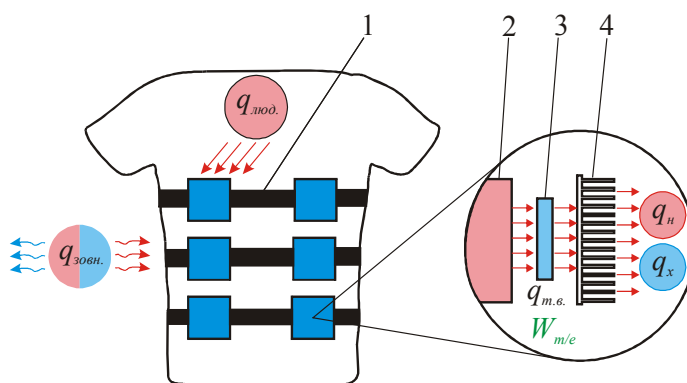


Рис. 7. Фізична модель індивідуального кондиціонера із термоелектричним тепловим насосом: 1 – одяг із системою кріплень, 2 – елемент, що забезпечує тепловий контакт термоелектричного перетворювача енергії з одягом, 4 – повітряний теплообмінник.

У режимі охолодження теплова потужність q_x (Вт), що поглинається на холодній стороні термоелектричного перетворювача, дорівнює

$$q_x = \Pi \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot r - K \cdot \Delta T, \quad (15)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє (В), K – повна теплопровідність (Вт/К), ΔT – перепад температури на термоелектричному перетворювачі (К).

Баланс теплот виглядає так:

$$q_x = q_{зовн.} + q_{люд.} \quad (16)$$

Для режиму нагріву теплова потужність q_n (Вт), що виділяється на гарячій стороні термоелектричного перетворювача, дорівнює:

$$q_n = \Pi \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot r - K \cdot \Delta T. \quad (17)$$

Баланс теплот має вигляд у режимі нагріву виглядає як

$$q_n = q_{зовн.} - q_{люд.} \quad (18)$$

До переваг такого способу кондиціонування можна віднести високу ефективність, надійність, невеликі масогабарити, екологічність (відсутні шкідливі холодоагенти) та безшумність у роботі. До недоліків – необхідність у постійній підзарядці електричних акумуляторів.

Модель 1.2.

На рис. 8 показано фізичну модель індивідуального кондиціонера для людини, що є комбінацією описаних вище моделей з використанням теплової енергії навколишнього повітря (п. 2) та теплових акумуляторів (п. 1).

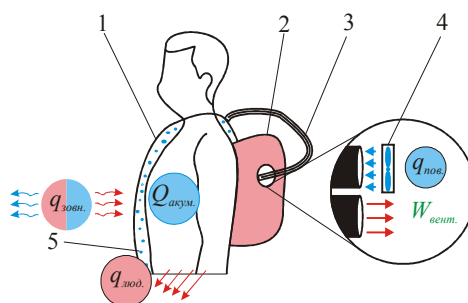


Рис. 8. 1 – одяг каналами для проходження повітря 3,
2 – контейнер, в якому знаходиться вентилятор 4,
5 – ємність з тепловим акумулятором.

Перевагою такого способу кондиціонування одягу – підвищення ефективності охолодження внаслідок використання двох джерел холоду. Недоліки – відсутність можливості підігріву одягу та потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення вентилятора і заміні теплового акумулятора (вода, сухий лід тощо).

Модель 1.3.

На рис. 9 зображено фізичну модель індивідуального кондиціонера, що є комбінацією моделей з використанням ефекту Джоуля (п. 3) та теплових акумуляторів (п. 1).

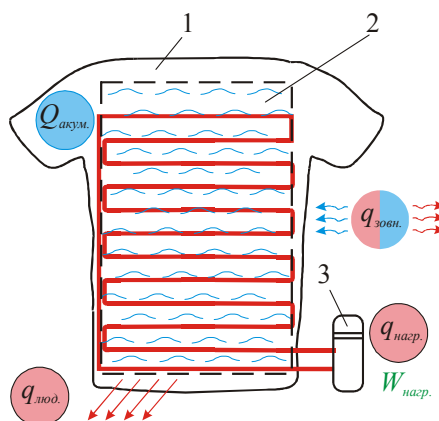


Рис. 9. 1 – кондиціонований одяг, 2 – ємність з тепловим акумулятором,
3 – електричний нагрівник.

Перевага такого способу кондиціонування одягу – можливість його використання як для охолодження (шляхом поглинання теплової енергії при фазовому переході речовини), так і для нагріву (шляхом виділення тепла при протіканні струму через провідник). Недолік – потреба у

постійній підзарядці джерела електричного живлення нагрівника і заміні теплового акумулятора (вода, сухий лід тощо).

Модель 2.3.

Ще одна фізична модель індивідуального кондиціонера для людини, який вже використовується на практиці, зображена на рис. 10. Вона поєднує моделі з використанням теплової енергії навколишнього повітря (п. 2) та теплової дії ефекту Джоуля (п. 3).

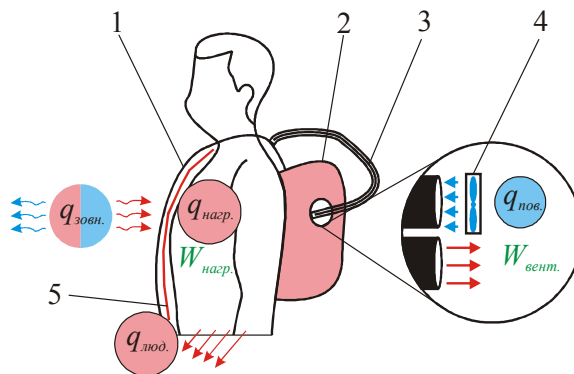


Рис. 10. 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – контейнер, в якому знаходиться вентилятор 4, 5 – електричний нагрівник.

Перевагою такого способу кондиціонування одягу є можливість його використання як для охолодження (шляхом поглинання теплової енергії за обдуву тіла людини оточуючим повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (шляхом виділення тепла при протіканні струму через провідник). Недоліком – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення нагрівника і вентилятора).

Модель 2.4.

На рис. 11 – фізична модель кондиціонера для людини, що комбінує використання теплової енергії навколишнього повітря (п. 2) та теплової дії при каталітичному згорянні палива (п. 4).

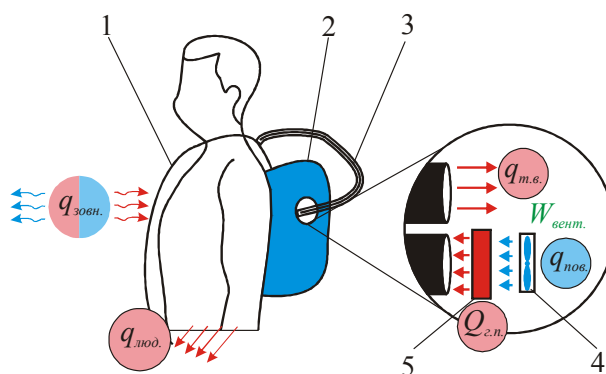


Рис. 11. 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – контейнер, у якому знаходиться вентилятор 4 і газовий пальник 5.

До його переваг слід віднести можливість його використання як для охолодження (шляхом поглинання теплової енергії за обдуву тіла людини навколишнім повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (виділення теплової енергії при каталітичному згорянні палива). До недоліків – потребу у постійній підзарядці джерела електричного живлення вентилятора та заміні палива у каталітичному нагрівнику).

Модель 2.5.

На рис. 12 показано фізичну модель, що поєднує використання теплової енергії навколишнього повітря (п. 2) та компресійного теплового насоса (п. 5).

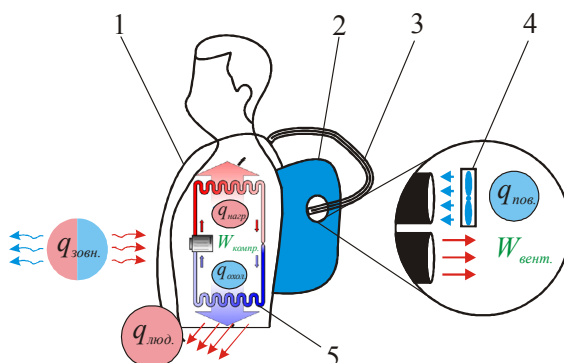


Рис. 12. 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – контейнер, у якому знаходиться вентилятор 4, 5 – компресійний тепловий насос.

До його переваг слід віднести можливість його використання як для охолодження (шляхом функціонування компресійного теплового насоса і поглинання теплової енергії за обдуву тіла людини навколишнім повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (виділення теплової енергії при зворотньому циклі компресійного теплового насоса). До недоліків – потребу у постійній підзарядці джерела електричного живлення вентилятора та компресора), наявність шкідливих холодоагентів (наприклад, фреону).

Модель 2.6.

На рис. 13 зображено фізичну модель індивідуального кондиціонера для людини, що комбінує використання теплової енергії навколишнього повітря (п. 2) та термоелектричного теплового насоса (п. 5).

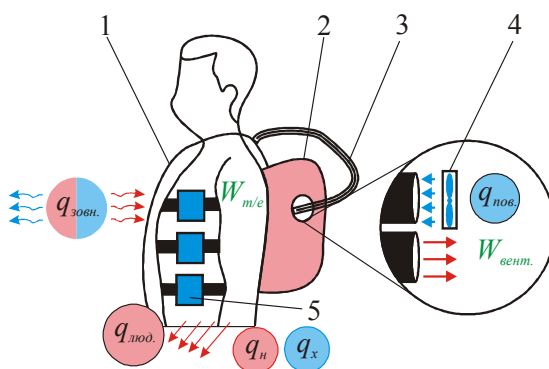


Рис. 13. 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – контейнер, у якому знаходиться вентилятор 4, 5 – термоелектричний тепловий насос.

До переваг такого способу кондиціонування одягу слід віднести можливість його використання як для охолодження (шляхом застосування термоелектричного теплового насоса і поглинання теплової енергії при обдуві тіла людини навколишнім повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (виділення теплової енергії за термоелектричного нагріву). До недоліків – потребу у постійній підзарядці джерела електричного живлення вентилятора та термоелектричних перетворювачів енергії).

Нові фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини

Як показано в табл. 1, вибрано 23 фізичні моделі індивідуальних кондиціонерів для людини, що є перспективними для подальших досліджень. Ці моделі – комбінації відомих методів одержання тепла і холоду, що були описані в попередньому розділі. Розглянемо їх детально.

Модель 1.4.

На рис. 14 показано фізичну модель індивідуального кондиціонера для людини, що поєднує каталітичний нагрівник (п. 4) з тепловим акумулятором (п. 1). Така модель дає можливість підвищити функціональність кондиціонування одягу – забезпечити охолодження (шляхом поглинання теплової енергії при фазовому переході речовини, що міститься в резервуарі з тепловим акумулятором) або нагрів (нагрівання повітря, що потрапляє у канали в одязі, внаслідок каталітичного спалювання газу) одягу. Її недоліком є необхідність постійної заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику.

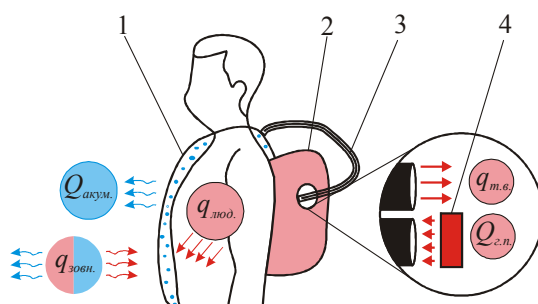


Рис. 14: 1 – ємність з акумулятором тепла, 2 – контейнер, у якому знаходиться газовий пальник 4, 3 – канали для проходження нагрітого повітря.

Модель 1.5

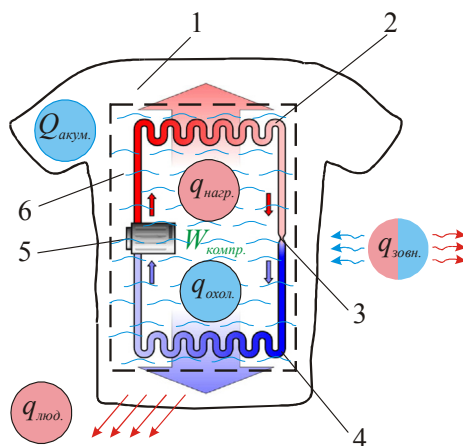


Рис. 15: 1 – одяг, 2 – випарник, 3 – дросельний вентиль, 4 – конденсатор, 5 – компресор, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

На рис. 15 зображено фізичну модель індивідуального кондиціонера для людини, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5) з тепловим акумулятором (п. 1). Використання такого способу кондиціонування робить можливим підвищити ефективність охолодження одягу шляхом поєднання механічного охолодження компресійною холодильною машиною з охолодженням шляхом фазового переходу речовини. Первагою такого способу кондиціонування одягу є також можливість його використання в режимі нагріву (шляхом зворотного циклу компресійної холодильної машини).

Недоліком – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення компресора, необхідність заміни теплового акумулятора та наявність шкідливих холодоагентів.

Модель 1.6.

На рис. 16 – фізична модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6) з тепловим акумулятором (п. 1). Її використання дає можливість підвищити ефективність охолодження одягу шляхом поєднання термоелектричного ефекту Пельтьє з охолодженням шляхом фазового переходу речовини. Можливе також її використання в режимі нагріву завдяки термоелектричним перетворювачам енергії. Її недоліком є потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення термоелектричних модулів та необхідність заміни теплового акумулятора.

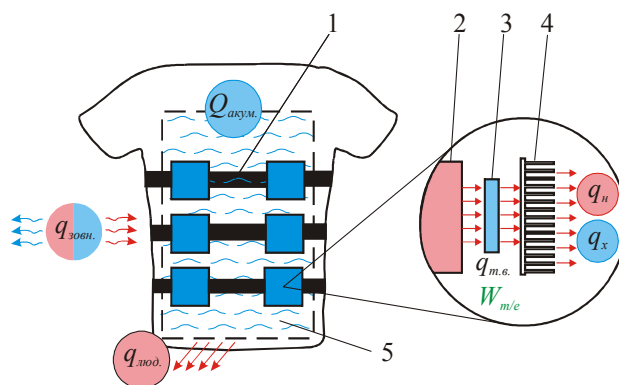


Рис. 16: 1 – одяг із системою кріплень, 2 – елемент, що забезпечує тепловий контакт термоелектричного перетворювача енергії 3 з одягом, 4 – повітряний теплообмінник, 5 – ємність з тепловим акумулятором.

Модель 3.5.

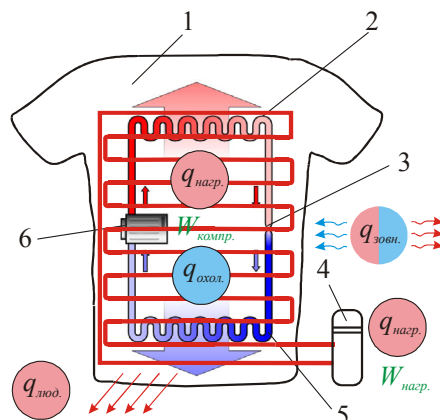


Рис. 17: 1 – одяг, 2 – випарник, 3 – дросельний вентиль, 4 – конденсатор, 5 – компресор, 6 – електричний нагрівник.

На рис. 17 подано фізичну модель кондиціонера для людини, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5) з електричним нагрівником (п. 3). Переваги такого способу кондиціонування одягу – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною), так і для нагріву (компресійний тепловий насос і ефект Джоуля у провіднику зі струмом); підвищення ефективності у режимі нагріву за рахунок використання двох методів нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення компресора та нагрівника, наявність шкідливих холодоагентів.

Модель 3.6.

На рис. 18 зображено фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6) з електричним нагрівником (п. 3). Її переваги – можливість використання як для охолодження (термоелектричний ефект Пельтьє), так і для нагріву (термоелектричний тепловий насос і ефект Джоуля у провіднику зі струмом); підвищення ефективності у режимі нагріву за рахунок використання двох методів нагріву. Недолік – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення термоелектричних перетворювачів та нагрівника.

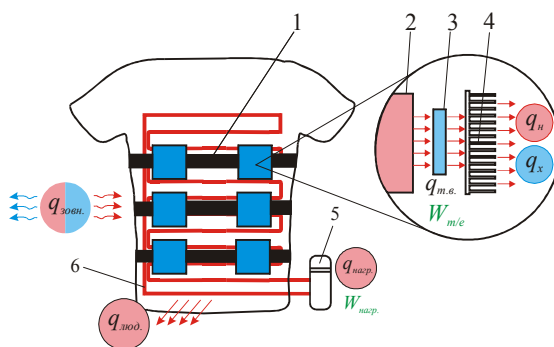


Рис. 18: 1 – одяг із системою кріплень, 2 – елемент, що забезпечує тепловий контакт термоелектричного перетворювача енергії 3 з одягом, 4 – повітряний теплообмінник, 5 – електричний нагрівник.

Модель 4.5.

На рис. 19 – фізична модель кондиціонера для людини, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5) з каталітичним пальником (п. 4). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною), так і для нагріву (компресійний тепловий насос і каталітичне згоряння палива); підвищення ефективності у режимі нагріву за рахунок використання двох методів нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення компресора, необхідність заміни палива у нагрівнику та наявність шкідливих холодоагентів.

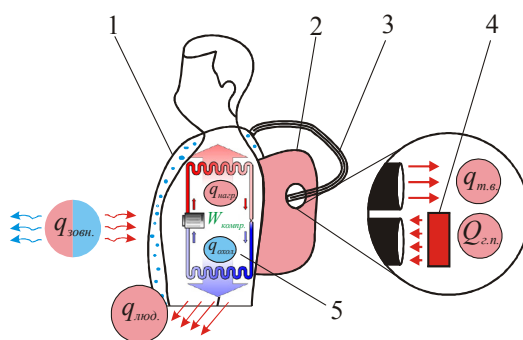


Рис. 19: 1 – одяг, 2 – контейнер, в якому знаходиться газовий пальник 4, 3 – канали для проходження нагрітого повітря, 5 – компресійний тепловий насос.

Модель 4.6.

На рис. 20 представлено фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), з каталітичним пальником (п. 4). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє), так і для нагріву (виділення тепла внаслідок каталітичного згоряння палива, термоелектричний нагрів за ефектом Пельтьє); підвищення ефективності у режимі

нагріву за рахунок використання двох методів. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення термоелектричних перетворювачів, необхідність заміни палива у нагрівнику.

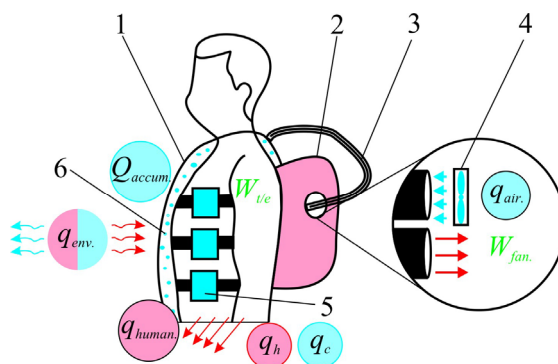


Рис. 20: 1 – одяг із каналами 3, 2 – блок з каталітичним пальником 4, 5 – термоелектричний тепловий насос.

Модель 1.2.3.

На рис. 21 представлено фізичну модель індивідуального кондиціонера, що поєднує обдув навколишнім повітрям (п. 2), тепловий акумулятор (п. 1) з електричним нагрівником (п. 3.). Її переваги – можливість використання як для охолодження (поглинання тепла при фазовому переході речовини, обдув навколишнім повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (виділення тепла згідно ефекту Джоуля у провіднику зі струмом). Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення нагрівника і вентилятора та необхідність заміни теплового акумулятора.

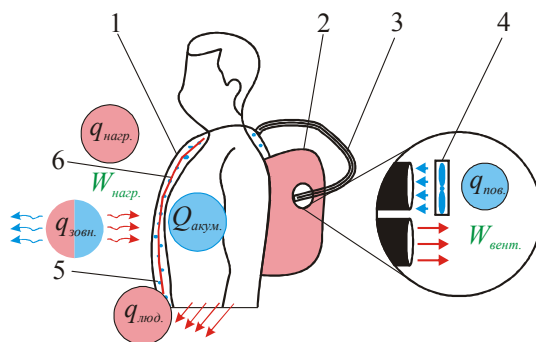


Рис. 21: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок кондиціонера, у якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – ємність з тепловим акумулятором, 6 – електричний нагрівник.

Модель 1.2.4.

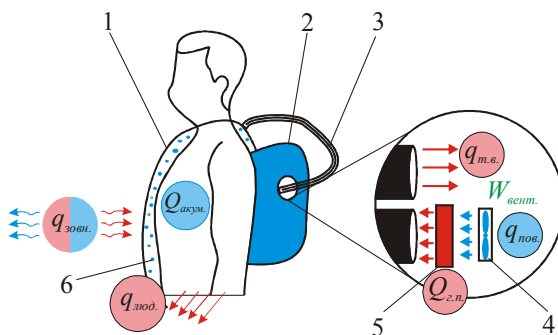


Рис. 22: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок кондиціонера, в якому знаходиться електричний вентилятор 4, 5 – каталітичний пальник, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

На рис. 22 показано фізичну модель кондиціонера для людини, що поєднує обдув навколишнім повітрям (п. 2), тепловий акумулятор (п. 1.) з каталітичним пальником (п. 4). Переваги такого способу кондиціонування одягу – можливість використання як для охолодження (поглинання тепла за фазового переходу речовини, обдув навколишнім повітрям з нижчою температурою), так і для нагріву (виділення тепла внаслідок каталітичного згоряння палива у поєднанні з примусовим обдувом вентилятором). Недоліки – необхідність постійної заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику та потреба у живленні електричного вентилятора.

Модель 1.2.5.

На рис. 23 – фізична модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з обдувом навколишнім повітрям), так і для нагріву (компресійний тепловий насос); підвищення ефективності у режимі охолодження за рахунок використання двох методів відбору тепла. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення компресора, необхідність заміни теплового акумулятора та наявність шкідливих холодоагентів.

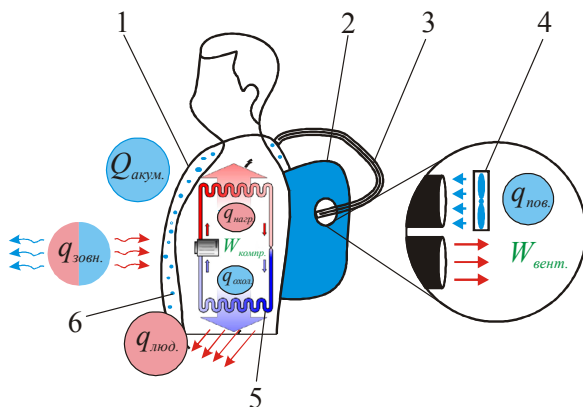


Рис. 23: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4, 5 – компресійний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

Модель 1.2.6.

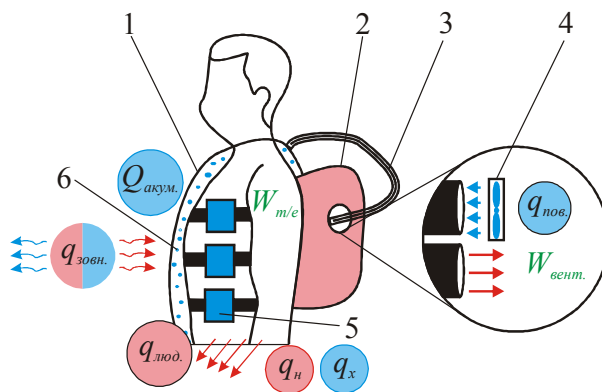


Рис. 24: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4, 5 – компресійний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

На рис. 24 – фізична модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з обдувом навколишнім повітрям), так і для нагріву (термоелектричний нагрів); підвищення ефективності у режимі охолодження за рахунок використання двох методів відбору тепла. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення термоелектричних перетворювачів енергії та необхідність заміни теплового акумулятора.

Модель 1.3.5.

На рис. 25 подано фізичну модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), тепловий акумулятор (п. 1) з електричним нагрівником (п. 3). Переваги такого способу – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з поглинанням тепла при фазовому переході речовини), так і для нагріву (компресійний тепловий насос і електричний нагрівник); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення компресора та нагрівника, необхідність заміни теплового акумулятора та наявність шкідливих холодоагентів.

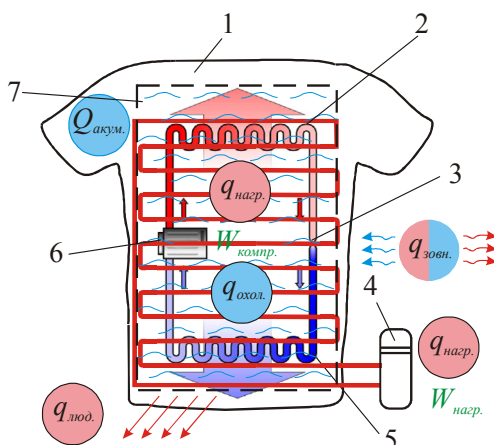


Рис. 25: 1 – одяг, 2 – випарник, 3 – дросель, 4 – електричний нагрівник, 5 – конденсатор, 6 – компресор, 7 – тепловий акумулятор.

Модель 1.3.6.

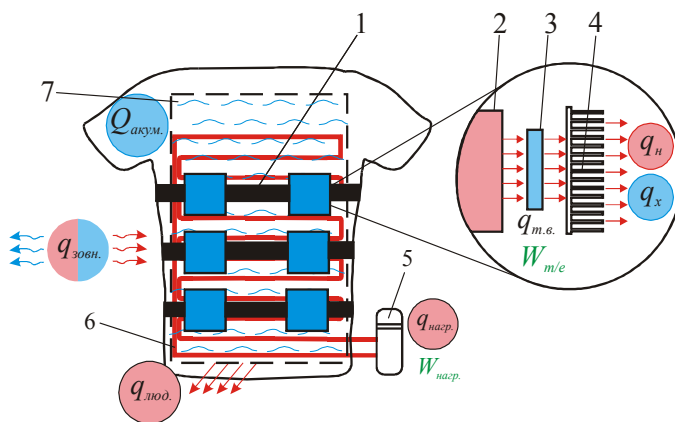


Рис. 26: 1 – одяг із системою кріплень, 2 – елемент, що забезпечує тепловий контакт термоелектричного перетворювача енергії 3 з одягом, 4 – повітряний теплообмінник, 6 – електричний нагрівник з блоком живлення 5, 7 – сміть з тепловим акумулятором.

На рис. 26 показано фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), тепловий акумулятор (п. 1) з електричним нагрівником (п. 3). Переваги такого способу кондиціонування одягу – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з поглинанням тепла при фазовому переході речовини), так і для нагріву (ефект Пельтьє і електричний нагрівник); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела електричного живлення термоелектричних перетворювачів та нагрівника, необхідність заміни теплового акумулятора.

Модель 1.4.5.

На рис. 27 – фізична модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), тепловий акумулятор (п. 1) з каталітичним пальником (п. 4). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з поглинанням тепла при фазовому переході речовини), так і для нагріву (виділення тепла внаслідок каталітичного згоряння палива, нагрів компресійним тепловим насосом); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора, необхідність заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику, наявність шкідливих холодоагентів.

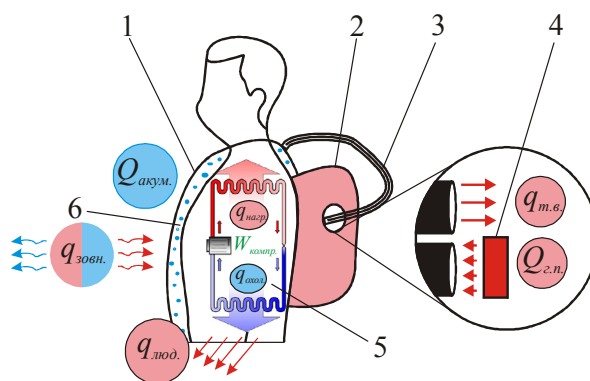


Рис. 27: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться каталітичний пальник 4 з джерелом живлення, 5 – компресійний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

Модель 1.4.6.

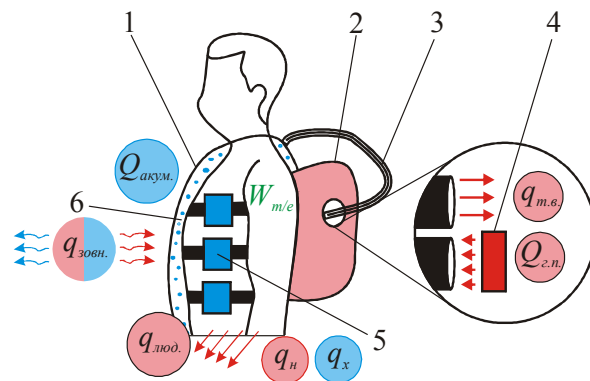


Рис. 28: 1 – одяг із каналами 3, 2 – блок з каталітичним пальником 4, 5 – термоелектричний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором.

На рис. 28 представлено фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), тепловий акумулятор (п. 1.) з каталітичним пальником (п. 4). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з поглинанням тепла при фазовому переході речовини), так і для нагріву (виділення тепла внаслідок каталітичного згоряння палива, термоелектричний нагрів за ефектом Пельтьє); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора, необхідність заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику, наявність шкідливих холодоагентів.

Модель 2.3.5.

На рис. 29 подано фізичну модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), електричний нагрівник (п. 3) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям), так і для нагріву (нагрів компресійним тепловим насосом у поєднанні з виділенням тепла у провіднику зі струмом за ефектом Джоуля); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора та нагрівника, наявність шкідливих холодоагентів.

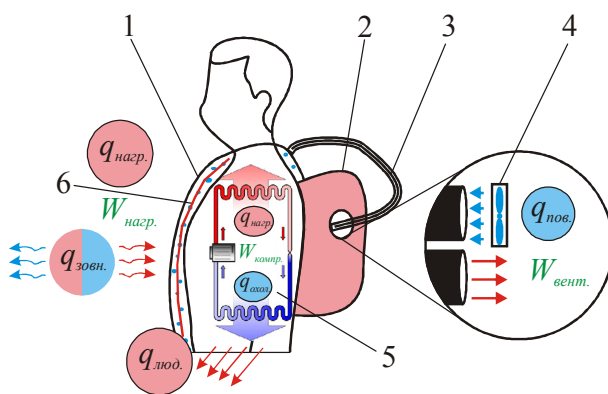


Рис. 29: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – компресійний тепловий насос, 6 – електричний нагрівник.

Модель 2.3.6.

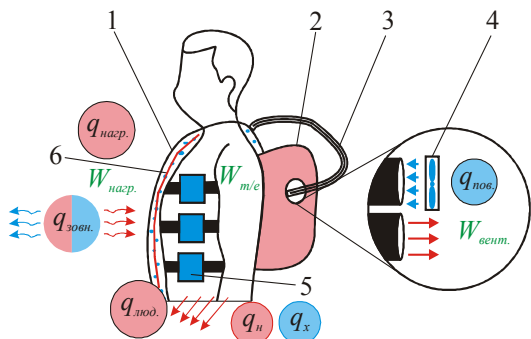


Рис. 30: 1 – одяг із каналами 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – термоелектричний тепловий насос, 6 – електричний нагрівник.

На рис. 30 зображено фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), електричний нагрівник (п. 3) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям), так і для нагріву (нагрів за ефектом Пельтьє у поєднанні з виділенням тепла у

провіднику зі струмом за ефектом Джоуля); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення термоелектричних перетворювачів та нагрівника.

Модель 2.4.5.

На рис. 31 показано фізичну модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), каталітичний пальник (п. 4) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям), так і для нагріву (нагрів компресійним тепловим насосом у поєднанні з виділенням тепла внаслідок каталітичного згоряння палива); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора та нагрівника, необхідність заміни палива у нагрівнику, наявність шкідливих холодоагентів.

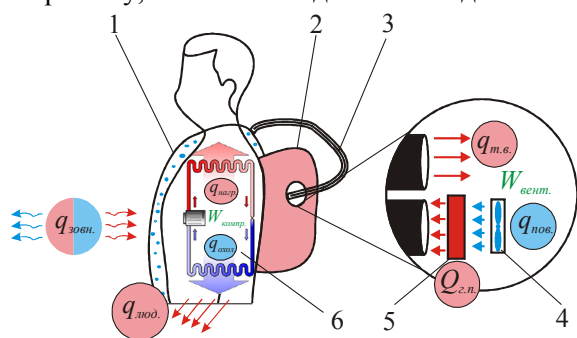


Рис. 31: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – каталітичний нагрівник, 6 – компресійний тепловий насос.

Модель 2.4.6.

На рис. 32 зображено фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), каталітичний пальник (п. 4) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям), так і для нагріву (нагрів компресійним тепловим насосом у поєднанні з виділенням тепла внаслідок каталітичного згоряння палива); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення термоелектричних перетворювачів та нагрівника, необхідність заміни палива у нагрівнику.

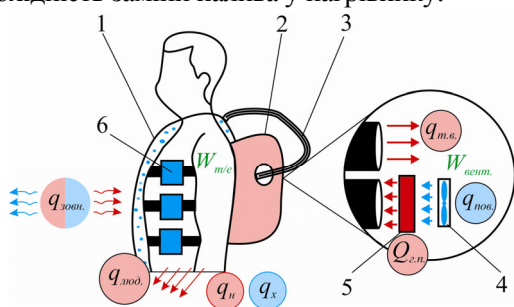


Рис. 32: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – каталітичний нагрівник, 6 – термоелектричний тепловий насос.

Модель 1.2.3.5.

На рис. 33 – фізична модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), електричний нагрівник (п. 3), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям і фазовим переходом речовини), так і для нагріву (нагрів компресійним тепловим насосом у поєднанні з виділенням

тепла у провіднику зі струмом за ефектом Джоуля); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора та нагрівника, необхідність заміни теплового акумулятора, наявність шкідливих холодоагентів.

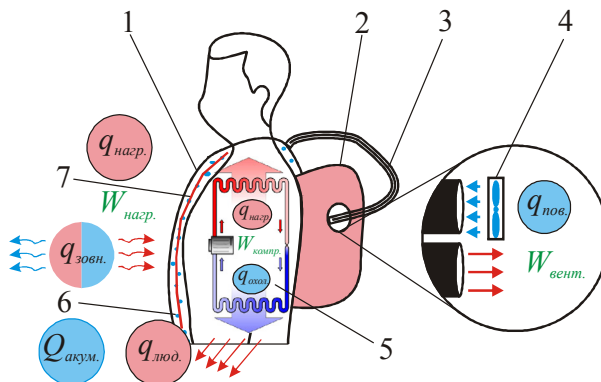


Рис. 33: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – компресійний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором, 7 – електричний нагрівник.

Модель 1.2.3.6.

На рис. 34 – фізична модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), електричний нагрівник (п. 3), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з обдувом охолодженим повітрям і фазовим переходом речовини), так і для нагріву (нагрів за ефектом Пельтьє у поєднанні з виділенням тепла у провіднику зі струмом); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення термоелектричних перетворювачів та нагрівника, необхідність заміни теплового акумулятора, наявність шкідливих холодоагентів.

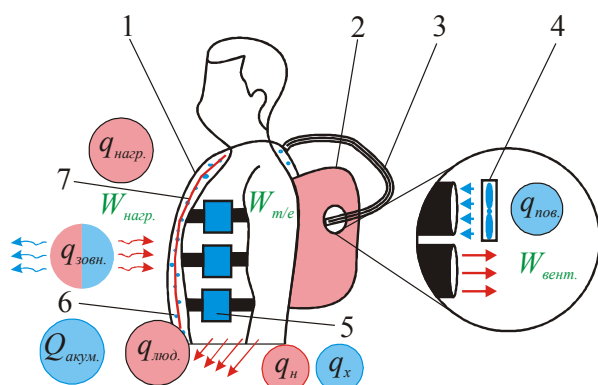


Рис. 34: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – термоелектричний тепловий насос, 6 – ємність з тепловим акумулятором, 7 – електричний нагрівник.

Модель 1.2.4.5.

На рис. 35 зображено фізичну модель, що поєднує компресійний тепловий насос (п. 5), каталітичний пальник (п. 4), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (механічне охолодження компресійною холодильною машиною у поєднанні з обдувом охолодженим повітрям і фазовим переходом речовини), так і для нагріву (нагрів компресійним тепловим насосом у поєднанні з виділенням

тепла внаслідок каталітичного згоряння палива); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення компресора, необхідність заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику, наявність шкідливих холодоагентів.

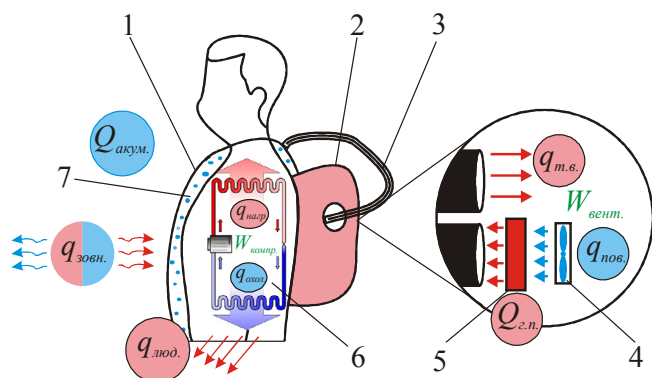


Рис. 35: 1 – одяг із каналами для проходження повітря 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – каталітичний нагрівник, 6 – компресійний тепловий насос, 7 – ємність з тепловим акумулятором.

Модель 1.2.4.6.

На рис. 36 показано фізичну модель, що поєднує термоелектричний тепловий насос (п. 6), каталітичний пальник (п. 4), тепловий акумулятор (п. 1) з обдувом навколишнім повітрям (п. 2). Її переваги – можливість використання як для охолодження (охолодження за ефектом Пельтьє у поєднанні з обдувом зовнішнім охолодженим повітрям і фазовим переходом речовини), так і для нагріву (нагрів за ефектом Пельтьє у поєднанні з виділенням тепла внаслідок каталітичного згоряння палива); підвищення ефективності у режимах охолодження та нагріву за рахунок використання двох методів охолодження або нагріву. Недоліки – потреба у постійній підзарядці джерела живлення термоелектричних перетворювачів, необхідність заміни теплового акумулятора та палива у нагрівнику.

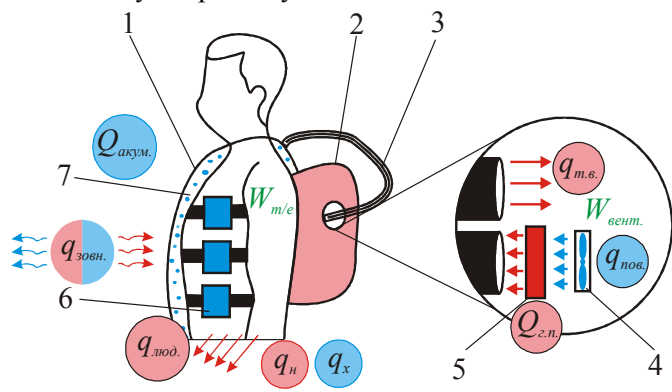


Рис. 36: 1 – одяг із каналами 3, 2 – блок, в якому знаходиться електричний вентилятор 4 з джерелом живлення, 5 – каталітичний нагрівник, 6 – термоелектричний тепловий насос, 7 – ємність з тепловим акумулятором.

Аналіз описаних вище фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для одягу засвідчив їх переваги, що робить перспективним подальше вивчення. Результати досліджень таких кондиціонерів будуть наведені у другій частині цієї роботи.

Висновки

1. Проаналізовано особливості фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для одягу та розроблено їх детальну класифікацію.
2. Запропоновано 63 варіанти фізичних моделей індивідуальних кондиціонерів для одягу, з яких лише 12 на сьогоднішній момент вивчені.

3. Аналіз фізичних моделей кондиціонерів для одягу дав можливість виділити 23 комбінації моделей, перспективних для дослідження і практичної реалізації.

Література

1. Обзор мирового рынка систем кондиционирования 2011 – 2012 г.г.– Холодильный бизнес.– № 9.– 2012.
2. Дубчак Ю. – Рост продаж кондиционеров как фактор глобального потепления. – <http://techhome.kiev.ua/articles>.– 2016.
3. Шкрадюк И.Э., Чупров В.А.– Технологическая картина мировой энергетики до 2050 г.– Smart Power Toolkit, Greenpeace.–2010.
4. Кобилянський Р.Р., Москалик І.А. Комп'ютерне моделювання локального теплового впливу на біологічну тканину // Термоелектрика. – № 6. – 2015. – С.59 – 68.
5. Витте Н.К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. – Киев: Госмедиздат, 1956. – 148 с.
6. Анатычук Л.И., Мисава К., Судзуки Н., Такаи Я., Розвер Ю.Ю.– Термоэлектрический кондиционер для помещений.–Термоэлектричество.– №1.–2003.
7. Пат. 66389 Україна, МПК 2011.01. Одяг для захисту від перегрівання / Мороз Л.В.; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24.
8. Pat. US 3950789.- Dry ice cooling jacket / Stephan A. Konz, Jerry R. Duncan.- Pub. Date: Apr. 20, 1976.
9. Pat. CN 203633537 U.– Fan type cooling human body air conditioning clothes / Tian Weigu.- Pub. Date: June, 11, 2014.
10. Pat. US 20060191270 A1.– Air conditioning system for a garment / Ray Warren.- Pub. Date: Aug, 31, 2006.
11. Pat. US 20140137596 A1.- Cooling element / Vincent Dijkema, Erland Bakkers.- Pub. Date: May, 22, 2014.
12. Pat. US 20020073481 A1.- Cooling garment / Christopher Creagan, Charles Bolian, Irwin Singer.- Pub. Date: June, 20, 2002.
13. <http://www.inuteq.com/>.
14. Нойтель К.-Х.– Системы рабочей одежды для экстремально холодных условий труда.– Горный информационно-аналитический бюлетень.– № 2.– 2002.
15. Pat. US3524965 A.– Electric heating element for apparel / Stanley Arron.- Pub. Date: Aug. 18, 1970.
16. Pat. US 2002/0156509 A1 .- Thermal control suit / John A. Baker.- Pub. Date: Oct. 24, 2002.
17. Pat. US 2010/0107657 A1.- Apparel with heating and cooling capabilities / Kranthi K. Vistakula.- Pub. Date: May. 6, 2010.
18. <http://dhamainnovations.com/>
19. Layered clothing. (2015, April 11). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 16:25, June 27, 2015, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Layered_clothing&oldid=714783304.
20. A.Nishino.– Recent progress in high-temperature catalytic combustion.– Catal. Today, 10 (1991) 107.
21. Heat pump. (2015, June 21). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 16:55, June 27, 2015, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Heat_pump&oldid=726328458.

Надійшла до редакції 19.02.2016

УДК 537.32



Черкез Р.Г.

Черкез Р.Г.

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

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОНИКНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Представлено результати теоретичних досліджень проникних термоелементів. У пакеті прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics створено 3D модель термоелемента з урахуванням температурних залежностей параметрів матеріалів, наявності комутаційних шин, теплопереходів і контактних опорів. Описано метод математичної теорії оптимального керування та комп'ютерного проектування для розв'язання багатофакторних оптимізаційних задач в 1D моделі. Створено комп'ютерні програми для визначення конструкційних і теплофізичних параметрів, що сприяють максимальним значенням термодинамічних характеристик перетворення енергії. Проведено комп'ютерні розрахунки оптимальних параметрів проникних термоелементів для різних матеріалів на основі Bi – Te – Se – Sb. Розрахункові дані вказують на можливість підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії в 1.2 – 1.5 раза у порівнянні з традиційними термоелементами.

Ключові слова: проникний термоелемент, енергетичні характеристики, оптимізація, проектування.

The results of theoretical research on permeable thermoelements are presented. In Comsol Multiphysics application software package a 3D model of thermoelement is created with regard to temperature dependences of material parameters, the availability of connecting buses, heat spreaders and contact resistances. A method of mathematical optimal control theory and computer design for solving multi-factor optimization problems in a 1D model is described. Computer programs are created to determine design and thermophysical parameters affording maximal values to thermodynamic characteristics of energy conversion. Computer calculations of optimal parameters of permeable thermoelements for various materials based on Bi – Te – Se – Sb are performed. Calculated data point to possible improvement of thermoelectric energy conversion efficiency by a factor of 1.2 – 1.5 as compared to conventional thermoelements.

Key words: permeable thermoelement, energy characteristics, optimization, design.

Вступ

Перспективним напрямом підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії є використання фізичних моделей термоелементів, у яких теплообмін з джерелом і стоком тепла здійснюється не тільки через спаї гілок, як у традиційних термоелементів, а й в об'ємі матеріалу гілок [1, 2]. Варіантами реалізації таких моделей є проникні термоелементи, у яких існують канали для прокачування по них рідинного або газоподібного теплоносія [3]. Наявність теплообміну в об'ємі гілки підвищує інтенсивність теплопередачі, призводить до перерозподілу температурних полів, потенціалів і теплових потоків, тим самим впливає і на енергетичні характеристики

термоелемента. Керуючи теплофізичними параметрами (швидкістю прокачування теплоносія, інтенсивністю теплообміну, густиною електричного струму і т. п.) можна реалізувати такі умови роботи, за яких енергетична ефективність перетворення енергії буде покращена.

Перші теоретичні дослідження проникних термоелементів для потоків газів [4 – 6] засвідчили перспективність їх створення, оскільки вони передбачають підвищення холодильного коефіцієнта на 30 – 40% [7] з охолодженням повітря і підвищенням ККД генераторів на 20 – 30% [8] при використанні низькопотенціальної теплової енергії газів. Однак такі дослідження проведено для найпростішої моделі проникного термоелемента в одновимірному наближенні без урахування температурних залежностей параметрів матеріалу, комутаційних теплопереходів і т.д.

Тому в роботі [9] вперше для більш коректного розв'язання таких завдань використано математичну теорію оптимального керування і здійснено дослідження проникних термоелементів у 1-D моделі з напівпровідників з урахуванням їх температурних залежностей для однорідних і функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). Це дало можливість створити теорію проникних термоелементів з ФГМ і показати можливості підвищення енергетичних характеристик у режимах генерації електричної енергії й охолодження теплоносіїв у 1.2 – 1.5 раза.

Створення 3-D моделі проникного термоелемента ускладнюється необхідністю вирішення спряженого завдання тепло-, електро- і масообміну в системі тверде тіло – теплоносіє. Таке завдання було вирішено в пакеті прикладних комп'ютерних програм Comsol Multiphysics для проникного площинного термоелемента [10]. Однак проведення оптимізації параметрів для виявлення максимальних значень енергетичних характеристик у таких 3-D випадках затруднено. У пропонованій роботі описано особливості методів розв'язання завдань у 3-D та 1-D випадках, для різних моделей проникних термоелементів.

Фізична модель, математичний опис і результати розв'язання задачі

Для неоднорідного ізотропного проникного термоелектричного середовища (рис. 1), в якому є стаціонарний потік тепла, заряджених частинок і енергії, викликані наявністю градієнтів температури ΔT і електрохімічного потенціалу $\Delta \zeta$ процеси обміну і перетворення енергії описуються фундаментальними законами збереження енергії та електричного заряду.

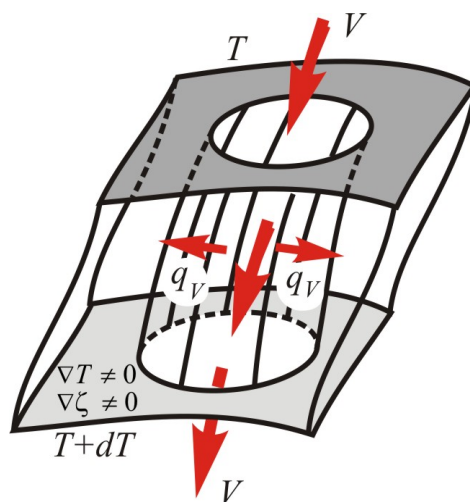


Рис. 1. Проникне термоелектричне середовище.

У стаціонарному випадку розподіл температури T в термоелектричному матеріалі визначається системою диференціальних рівнянь у часткових похідних

$$\left. \begin{aligned} \nabla(\kappa \nabla T) + \frac{\vec{i}^2}{\sigma} - T \frac{\partial \alpha}{\partial T} (\vec{i} \nabla T) - T (\vec{i} \nabla |_{T=const} \alpha) = 0, \\ \nabla(-\sigma \nabla \zeta - \sigma \alpha \nabla T) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $\vec{q} = -\kappa \nabla T + \alpha T \vec{i}$ - вектор густини потоку тепла; $\vec{i} = -\sigma \nabla \zeta - \sigma \alpha T$ - вектор густини електричного струму; α - коефіцієнт термоЕРС, σ - коефіцієнт електропровідності; κ - коефіцієнт теплопровідності.

Наявність теплообміну термоелектричного матеріалу з теплоносієм обумовлює необхідність вирішувати (1) пов'язане з рівняннями нерозривності, руху і теплопровідності для теплоносія, які можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}(\rho_i \vec{V}) = 0, \\ \rho_i \vec{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\operatorname{div}(\vec{V})) = 0, \\ \rho_i \vec{F} \vec{V} + \operatorname{div}(\Lambda \vec{V}) + \operatorname{div}(\kappa_i \nabla t) + \rho_i q_v = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де ρ_i - густина теплоносія; \vec{V} - швидкість теплоносія; \vec{F} - масова сила; p - тиск; Λ - тензор напруги; κ_i - коефіцієнт теплопровідності теплоносія; q_v - внутрішні джерела тепла; U - внутрішня енергія.

Розв'язання такого завдання доцільно проводити в спеціально розроблених прикладних комп'ютерних програмах типу Femlab, ANSYS, COMSOL Multiphysics.

3-D моделювання генераторного термоелемента з боковим теплообміном було здійснено в роботі [10] на основі програми COMSOL Multiphysics.

Отримані розподіли температур в матеріалі гілки на основі $Bi - Te$ і теплоносії (рис. 2), розподіл швидкості теплоносія (рис. 2б) і розподіл потенціалів дають можливість визначити термодинамічні характеристики перетворення .

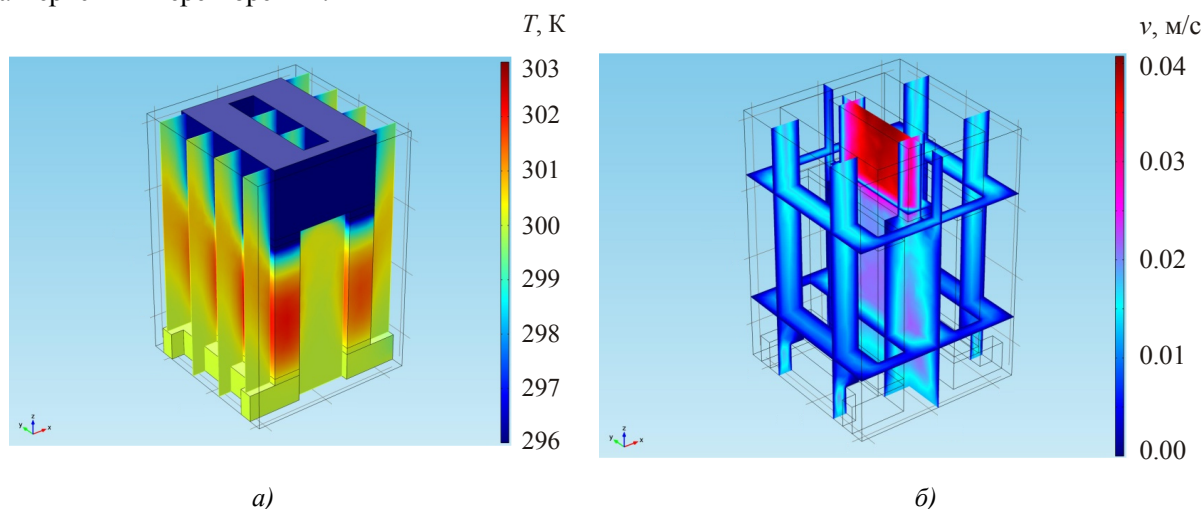


Рис. 2. Розподіл температур у термоелементі і теплоносієві (а), розподіл поля швидкостей в теплоносієві (б).

Результати розрахунків вказують на те, що з використанням бічного теплообміну великі значення ККД досягаються тоді, коли теплообмін відбувається на рівні 0.5 висоти гілки, а інша частина має теплову ізоляцію. Отримано дані також для інших конструкцій термоелемента і температури теплоносія, яка змінюється в діапазоні 700 – 1100 К. Дані свідчать, що використання бокового теплообміну може підвищити ККД на 20 – 30 % і електричної потужності на 40 – 50 %.

Дані розрахунку вказують на необхідність розв'язувати багатопараметричну оптимізаційну

задачу зі знаходження оптимальних умов роботи термоелемента і максимальних значень його енергетичних характеристик. Однак здійснення такої багатопараметричної оптимізації для 3-D моделі дуже важко. Використання 1-D моделі робить можливим провести багатопараметричну оптимізацію енергетичних характеристик термоелементів, виявити такі умови їх роботи, за яких можна досягти максимальних значень ефективності перетворення енергії.

У 1-D випадку визначення енергетичних характеристик проникного термоелемента ґрунтується на рішенні системи диференціальних рівнянь для теплоносія і матеріалу гілок віток n - і p -типів провідності виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha j}{\kappa} T - \frac{q}{\kappa}, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha^2 j}{\kappa} T + \frac{\alpha j}{\kappa} q + i^2 \rho - \frac{\alpha_T P_K N_K l^2}{(S - S_K) j} (T - t), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_T P_K N_K l}{V c_p S_K} (T - t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тут T , t – температура матеріалу вітки і теплоносія в точці x ; $j = il$ – наведена густина електричного струму; l – висота гілок термоелемента; i – густина електричного струму; $q = \frac{1}{j} \left(\alpha j T - \kappa \frac{dT}{dx} \right)$ – наведений питомий тепловий потік; $x = \frac{x}{l}$ – безрозмірна координата; S_K – площа перерізу всіх каналів; S – переріз вітки разом з каналами; P_K – периметр каналу; N_K – кількість каналів у вітці; V – масова швидкість теплоносія в каналах; α_T – коефіцієнт тепловіддачі в каналі.

Для вирішення оптимізаційної задачі зі знаходження оптимальних умов роботи термоелемента у працях використано принцип максимуму Понтрягіна математичної теорії оптимального керування, який дає необхідні умови оптимальності:

1) оптимальні значення питомої густини струму в гілках термоелемента мають задовільняти рівностям

$$-\left[\frac{\partial J}{\partial j} \right]_{n,p} + \sum_{n,p} \int_0^1 \left[\psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial j} + \psi_2 \frac{\partial f_2}{\partial j} + \psi_3 \frac{\partial f_3}{\partial j} \right]_{n,p} dx = 0, \quad (4)$$

де J – функціонал, який характеризує ефективність процесу перетворення енергії (ККД для генераторів, холодильний коефіцієнт для охолодження і т.д.); $(f_1, f_2, f_3)_{n,p}$ – праві частини рівнянь

(1), $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3)_{n,p}$ – вектор-функція імпульсів [12], що визначається з рішення допоміжної системи диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dx} &= \frac{\alpha j}{\kappa} R_1 \psi_1 - \left(\frac{\alpha j}{\kappa} R_2 - \frac{\alpha_e l}{(S - S_E) j} \right) \psi_2 + \frac{\alpha_T P_K^1 N_K}{G c_p} \psi_3, \\ \frac{d\psi_2}{dx} &= \frac{j}{\kappa} \psi_1 - \frac{\alpha j}{\kappa} \psi_2, \\ \frac{d\psi_3}{dx} &= \frac{\alpha_T P_K^1 N_K l}{(S - S_E) j} \psi_2 - \frac{\alpha_T P_K^1 N_K}{G c_p} \psi_3, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 1 + \frac{d \ln \alpha}{dT} T - \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right), \\ R_2 &= R_1 + \frac{\kappa}{\alpha^2 \sigma} \frac{d \ln \sigma}{dT} + \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right) \end{aligned} \right\}_{n,p};$$

2) оптимальні значення шуканих параметрів $\omega_i = (\omega_1, \dots, \omega_r)$ визначаються із системи інтегрально-диференціальних рівнянь

$$-\left[\frac{\partial J}{\partial \omega_i} \right]_{n,p} + \sum_{n,p,0}^1 \left[\psi_1 \frac{\partial f_1}{\partial \omega_i} + \psi_2 \frac{\partial f_2}{\partial \omega_i} + \psi_3 \frac{\partial f_3}{\partial \omega_i} \right]_{n,p} dx = 0, i = 1, \dots, r \quad (6)$$

На основі наведених співвідношень з використанням методу послідовних наближень, чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь (3) і (5), методу Ньютона для вирішення систем інтегрально-диференціальних рівнянь (6) було розроблено комп'ютерну програму проектування проникного термоелемента [10].

Результати таких розрахунків проникного генераторного термоелемента з матеріалів на основі $Bi - Te - Se - Sb$ в оптимальних умовах роботи наведено на рис. 3.

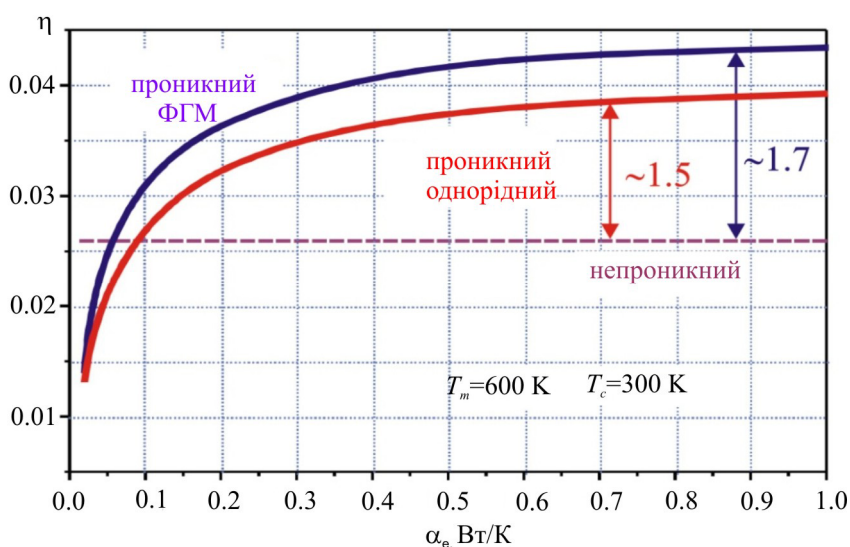


Рис.3. Залежності ККД термоелементів від ефективного коефіцієнта тепловіддачі.

Як видно, ефективність перетворення енергії при використанні проникних термоелементів з однорідних і функціонально-градієнтних матеріалів може бути підвищена в 1.2-1.5 разів у порівнянні з непроникними термоелементами.

Висновки

Описано фізичну модель, метод розрахунку та проектування проникного термоелемента, в якому теплоносій прокачується крізь гілки напівпровідникового матеріалу. Порівняння результатів розрахунків 3-D моделі та одновимірної моделі термоелемента (1-D) показало, що 1-D модель з урахуванням об'ємних термоелектричних ефектів реалістично описує процеси тепло- і електропровідності в термоелектричному середовищі.

Для матеріалів на основі $Bi - Te - Se - Sb$ розраховано вплив конструкційних параметрів (діаметра каналів і їх числа, висоти гілок і кількості сегментів) в оптимальних умовах роботи по ККД

термоелемента на енергетичні характеристики. Виявлено оптимальні значення таких параметрів, які дають можливість встановити необхідні матеріалознавчі вимоги для створення термоелемента.

Порівняння за термодинамічною ефективністю перетворення енергії з традиційними термоелементами показало можливість підвищення ККД у 1.2 – 1.5 раза.

Література

1. Анатичук Л.И. Термоэлектричество, Т.1. Физика термоэлектричества. Черновцы. – 2008. – 388 с.
2. Crane, D. T., LaGrandeur, J. W., Harris, F., Bell, L. E. Performance Results of a High Power Density Thermoelectric Generator: Beyond the Couple //Proceedings of the International Conference on Thermoelectrics, Corvallis, OR, August 2008.
3. А.с СССР № 144883. Способ повышения КПД термоэлектрического генератора (холодильника). Зорин И.В. Заявлено 24.06.1961, Опубликовано 18.10.1968.
4. Котырло Г.К., Щеголев Г.М. Тепловые схемы термоэлектрических устройств. – К.: Наук. думка, 1973. – 215 с.
5. Анатичук Л.И. Проникний термоелемент у режимі генерації електричної енергії / Л.И. Анатичук, Р.Г. Черкез // Журнал Термоелектрика – 2003. – №2. – С.35 – 46.
6. L.I. Anatyshuk, R.G. Cherkez. Energy Potential of Permeable Segmented Thermoelements in Cooling Mode // Journal of Electronic Materials.– Volume 41.– Number 6.– March 2012.– Pages 1115 – 1119.
7. Cherkez R. Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter // Applied Thermal Engineering.– Volume 38.– May 2012.– Pages 7 – 13.
8. Анатичук Л.И. Проникний сегментний термоелемент у режимі генерації електричної енергії / Л.И. Анатичук, Р.Г. Черкез // Журнал Термоелектрика. – 2010. – №3. – С.5 – 12.
9. Анатичук Л.И. Проникний площинний термоелемент охолодження / Л.И. Анатичук, Р.Г. Черкез // Журнал Термоелектрика – 2008. – №3. – С.5 – 12.
10. Черкез Р.Г. Енергетичні характеристики термоелемента з розвиненим бічним теплообміном// Журнал Термоелектрика – 2012. – №3. – С.59 – 68.
11. Дослідження енергетичних характеристик проникного площинного термоелемента / Анатичук Л.И., Черкез Р.Г., Дем'янюк Д.Д. [і. інш.] // Журнал Термоелектрика – 2012. – №2.– С 88 –92
12. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976. – 392 с.

Надійшла до редакції 22.01.2016

УДК 53.072, 538.911



Анухин А.І.

Анухин А.І., Разіньков В.В.

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



Разіньков В.В.

**КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ
ТЕЛУРИДІВ ВІСМУТУ І СУРМИ
ЗОННОЮ ПЛАВКОЮ І НОРМАЛЬНОЮ
КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ**

У роботі наведено результати математичного моделювання нормальної кристалізації і зонного плавлення твердих розчинів телуридів вісмуту і сурми. Наведено розподіл компонентів уздовж довжини злитка для випадків зонної перекристалізації і зонного вирівнювання.

Ключові слова: термоелектричні матеріали, тверді розчини телуридів вісмуту і сурми, зонна плавка, кристалізація.

This paper presents the results of mathematical simulation of normal crystallization and zone melting of solid solutions of bismuth and antimony tellurides. Components distribution along the ingot length for the cases of zone recrystallization and zone leveling is given.

Key words: thermoelectric materials, solid solutions of bismuth and antimony tellurides, zone melting, crystallization.

Вступ

Основні термоелектричні матеріали *p*-типу провідності, які використовуються для створення приладів термоелектричного охолодження, базуються на сплавах телуридів вісмуту і сурми [1]. Найбільша термоелектрична ефективність досягається у твердих розчинах як у найбільш однорідних матеріалів серед сплавів [2]. Отримують тверді розчини телуридів вісмуту і сурми з розплаву нормальною кристалізацією або ж зонною плавкою, яка може також включати і зонне вирівнювання. Прогнозування розподілу компонентів уздовж злитків і, отже, опис розподілу їх електрофізичних властивостей виявляється складним завданням, оскільки кристалізація протікає в багатокомпонентних системах з коефіцієнтами розподілу компонентів, що залежать від хімічного складу і температури розплаву. У пропонованій роботі на основі математичної моделі методом послідовних наближень визначено розподіл компонентів під час кристалізації твердих розчинів телуридів вісмуту та сурми зонною плавкою і нормальною кристалізацією.

Основні положення моделі

Тверді розчини телуридів вісмуту і сурми володіють вузькою областю гомогенності поблизу стехіометричного складу, при цьому коефіцієнт розподілу телуриду сурми в телуридів вісмуту залежить від концентрації *Te – Sb* в розчині і температури розплаву [2]. Математичний

опис процесу масообміну в твердих розчинах є складним завданням, яке ще не розв'язане. У нашій роботі для математичного опису розподілу компонент під час кристалізації в системі $Bi - Sb - Te$, застосований метод послідовних наближень. Як перше наближення прийнято рівність нулю коефіцієнта розподілу телуру в твердих розчинах $(Bi, Sb)_2Te_3$ [2], при цьому система розглядається як бінарна – $(Bi, Sb)_2Te_3 - Te$. У другому наближенні залежність коефіцієнта розподілу телуриду сурми від концентрації телуру в розплаві у бінарній системі $(Bi, Sb)_2Te_3 - Te$ розглядається як лінійна, оскільки коефіцієнт розподілу телуриду сурми залежить від концентрації компонентів. У третьому наближенні враховується розчинність телуру в твердому розчині $(Bi, Sb)_2Te_3$.

У найбільш загальному випадку кристалізації з розплаву (незалежно від методу кристалізації) диференціальне рівняння для опису концентрації надстехіометричного телуру в пфаннівських припущеннях при довільному перерізі злитка має вигляд [4]

$$\frac{dC}{dV} + \frac{C(\frac{dV_{жс}}{dV} + k)}{V_{жс}} = \frac{C_0(\frac{dV_{жс}}{dV} + 1)k}{V_{жс}}, \quad (1)$$

де C – концентрація компонента у твердій фазі, C_0 – вихідна концентрація компонента, k – коефіцієнт розподілу компонента, $V_{жс}$ – об'єм розплаву, V – об'єм закристалізованої частини.

Граничні умови для рівняння (1):

$$\begin{aligned} C(0) &= kC_0, \\ V_{жс}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Розглянемо процеси масообміну для кожної кристалізації окремо. Для випадку нормальної кристалізації $\frac{dV_{жс}}{dV} = -1$. У наближенні рівності до нуля коефіцієнта розподілу телуру для нормальної кристалізації рівняння (1) має вигляд

$$\frac{dC}{dV} - \frac{C}{V_{жс}} = 0. \quad (3)$$

Концентрація надстехіометричного телуру в розплаві з урахуванням граничних умов (2) подається виразом

$$C = \frac{C_0}{1 - G}, \quad (4)$$

де G – питома частина твердої фази в злитку, яка визначається координатою X фронту кристалізації від початку злитка

$$C = \frac{C_0}{1 - X}. \quad (5)$$

Для випадку зонної перекристалізації $\frac{dV_{жс}}{dV} = 0$ і рівняння (1) набуває вигляду:

$$\frac{dC}{dV} = \frac{C_0}{V_{жс}}. \quad (6)$$

Розподіл концентрації надстехіометричного телуру в розплаві зони визначається з рівняння (6)

$$C = C_0 \left(1 + \frac{X}{V_{ж}}\right). \quad (7)$$

Величину об'єму розплаву $V_{ж}$ для випадку сталості перерізу злитка доцільно замінити на довжину розплавленої зони l . В результаті отримаємо зміну концентрації надстехіометричного телуру по довжині зонноперекристалізованого злитка, яка визначається шириною розплавленої зони. Із зонним вирівнюванням концентрація надстехіометричного телуру в розплаві не змінюється і залишається незмінною впродовж усього зворотного проходу зони і дорівнює

$$C = C_0 \left(1 + \frac{L}{l}\right), \quad (8)$$

де L – довжина, яку пройшла зона за прямого проходу вздовж злитка.

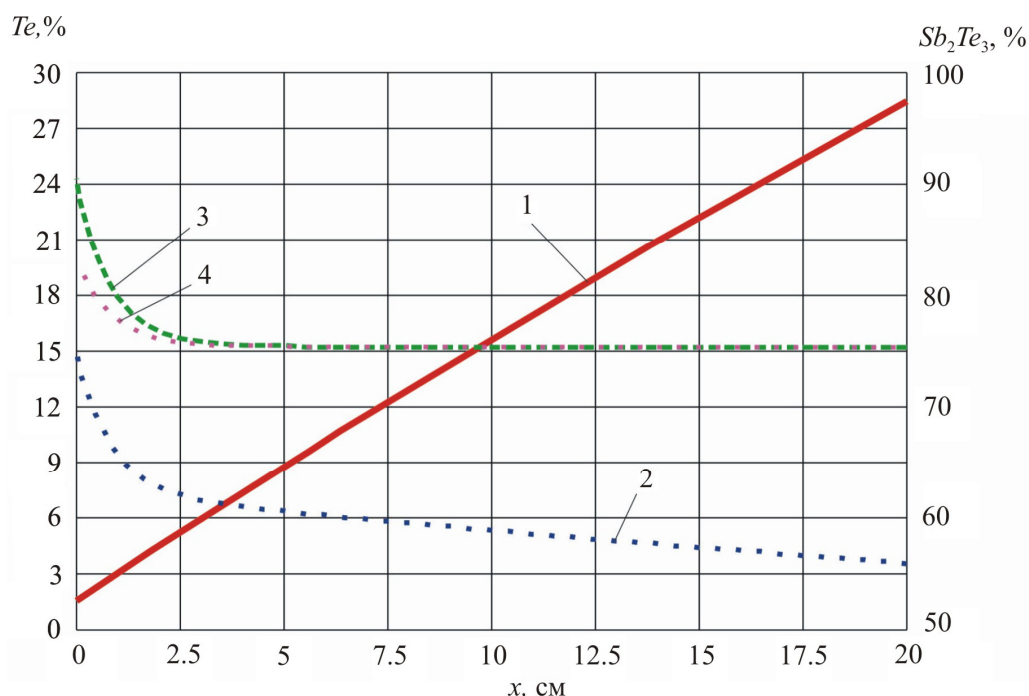


Рис.1. Розрахункова зміна концентрації компонент по довжині злитка:

1 – надстехіометричного телуру $C_{Te_liquid}(x)$, 2 – телуриду сурми $C_{TeSb_liquid}(x)$ в розплаві зони при першому проході зони, 3 – телуриду сурми в твердій фазі $C_{TeSb_solid}(x)$ за першого проході зони, 4 – телуриду сурми в твердій фазі $C_{TeSb_back_solid}(x)$ за зворотнього проході зони.

Результат інтегрування рівняння матеріального балансу показаний на рис. 1.

Для випадку зонної перекристалізації залежності коефіцієнтів розподілу отримано за наступних припущень:

- коефіцієнт розподілу телуриду сурми $k_{Sb_2Te_3}$ лінійно залежить від концентрації надстехіометричного телуру $C_{Te} / k_{Sb_2Te_3} = k_0 + \alpha * C_{Te}$, де $\alpha = 0.05$;
- коефіцієнт розподілу надстехіометричного телуру дорівнює 0.01;
- концентрація телуриду сурми дорівнює 75% (найбільш розповсюджені композиції);
- коефіцієнт розподілу телуриду сурми для стехіометричних складів дорівнює 1.02 [3];

-довжина злитка прийнята рівною 20 см;

-стартова концентрація надстехіометричного телуру прийнята рівною 1.5 %.

Як впливає з графіків концентрації компонентів, їх зміни в розплаві зони не впливають на розподіл телуриду сурми за зонного вирівнювання. Тому концентрація розчиненого телуру буде визначатися тільки досягнутим значенням концентрації надстехіометричного телуру в розплаві зони в кінці злитка. За одноразового проходу зони вздовж зливка концентрація телуру лінійно зростає в розплаві зони.

Обговорення результатів

У першому наближенні результатом розв'язання задачі розподілу компонентів за першого проходу зони є лінійна зміна концентрації надстехіометричного телуру в розплаві зони під час її руху вздовж злитка (рис. 1, залежність 1). У той же час за нормальної кристалізації концентрація надстехіометричного телуру в розплаві зони змінюється обернено пропорційно координаті фронту кристалізації від початку злитка. Це важливий результат, оскільки він дає можливість визначити, з якого складу (відносно до телуру) закристалізувався твердий розчин за зонної плавки. Останнє є простим способом управління хімічним складом розплаву зони. Наприклад, змінюючи довжину злитка, можна легко змінити склад розплаву, оскільки із зворотним проходом зонного вирівнювання концентрація телуру в зоні буде постійною і залежать тільки від трьох величин: стартової концентрації телуру C_{Te} в завантаженні, довжини злитка L і довжини розплавленої зони l . Величину $\frac{L}{l}$ можна прийняти як технологічний параметр процесу вирощування злитка.

Лінійна залежність концентрації надстехіометричного телуру від координати зони робить можливим отримувати діаграми «властивість-хімічний склад» для конкретного розрізу властивості зонноперекристалізованого злитка уздовж його довжини. Як впливає з чисельного рішення диференціального рівняння матеріального балансу, концентрація телуриду сурми в твердій фазі залишається рівною її концентрації в завантаженні за винятком початкової ділянки злитка. Тому після зонної перекристалізації відношення концентрацій телуридів вісмуту і сурми зберігається. У початковій частині злитка концентрація телуриду сурми вища, ніж в завантаженні, і це необхідно враховувати при побудові діаграм.

Висновки

1. При зонній плавці концентрація надстехіометричного телуру в розплаві зони лінійно збільшується пропорційно координаті фронту кристалізації від початку злитка.
2. При зонному вирівнюванні концентрація надстехіометричного телуру в розплаві постійна і дорівнює концентрації, досягнутій в кінці першого проходу зони.
3. За нормальної кристалізації концентрація надстехіометричного телуру в розплаві змінюється обернено координаті фронту кристалізації від початку злитка.
4. У твердій фазі концентрація телуриду сурми залишається постійною по довжині злитка, за винятком його початкової частини, як при зонній плавці, так і при зонному вирівнюванні.
5. Лінійна зміна концентрації надстехіометричного телуру в зоні і сталість концентрації телуриду сурми уздовж довжини злитка необхідно враховувати під час побудови діаграм «властивість-склад» для різних розрізів твердих розчинів телуридів вісмуту і сурми.

Література

1. Анатичук Л.І. Сучасний стан і деякі перспективи термоелектрики/ Л.І. Анатичук // Термоелектрика.–2007.– №2. – С.7 – 20.
2. Термоелектрическое охлаждение. / А.Ф. Иоффе, Л.С. Стильбанс, Е.К. Иорданишвили, [и др.] // М.Л.: Издательство АН СССР, 1956. – 110 с.
3. Yin W.M. and Amith A. *Bi – Sb* alloys for magneto-thermoelectric and Peltier cooling // Solid- State Electronics. 1972, v.15, P. 1141 – 1165.
4. Вигдорович В.Н. Совершенствование зонной перекристаллизации. / В.Н. Вигдорович // М.: Металлургия, 1974. – 200 с.

Надійшла до редакції 04.02.2016.

УДК 62-69



Михайловський В.Я.

Михайловський В.Я., Максимук М.В.

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



Максимук М.В.

КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ПЕРЕДПУСКОВОГО НАГРІВАЧА НА ДИЗЕЛЬНОМУ ПАЛИВІ

Наведено результати комп'ютерного проектування термоелектричного автомобільного нагрівача на дизельному паливі електричною потужністю 70-90 Вт для передпускового підігріву двигуна в умовах понижених температур навколишнього середовища.

Ключові слова: комп'ютерне проектування, фізична модель, передпусковий нагрівач, термоелектричний генератор.

The results of computer design of a 70–90 W thermoelectric automobile heater operated with diesel fuel for start heating of engine under low ambient temperatures are presented.

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

Вступ

Особливість роботи дизельного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) полягає в тому, що параметри такту стиснення (тиск і температура горючої суміші) визначають надійність самозаймання палива. Для надійного запуску дизельного двигуна необхідно, щоб температура суміші в кінці такту стиснення перевищувала температуру самозаймання палива. При пуску двигуна в умовах понижених температур навколишнього середовища температура в кінці такту знижується з різних причин. Так, зменшення частоти обертання колінчастого вала двигуна призводить до зниження середньої швидкості руху поршня. В результаті час, що відводиться на тривання процесу стиснення, збільшується. Низька температура стінок циліндрів двигуна обумовлює підвищену інтенсивність теплообміну між повітрям і стінками циліндрів, що призводить до зростання втрат тепла в процесі стиснення дизельного палива. Крім того, температура кінця такту стиснення знижується внаслідок надходження в циліндри холодного повітря.

В умовах низьких температур навколишнього середовища на зниження температури стиснення впливає нерівномірна швидкість руху поршня. У цьому випадку збільшується не тільки час теплообміну між «повітряним зарядом» і стінками циліндра, а й трапляється максимальний перепад температур між ними, тому втрати тепла при теплообміні зростають. Внаслідок зниження швидкості руху поршня і недостатньо щільного прилягання поршневих кілець до стінок циліндрів відбуваються втрати повітря, що перетікає в щілинах між поршнем і циліндром. Тому, крім зниження температури в кінці такту стиснення, наявне ще й додаткове зменшення тиску.

Низька температура повітря негативно позначається і на якості розпилювання палива форсунками двигуна, що також ускладнює пуск ДВЗ. В першу чергу це пов'язано з підвищенням в'язкості дизельного палива, зростанням сил його поверхневого натягу і, як наслідок, утворенням парафінів. Зниження якості розпилювання палива, низькі значення температури і тиску при стисненні збільшують час запалення палива, що ускладнює пуск дизельного двигуна. Іноді поєднання цих факторів взагалі не забезпечує умов для самозаймання дизельного палива і запуск двигуна стає неможливим.

На сьогодні найефективнішим засобом, яким забезпечується попередній прогрів дизельних двигунів та їх надійний старт, є автономний передпусковий підігрів. Такі нагрівачі підходять практично для всіх типів транспортних засобів, тому застосовуються як у легкових та вантажних автомобілях, так і в автобусах, літаках, яхтах і катерах. Крім того, використання такого обладнання досягається зменшення викидів токсичних речовин з вихлопними газами автомобіля в 5 разів, збільшення моторесурсу двигуна на 50–60 тис. км та економія 90–150 л палива лише за один зимовий сезон [1].

Однак одним з основних стримуючих факторів широкого практичного застосування такого обладнання є необхідність у електричній енергії для живлення компонентів передпускових нагрівників: паливного насоса, вентилятора для подачі повітря у камеру згорання, циркуляційного насоса для прокачування рідкого теплоносія. Наприклад, під час роботи рідинного нагрівача тепловою потужністю 4 кВт і споживаною електричною потужністю 40 Вт акумулятор ємністю 60 А·год тільки за 4.5 години втрачає 50 % ємності. Щоб не допустити «глибокої» розрядки акумулятора, рекомендується в сильні морози не тільки відключити функцію обігріву салону повністю, але й відмовитись від використання додатково встановленого в автомобілі обладнання (аудіо- та відео комплексів, GPS-навігаторів, сигнальних систем). Як показує практика, водіям, які упродовж дня їздять на автомобілі менше 30 хвилин (дім-робота-дім) і при цьому перед кожним запуском двигуна по 20–30 хвилин працює обігрівач, не уникнути щотижневої зарядки акумулятора.

Слід зауважити, що нині жодна з відомих моделей передпускових нагрівачів не вирішує проблему розрядки акумуляторної батареї. Найпоширенішими способами прогріти холодний двигун автомобіля без використання енергії акумулятора є електропідігрів та підігрів за допомогою теплових акумуляторів. Однак у цьому випадку водій постійно прив'язаний до зовнішнього джерела енергії.

Як показано в роботі [2], означена проблема вирішується за допомогою термоелектричного генератора. Попри те, що процес передпускового підігріву стає повністю автономним, без використання електричної енергії акумулятора, надлишок електрики термогенератора може використовуватись для підзарядки акумулятора і живлення іншого автомобільного обладнання.

В роботі [3] проведено аналіз технічних характеристик передпускових нагрівачів для різних видів транспортних засобів та визначено електричні параметри термогенераторів, необхідні для автономної роботи таких нагрівачів. Так, загальна електрична потужність термогенератора для передпускових нагрівачів транспортних засобів з об'ємом двигуна до 4 л має становити 70–90 Вт; для транспортних засобів з об'ємом двигуна 4–10 л і більше 10 л – 130–150 Вт, 230–250 Вт, відповідно. Крім того, такі електричні потужності термогенератора додатково дають можливість здійснювати живлення штатного вентилятора опалення транспортних засобів та підзарядку акумуляторної батареї.

Тому мета нашої роботи – проектування конструкції термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі електричною потужністю 70–90 Вт для передпускового підігріву двигуна в умовах понижених температур навколишнього середовища.

Вибір конструкції термоелектричного передпускового нагрівача

На рис. 1. наведено схему автомобільного передпускового нагрівача з термоелектричним джерелом живлення. Такий термоелектричний нагрівач складається з гарячого теплообмінника 1, у внутрішньому об'ємі якого розташовано джерело тепла 2 для полум'яного спалювання рідкого або газового палива і вентилятора подачі повітря 3 для горіння палива. Подача палива до джерела тепла здійснюється паливним насосом 4. На зовнішній поверхні гарячого теплообмінника знаходяться термоелектричні модулі 5, тепло від яких відводиться рідинними теплообмінниками 6.

Рідинні теплообмінники об'єднані в один гідравлічний контур, який штуцерами 7 під'єднано до системи охолодження двигуна. Циркуляція рідкого теплоносія у контурі «нагрівач-двигун» здійснюється насосом 8. Продукти згоряння відводяться у навколишнє середовище вихлопною трубою 9. Запуск та керування роботою всіх пристроїв нагрівача (вентилятора, паливного та циркуляційного насосів) здійснюється електронним блоком 10.

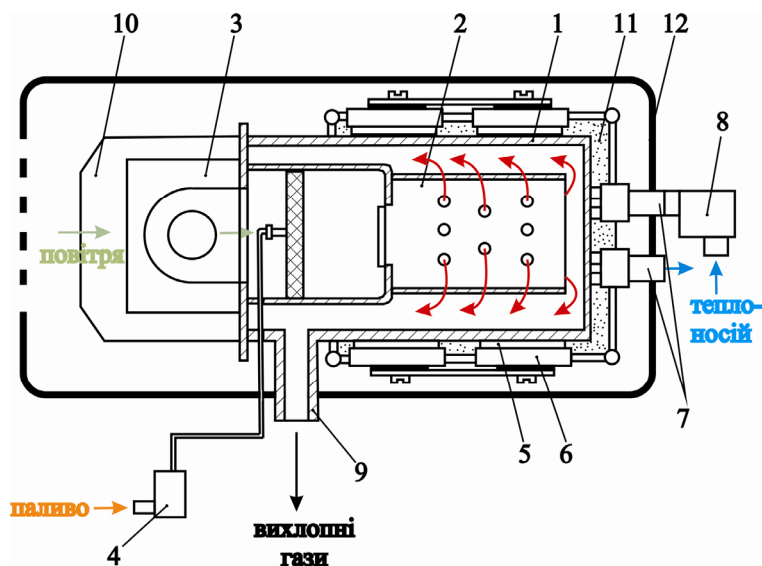


Рис. 1. Схема автомобільного передпускового нагрівача з термоелектричним джерелом живлення: 1 – гарячий теплообмінник; 2 – джерело тепла; 3 – вентилятор; 4 – паливний насос; 5 – термоелектричний модуль; 6 – холодний теплообмінник; 7 – вхідний і вихідний штуцери; 8 – циркуляційний насос; 9 – вихлопна труба; 10 – електронний блок; 11 – теплова ізоляція; 12 – корпус [4].

Вільний об'єм між гарячим та холодними теплообмінниками заповнено теплоізоляцією 11. Автомобільний обігрівач з вентилятором, електронним блоком, теплообмінниками і термоелектричними модулями поміщений у корпус 12.

Нагрівач працює таким чином. Теплова енергія, отримана внаслідок згоряння палива, нагріває гарячий теплообмінник, проходить через термоелектричний перетворювач і відводиться рідким теплоносієм, який циркулює у теплообміннику нагрівача і системі охолодження двигуна. Внаслідок різниці температур між гарячою і холодною сторонами термоперетворювач генерує електричний струм. Теплова енергія, відведена теплоносієм від термоперетворювача, використовується для прогріву двигуна і опалення салону автомобіля.

За джерело тепла використано дизельний паливник максимальною тепловою потужністю 4 кВт рідинного передпускового нагрівача «Thermo Top Evo 4» (Webasto). Схему та зовнішній вигляд паливника представлено на рис. 2.

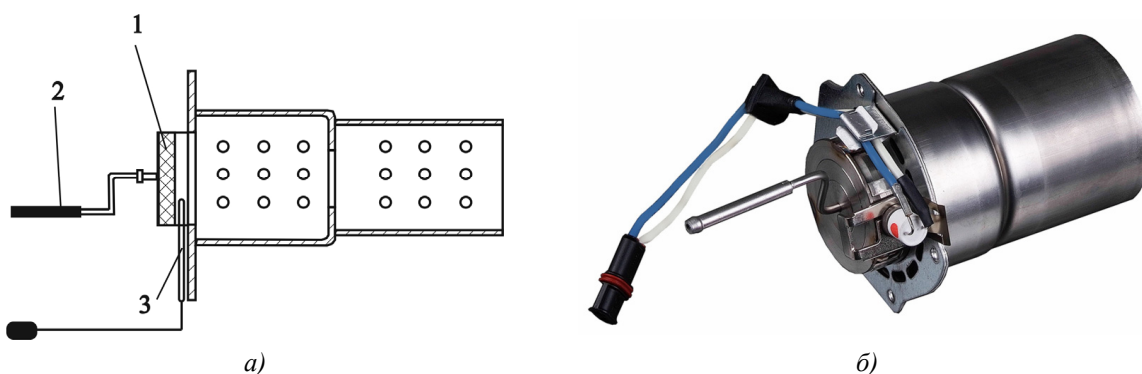


Рис. 2. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) дизельного пальника Ersatzbrenner D TT-C MB (Webasto):
1 – випарник; 2 – паливопровід; 3 – електрод запалювання [5].

Найбільш раціональною формою гарячого теплообмінника з точки зору ефективного теплообміну з джерелом тепла є циліндрична труба, один торець якої закритий, а на іншому торці встановлено дизельний пальник. Зовнішня поверхня теплообмінника виконана у вигляді площин, де розташовуються термоелектричні модулі.

Термоелектричний перетворювач складається з термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту «АЛТЕК-1061», які з надходженням необхідної кількості тепла до гарячої сторони і досягненні оптимальних робочих температур забезпечують генерування заданої електричної потужності. На рис.3 наведено тривимірні залежності електричної потужності P' та коефіцієнта корисної дії (ККД) η' від температури гарячої T_2 і холодної T_x поверхонь термоелектричного модуля «АЛТЕК-1061».

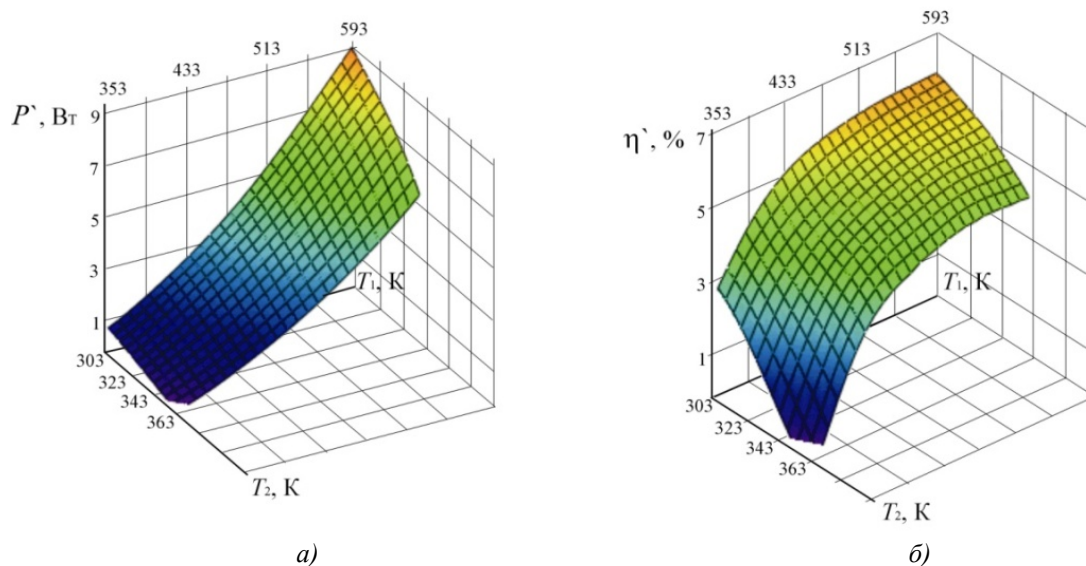


Рис. 3. Залежність електричної потужності P' (а) і ККД η' (б) від температури гарячої T_2 і холодної T_x сторін термоелектричного модуля «АЛТЕК-1061» [6].

З аналізу показаних на рис. 3 даних випливає, що для забезпечення вихідної електричної потужності нагрівача на рівні 90 – 70 Вт необхідно 12 модулів «АЛТЕК-1061». Виходячи з цих міркувань, найефективнішою конструкцією гарячого теплообмінника є правильний шестигранник, на кожній стороні якого розміщені по 2 термоелектричні модулі. При цьому температура гарячої сторони модулів повинна становити 330 – 280°C, холодної – 30 – 70°C.

Для подачі дизельного палива використано паливний насос (рис. 4) імпульсного типу рідинного передпускового нагрівника «Thermo Top E» (Webasto). Експериментально виміряну і необхідну для дальшого проектування гарячого теплообмінника залежність витрати палива g_n та теплової потужності Q дизельного пальника від періоду імпульсу t паливного насоса наведено на рис. 5.



Рис. 4. Зовнішній вигляд паливного насоса BTL.DP30.02.12V DAEMPFLER E-TEIL (Webasto) [5].

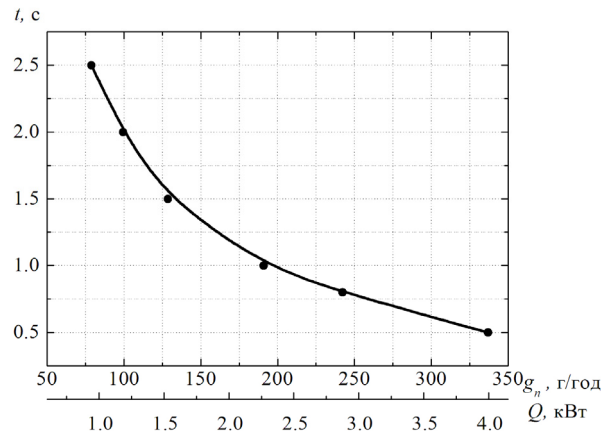


Рис. 5. Залежність витрати палива g_n та теплової потужності Q від періоду імпульсу t паливного насоса.

З наведених на рис. 5 даних видно, що максимальна потужність джерела тепла 4 кВт досягається за періоду імпульсу паливного насоса 0.5 с. При цьому витрата палива становить ~ 350 г/год.

Якщо врахувати, що ефективність термоелектричних генераторів, де використано однокаскадні модулі на основі телуриду вісмуту становить 3–3.5 % [7], то для забезпечення вихідної електричної потужності нагрівача на рівні 90–70 Вт необхідно затратити ~ 2.3 –2.5 кВт тепла, що відповідає витраті палива на рівні 180–220 г/год.

Як циркуляційний насос використано рідинну помпу (рис. 6) передпускового нагрівника «Thermo Top C» (Webasto). Такий тип помпи спеціально спроектований для прокачування теплоносія в транспортних засобах з об'ємом двигуна 2.5–4 л. На рис. 7 показано експериментально визначену і необхідну для подальшого моделювання холодних теплообмінників залежність витрати q_T рідкого теплоносія від напруги живлення U помпи.



Рис. 6. Зовнішній вигляд рідинної помпи 12V U4847 TT C/E (Webasto) [5].

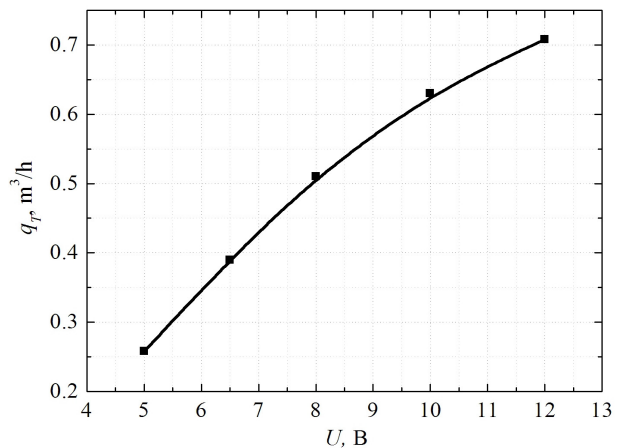


Рис. 7. Залежність витрати q_T рідкого теплоносія від напруги живлення U помпи.

Паливна помпа починає прокачувати теплоносії за напруги живлення 5 В з витратою 0.25 м³/год. За напруги 12 В витрата теплоносія максимальною і складає 0.7 м³/год.

Фізична модель термоелектричного передпускового нагрівача та її опис

Фізичну модель термоелектричного передпускового автомобільного нагрівача наведено на рис.8.

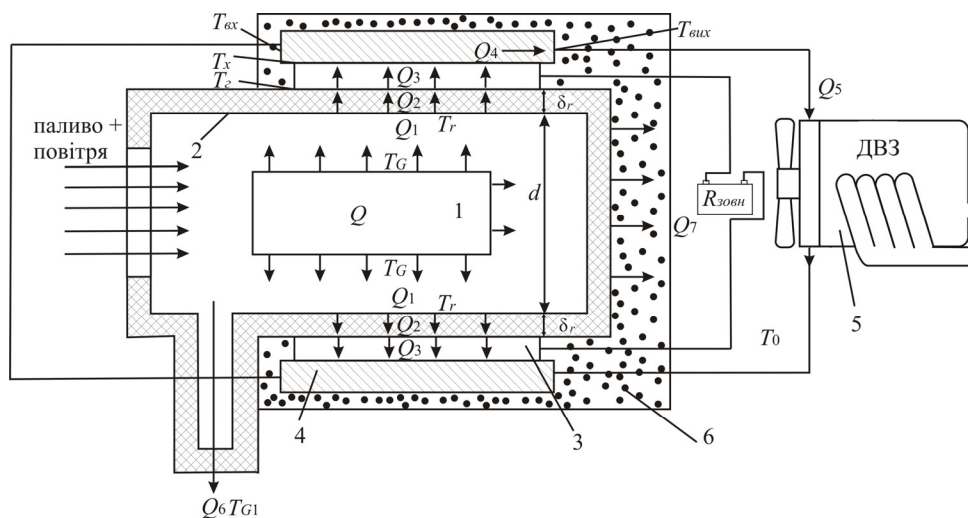


Рис. 8. Фізична модель термоелектричного автомобільного нагрівача:

- 1 – джерело тепла; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – термоелектрична батарея;
- 4 – холодний теплообмінник; 5 – двигун автомобіля; 6 – теплова ізоляція.

Джерелом тепла 1 в термоелектричному автомобільному нагрівнику є хімічна реакція полум'яного горіння дизельного палива, у результаті якої виділяється теплова потужність Q

$$Q = g_n G_n, \quad (1)$$

де G_n – теплотворна здатність дизельного палива; g_n – витрата дизпалива.

Тепло Q_1 , яке надходить від джерела тепла до гарячого теплообмінника 2 передається конвективним шляхом та випромінюванням –

$$Q_1 = \alpha \cdot (T_G - T_r) \cdot S_R + \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot \left(\varepsilon_G \cdot \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - A_r \cdot \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \right) \cdot S_R, \quad (2)$$

де α – конвективний коефіцієнт тепловіддачі від гарячого газу до теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника;

T_G – середня температура газів у гарячому теплообміннику;

T_r – середня температура теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника;

S_R – площа теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника;

$\varepsilon = (\varepsilon_r + 1)/2$ – ефективний ступінь чорноти системи «гарячий газ - теплоприймальна поверхня» гарячого теплообмінника;

ε_r – ступінь чорноти теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника;

σ_0 – стала Стефана-Больцмана;

ε_G – ступінь чорноти газу;

A_r – поглинальна здатність теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника.

Тепло Q_2 за рахунок теплопровідності передається від теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника гарячій стороні термобатарей (ТЕБ) 3:

$$Q_2 = \frac{S_r \cdot \lambda_r}{\delta_r} \cdot (T_r - T_2), \quad (3)$$

S_r – площа тепловіддаючої поверхні гарячого теплообмінника;

λ_r – теплопровідність матеріалу теплообмінника;

δ_r – товщина основи теплообмінника;

T_2 – температура гарячої сторони ТЕБ.

Корисне тепло Q_3 , що надходить до термоелектричних модулів, обчислюємо, виходячи з потужності P' одного модуля за визначених температур гарячої T_2 та холодної T_x сторін ТЕБ, його ККД η' та кількості модулів n :

$$Q_3(T_2, T_x) = n \cdot \frac{P'(T_2, T_x)}{\eta'(T_2, T_x)}. \quad (4)$$

Тепло Q_4 відводиться від холодної сторони ТЕБ потоком теплоносія, який циркулює в холодному рідинному теплообміннику 4

$$Q_4 = g_T \cdot c_{pT} \cdot (T_{ex} - T_{вих}), \quad (5)$$

де g_T – витрата теплоносія; c_{pT} – теплоємність теплоносія T_{ex} , $T_{вих}$ – температури теплоносія на вході та на виході системи охолодження ТЕБ відповідно.

Оскільки холодні рідинні теплообмінники об'єднані в один гідравлічний контур з системою охолодження двигуна 5, відведене теплоносієм тепло від модулів використовується на передпусковий прогрів двигуна –

$$Q_5 = c_D \cdot m_D \cdot (T_{вих} - T_0), \quad (6)$$

де c_D , m_D – теплоємність та маса двигуна автомобіля відповідно; T_0 – температура навколишнього середовища.

Основні втрати тепла визначаються таким чином:

1) Q_6 – з продуктами реакції (водою H_2O , вуглекислим газом CO_2 і азотом N_2) –

$$Q_6 = C_c \cdot m_c \cdot (T_{G1} - T_0), \quad (7)$$

де C_c – середня теплоємність продуктів реакції, m_c – маса продуктів реакції, T_{G1} – температура продуктів реакції.

2) Q_7 – на тепловій ізоляції

$$Q_7 = \frac{\lambda S_{p2}}{L} (T_B - T_0), \quad (8)$$

де λ – теплопровідність ізоляційного матеріалу; S_{p2} – площа поверхні гарячого теплообмінника, яка не зайнята термоелектричною батареєю; L – товщина шару теплоізоляції.

Таким чином, рівняння теплового балансу для обраної моделі термоелектричного автомобільного нагрівача можна записати у вигляді

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_6, \\ Q_1 = Q_2 + Q_7, \\ Q_2 = P + Q_4. \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язок системи рівнянь теплового балансу (9) дає змогу визначити основні енергетичні та конструктивні параметри термоелектричного автомобільного нагрівача.

Комп'ютерне проектування термоелектричного автомобільного нагрівача здійснювалося у два етапи, мета яких полягала у визначенні :

– температури газів T_G у гарячому теплообміннику та ефективної площі теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника S_R для забезпечення на гарячій стороні термобатареї температури $T_e = 330 - 280$ °С;

– теплової потужності Q_s , яка відводиться теплоносієм для оцінки швидкості прогріву двигуна автомобіля.

Розрахунок температури гарячих газів

Процес нагрівання газів у гарячому теплообміннику, які утворилися внаслідок згорання дизельного палива, описується рівнянням

$$Q = C_p \cdot (T_G - T_o), \quad (10)$$

де C_p – сумарна теплоємність газів, які утворилися в результаті згорання дизельного палива,

$$C_p = C_p(CO_2) + C_p(H_2O) + C_p(N_2) + C_p(\text{повітря}), \quad (11)$$

де $C_p(CO_2)$, $C_p(H_2O)$, $C_p(N_2)$, $C_p(\text{повітря})$ – теплоємність вуглекислого газу, води, азоту та повітря.

Теплоємність газу дорівнює

$$C_p = \left(\frac{i}{2} + 1\right) \cdot R \cdot \frac{M}{\mu}, \quad (12)$$

де i – кількість ступенів вільності газу, R – стала Менделєєва - Клапейрона, M – маса газу, μ – молярна маса газу.

Маси CO_2 та H_2O визначаються співвідношенням,

$$M(CO_2) = \frac{0.87 \cdot g_n \cdot \mu(CO_2)}{\mu(C)}, \quad (13)$$

$$M(H_2O) = \frac{0.13 \cdot g_n \cdot \mu(H_2O)}{\mu(H_2)}, \quad (14)$$

де коефіцієнти 0.87 і 0.13 визначають вміст C і H в дизельному паливі; $\mu(CO_2)$, $\mu(C)$, $\mu(H_2O)$ і $\mu(H_2)$ – молярні маси вуглекислого газу, вуглецю води та водню відповідно.

Маса азоту вираховується через масу кисню, яка необхідна для згорання дизельного палива:

$$M(N_2) = 4 \cdot M(O_2), \quad (15)$$

де

$$M(O_2) = \frac{0.87 \cdot g_n \cdot \mu(O_2)}{\mu(C)} + \frac{0.13 \cdot g_n \cdot \mu(O_2)}{2 \cdot \mu(H_2)}, \quad (16)$$

де $M(O_2)$ – маса кисню, яка потрібна для утворення CO_2 і H_2O .

Маса повітря, що утворилася в результаті спалювання палива,

$$M(\text{повітря}) = 5 \cdot (\kappa - 1) \cdot M(O_2), \quad (17)$$

де $\kappa > 1$ – коефіцієнт надлишку, що визначає кількість надлишкового повітря, яку необхідно затратити для повного згорання палива. В ідеалі $\kappa = 1$, проте в реальних умовах, використовуючи лише стехіометричну кількість кисню, повного згорання досягнути не можливо.

Підставляємо (13) – (17) в (10), прирівнюємо (10) та (1) і отримуємо співвідношення для визначення κ :

$$\kappa = \frac{\frac{G_n}{T_G - T_0} - 18.53}{16.85} + 1. \quad (18)$$

Коефіцієнти 18.53 і 16.85 визначають вміст вуглекислого газу, води, азоту та повітря, які утворилися в результаті повного згорання дизпалива і виведені з урахуванням конкретних значень i , μ газів та R .

З іншого боку, швидкість подачі повітря v в теплообмінник визначається із співвідношень

$$v = \frac{g_{нов}}{\rho_{T_0} \cdot S_R}, \quad (19)$$

$$g_{нов} = 5 \cdot \kappa \cdot M(O_2), \quad (20)$$

де $g_{нов}$ – витрата повітря, ρ_{T_0} – густина повітря за заданої температури навколишнього середовища.

Підстановкою (16) і (18) в (19) отримаємо залежність швидкості v від температури гарячих газів T_G в теплообміннику –

$$v = 5 \cdot \left[\frac{\frac{G_n}{T_G - T_0} - 18.53}{16.85} + 1 \right] \cdot \frac{3.36 \cdot g_n}{\rho_{T_0} \cdot \pi \cdot d^2 / 4}, \quad (21)$$

де 3.36 – коефіцієнт, що визначає кількість кисню, необхідну для повного спалювання дизпалива.

За допомогою пакета прикладних програм Mathcad визначали обернену залежність температури гарячих газів T_G від швидкості повітря v (рис. 9) за $G_n = 42.7$ МДж/кг, $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $g_n = 220$ г/год, $\rho_{T_0} = 1.29$ кг/м³ та діаметрі камери згорання $d = 70$ мм.

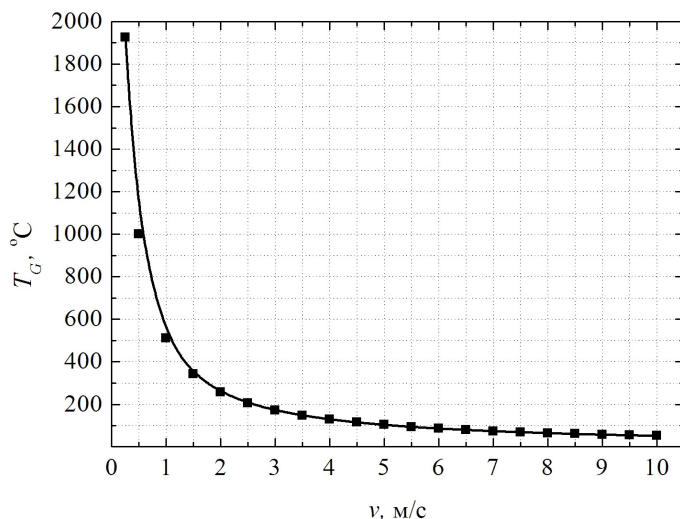


Рис. 9. Залежність температури гарячих газів T_G в теплообміннику від швидкості повітря v .

З аналізу наведених на рис. 9 даних випливає, що для дальших розрахунків конструкції гарячого теплообмінника не доцільно використовувати $T_G < 300^\circ$ і $T_G > 500^\circ\text{C}$: в першому випадку необхідні температури на гарячій стороні модуля досягнути неможливо, в другому – підвищення температури проводить до збільшення габаритних розмірів теплообмінника через ймовірність перегріву термобатареї.

Розрахунок гарячого теплообмінника

Для визначення залежності температури гарячої сторони модулів T_2 від площі теплоприймальної поверхні використовували температуру гарячих газів $T_G = 500 - 300^\circ\text{C}$, що відповідає швидкостям повітря 1 – 2 м/с.

Проектування здійснювались з використанням програмного середовища «Comsol Multiphysics» [8] чисельним методом скінченних елементів.

У процесі комп'ютерного проектування за вхідні дані використовувались такі величини:

- температура гарячих газів $T_G = (300; 400; 500)^\circ\text{C}$;
- швидкість газів в теплообміннику $v = (1; 1.5; 2)$ м/с;
- площа теплоприймальної поверхні $S_R = (0.025; 0.045; 0.07; 0.09)$ м²;
- теплопровідність матеріалу гарячого теплообмінника $\lambda_r = 140$ Вт/м·К;
- тепловий опір термоелектричного модуля $\kappa_M = 0.7$ м·К/Вт.

Припускалося, що стоки тепла знаходяться в місці виходу продуктів згорання з теплообмінника та в місцях розташування модулів, а на всіх інших границях накладені умови теплової адиабатичної ізоляції.

На рис. 10 наведено отримані в результаті комп'ютерного проектування залежності температури гарячої сторони модуля T_2 від площі теплоприймальної поверхні S_R за температур гарячих газів T_G у межах 500 – 300 °С.

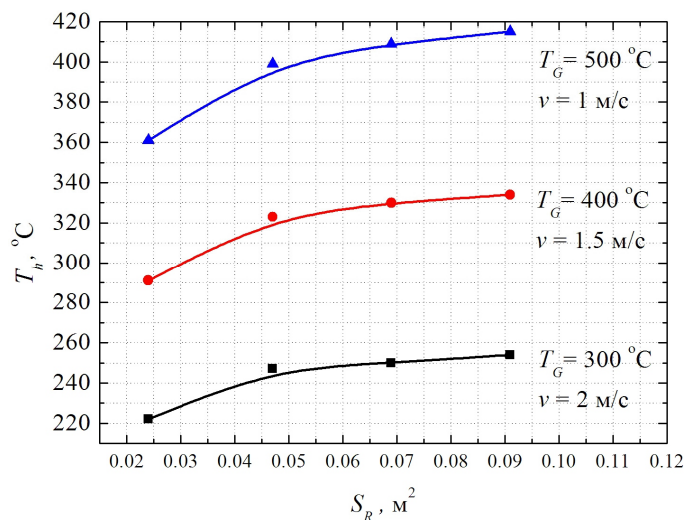


Рис. 10. Залежність температури гарячої сторони модуля T_2 від площі теплоприймальної поверхні S_R теплообмінника.

З показаних на рис. 10 даних видно, що у випадку нерозвинутої площі теплоприймальної поверхні ($S_R \sim 0.025$ м²) за $T_G = 400^\circ\text{C}$, T_2 наближається до оптимальної і становить 290°C . Збільшення площі теплообміну призводить до підвищення T_2 і за $S_R = 0.09$ м² досягається необхідний рівень температур на гарячій стороні модуля в 330°C .

На рис. 11 наведено розподіл температур у системі «гарячий теплообмінник-термоелектричні модулі», на рис. 12 – сітка методу скінченних елементів:

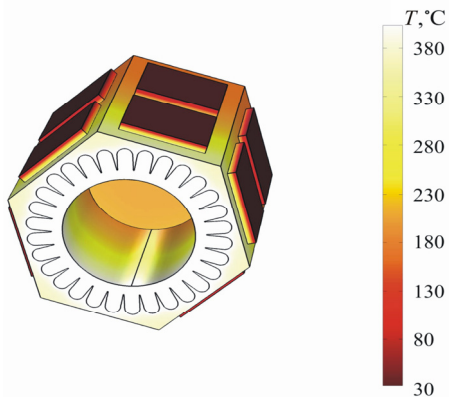


Рис. 11. Розподіл температур у системі «гарячий теплообмінник-термоелектричні модулі».
 $T_G = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $S_R = 0.09 \text{ м.}^2$

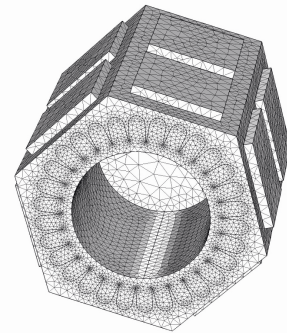


Рис. 12. Сітка методу скінченних елементів.

Слід зауважити, що комп'ютерна модель нагрівача є дещо спрощеним варіантом фізичної моделі. Щоб уникнути громіздких розрахунків для визначення потоків тепла з випромінюванням і конвекцією та втрат тепла з продуктами згорання, вважаємо, що процес теплопередачі відбувається внаслідок проходження через теплообмінник потоку газів з відомою температурою T_G на вході. Тому, як видно з рис. 11, у міру протікання газів до стоку тепла T_G зменшується, що призводить до зниження температури T_2 з 330 до 250 $^\circ\text{C}$. Проте, оскільки в реальній конструкції джерело тепла знаходиться безпосередньо в теплообміннику, можна вважати, що температура гарячої сторони модулів однакова.

Аналогічні розрахунки з визначення T_G за постійної $S_R = 0.09 \text{ м}^2$ і $g_n = 180 \text{ г/год}$ показують, що для забезпечення на гарячій стороні термобатарей температури 280 $^\circ\text{C}$ необхідно, щоб температура гарячих газів у теплообміннику знаходилась на рівні 350 $^\circ\text{C}$. У цьому випадку швидкість подачі повітря має становити 1.2 м/с.

Розрахунок холодних теплообмінників

Для швидкого прогріву двигуна автомобіля необхідно забезпечити максимальну передачу теплової потужності від модулів до холодного теплоносія. З іншого боку, для забезпечення ефективної роботи модулів важливим є створення таких умов, за яких різниця температур теплоносія між входом і виходом з теплообмінників була мінімальною. З цією метою на даному етапі моделювання визначались ефективна площа каналів холодних теплообмінників та оптимальна витрата рідкого теплоносія. Моделювання холодного теплообмінника здійснювалось методом скінченних елементів з використанням пакета прикладних програм «Comsol Multiphysics».

- У процесі комп'ютерного проектування за вхідні дані використовувались такі величини:
- температура холодного теплоносія на вході в холодний теплообмінник $T_{ex} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - сумарна теплова потужність, що відводиться від модулів в робочому режимі $Q_4 = 1.4 \text{ кВт}$;
 - витрата теплоносія $g_T = (0.25; 0.5; 0.7) \text{ м}^3/\text{год}$;
 - площа каналів холодного теплообмінника $S_k = (10 - 70) \text{ см}^2$;
 - теплопровідність матеріалу холодного теплообмінника $\lambda_{r1} = 105 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;

- теплоємність теплоносія (антифриз) $c_{pT} = 3151$ Дж/кг·К;
- теплопровідність теплоносія $\lambda_T = 0.34$ Вт/м·К.

При проектуванні стік тепла задавався в місцях виходу теплоносія з теплообмінника, а на всіх інших границях накладено умови адіабатичної теплової ізоляції.

На рис. 13 наведено залежність теплової потужності Q_5 , що відводиться від термоелектричних модулів до двигуна автомобіля від сумарної площі каналів S_k холодних теплообмінників за різних витрат теплоносія.

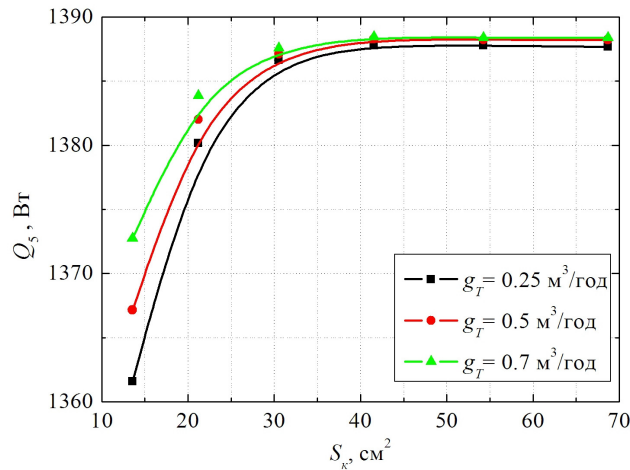


Рис. 13. Залежність теплової потужності Q_5 від площі каналів S_k холодних теплообмінників.

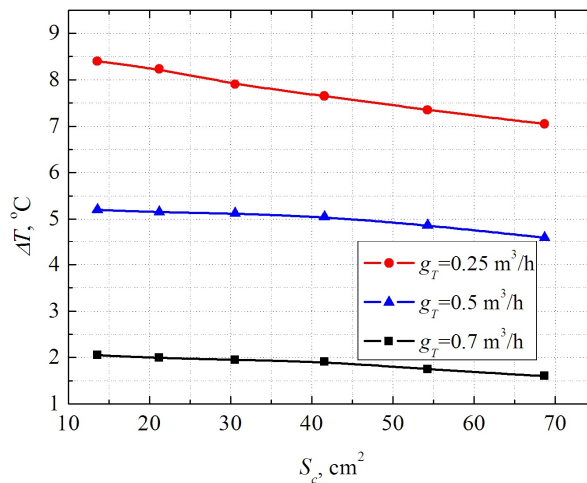


Рис. 14. Залежність різниці температур ΔT теплоносія між входом і виходом з холодних теплообмінників від площі каналів S_k .

З аналізу даних, показаних на рис. 13, випливає, що для повної передачі теплової потужності від модулів до двигуна необхідно, щоб площа каналів у холодних теплообмінниках становила не менше 40 cm^2 . За такої площі каналів Q_5 практично не залежить від витрати теплоносія, що в свою чергу робить можливим зменшити затрати вихідної електричної потужності нагрівача на живлення циркуляційної помпи. Проте, як випливає з рис. 14, витрата теплоносія має знаходитись на рівні $0.7 \text{ m}^3/\text{год}$. У цьому випадку перепад температур теплоносія між входом та виходом з теплообмінників є мінімальним і становить $\sim 2^\circ\text{C}$.

На рис. 15 наведено приклад розподілу температури у вузлах сітки (рис. 16) методу скінченних елементів для холодного теплообмінника.

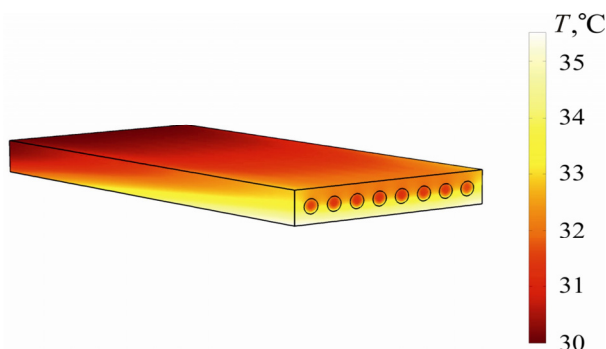


Рис. 15. Розподіл температур у холодному теплообміннику. $S_k = 40 \text{ см}^2$. $g_T = 0.7 \text{ м}^3/\text{год}$.

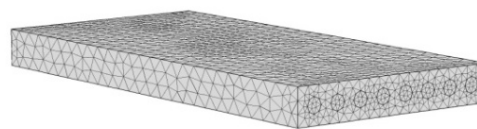


Рис. 16. Сітка методу скінченних елементів.

Згідно з (6) кількість тепла, яку необхідно затратити для прогріву двигуна теплоємністю $0.462 \text{ кДж}/(\text{кг К})$ (матеріал двигуна – сталь) і масою 200 кг від 0 °C до 30 °C буде становити $\sim 2.8 \text{ МДж}$. Якщо врахувати, що сумарна теплова потужність, яка відводиться від термобатарей теплоносієм з температурою $30 - 70 \text{ °C}$ становить $\sim 1.39 \text{ кВт}$ (рис. 17), то для передпускового прогріву двигуна необхідно $\sim 40 \text{ хв}$.

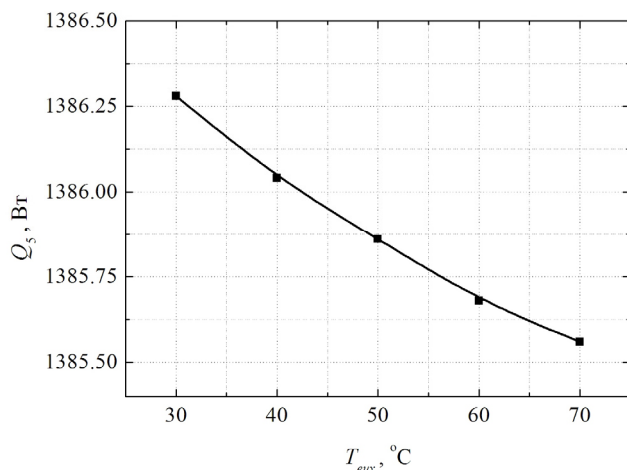


Рис. 17. Залежність теплової потужності Q_5 , яка відводиться теплоносієм від температури теплоносія $T_{\text{вих}}$ на виході з холодних теплообмінників.

У реальних умовах час прогріву двигуна буде дещо більшим, що пов'язано із втратами тепла внаслідок теплообміну двигуна з навколишнім середовищем, з втратами при перенесенні тепла по контуру охолодження, а також з наявністю гідравлічних опорів у системі «нагрівник-двигун».

Висновки

1. Встановлено, що вихідна електрична потужність нагрівача на рівні $90 - 70 \text{ Вт}$ досягається з використанням 12 модулів «АЛТЕК-1061» з температурами на гарячій та холодній сторонах $330 - 280 \text{ °C}$ і $30 - 70 \text{ °C}$ відповідно. З ККД нагрівача в межах $3 - 3.5\%$, для досягнення такої електричної потужності необхідно затратити $\sim 2.3 - 2.5 \text{ кВт}$ тепла, що відповідає витраті палива на рівні $180 - 220 \text{ г/год}$.
2. Показано, що необхідний рівень температур на гарячій стороні термобатарей, а саме $T_2 = 330 - 280 \text{ °C}$, досягається за температури газів у гарячому теплообміннику в інтервалі $400 - 350 \text{ °C}$, швидкості

подачі повітря в камеру згорання 1.5 – 1.2 м/с та площі теплоприймальної поверхні гарячого теплообмінника 0.09 м².

3. Встановлено, що сумарна теплова потужність, яка передається від термобатарей до теплоносія, становить ~ 1.39 кВт. З витратою теплоносія 0.7 м³/год та площі каналів холодних теплообмінників 40 см² забезпечується як повна передача теплової потужності від теплоносія до двигуна автомобіля, так і мінімальна різниця температури теплоносія між входом та виходом з теплообмінників. У цих умовах за температури теплоносія 30 – 70 °С для передпускового прогріву двигуна від 0 °С до 30 °С необхідно ~ 40 хв.

Автори висловлюють подяку акад. Анатичуку Л.І. за тему та ідею наукового дослідження і м.н.с. Мочернюку Р.М. за корисні поради з комп'ютерного моделювання.

Література

1. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях. / В.С. Найман // Москва: АСТ, 2007. – с. 213.
2. Михайловський В.Я. Режимы работы автомобилей при пониженных температурах. Необходимость использования нагревателей та рациональность застосування термогенераторів для їх роботи / В.Я. Михайловський, М.В. Максимук // Термоелектрика. – 2015. – №3. – С.20 – 31.
3. Михайловський В.Я. Рациональные мощности термогенераторів для передпусковых нагрівачів транспортних засобів / В.Я. Михайловський, М.В. Максимук // Термоелектрика. – 2015.– №4. – С.69 – 77.
4. Патент (UA) № 72304. МПК: F01N 5/00; H01L35/00. Автомобільний обігрівач з термоелектричним джерелом живлення / Анатичук Л.І., Михайловський В.Я. – Опубл. 10.08.2012, бюл. № 15, Заявка u2012 02055 від 23.02.2012.
5. <http://www.webasto.com/ua/>
6. <http://www.inst.cv.ua>
7. Анатичук Л.І. Двохсекційний термоелектричний генератор на газовому паливі / Л.І. Анатичук, В.Я. Михайловський // Термоелектрика. – 2008. – №1. – С.76 – 86.
8. www.comsol.com

Надійшла до редакції 16.02.2016.



Константинович І.А.

Константинович І.А.^{1,2}, Рендигевич О.В.²

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

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



Рендигевич О.В.

ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІРОТРОПНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ У РЕЖИМІ ГЕНЕРАЦІЇ

В роботі аналітичними та числовими методами досліджено основні співвідношення для розрахунку оптимальних характеристик гіротропних термоелементів в режимі генерації електричної енергії. Розглянуто термоелектричні матеріали $InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3 для гіротропних термоелементів. Для матеріалу $InSb$ проведено комп'ютерне моделювання й отримано розподіли температур в гіротропних термоелементах різної форми. Отримано залежності ККД від температури для гіротропних термоелементів оптимальної, прямокутної та кільцевої форм.

Ключові слова: гіротропний термоелемент, магнітне поле, термоелектричний матеріал, добротність, ККД.

In this paper, analytical and numerical methods were used to study the basic relations for the calculation of optimal characteristics of gyrotropic thermoelements in electric energy generation mode. The $InSb$, $InAs$ and Bi_2Te_3 thermoelectric materials for gyrotropic thermoelements were examined. Computer simulation was performed for $InSb$ material and temperature distributions in various-shaped gyrotropic thermoelements were found. The temperature dependences of efficiency for gyrotropic thermoelements of optimal, rectangular and annular shapes were obtained.

Key words: gyrotropic thermocouple, magnetic field, a thermoelectric material, good quality, efficiency.

Вступ

Відомо, що термоелектричні прилади та системи, розроблені на їх основі, широко застосовуються в енергетиці, холодильній і вимірювальній техніці [1 – 3]. Основні досягнення термоелектрики в галузі приладобудування здобуто саме на базі фізики термопарних термоелементів. Однак перспективним напрямком розвитку термоелектрики залишається винайдення нових типів термоелементів, зокрема на основі гіротропних середовищ та покращення ефективності існуючих. Дослідженню властивостей гіротропних термоелементів присвячено ряд робіт [1 – 16].

Гіротропні термоелементи мають ряд привабливих властивостей:

- відсутність внутрішніх спаїв, що забезпечує їх надійність і технологічність;
- можливість безпайного з'єднання кілець у просторову спіральну структуру для нарощування необхідних напруг;
- можливість підвищення ефективності під дією температурного і магнітного полів, особливо при їх використанні у вимірювальній техніці.

Тому актуальність роботи полягає у необхідності підвищення ефективності та надійності термоелектричних перетворювачів енергії на основі гіротропних термоелементів для подальшого їх використання у приладобудуванні.

Метою роботи є оцінка ефективності гіротропних термоелементів у режимі генерації електричної енергії.

Математична модель

Рівняння теплопровідності для однорідного гіротропного середовища має наступний вигляд [1]:

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2\alpha_B \left(j_y \frac{\partial T}{\partial x} - j_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де κ – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища; ρ_0 – питомий електричний опір; j – модуль вектора густини електричного струму; j_x, j_y – проєкції вектора \mathbf{j} в декартовій системі координат; $\alpha_B = Q_{\perp} B$ – асиметрична частина тензора термоЕРС, що в гіротропному середовищі має вигляд

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_B & 0 \\ -\alpha_B & \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де Q_{\perp} – коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена.

Враховуючи аксіальну симетрію системи, запишемо вираз (1) у полярній системі координат

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2Q_{\perp} B \left(j_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{j_r}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) = 0, \quad (3)$$

де j_{φ} – азимутальна та радіальна складові вектора густини струму \mathbf{j} , $r_1 \leq r \leq r_2$ – радіус термоелемента.

Результати комп'ютерного моделювання

Для побудови комп'ютерної моделі гіротропних термоелементів прямокутної, спіральної та оптимальної форм використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [17]. Розрахунок розподілів температур в гіротропних термоелементах здійснювався методом скінченних елементів. За допомогою комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температур в гіротропних термоелементах різної форми для матеріалу *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К та магнітному полі з індукцією $B = 1$ Тл. На рис. 1 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (a) та розподілу температур (b) в гіротропному термоелементі прямокутної форми (термоелемент Нернста-Еттінгсгаузена).

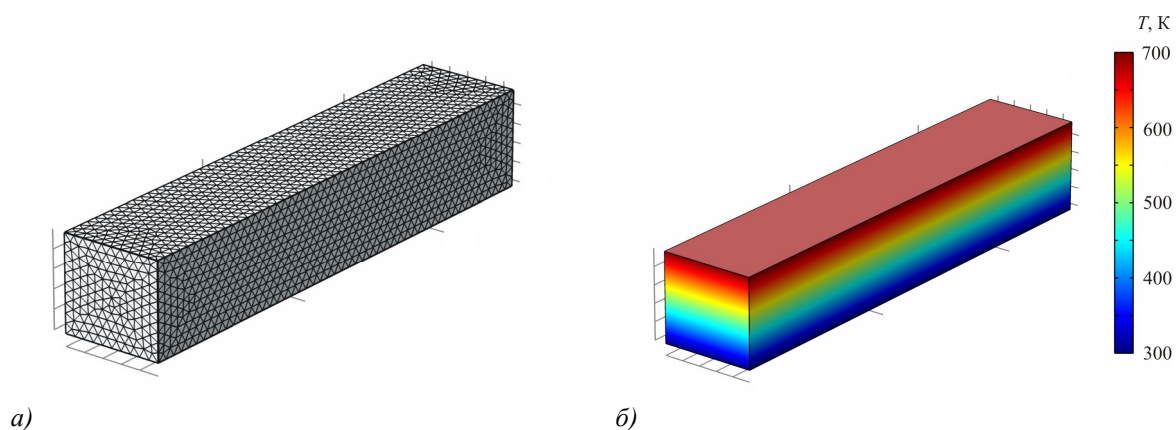


Рис. 1. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі прямокутної форми.

На рис. 2 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в спіральному гіротропному термоелементі.

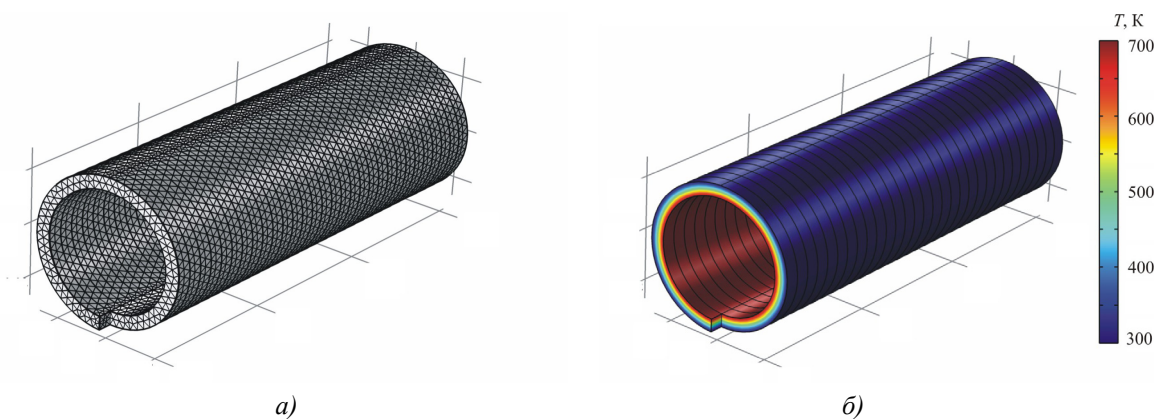


Рис. 2. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному спіральному термоелементі.

На рис. 3 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі оптимальної форми.

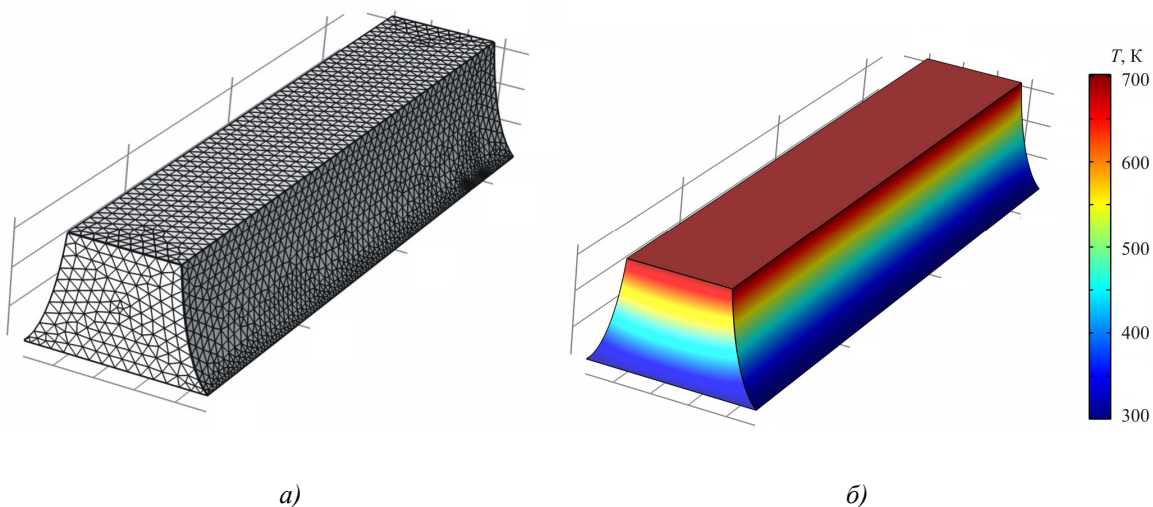


Рис. 3. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі оптимальної форми.

Розрахунок ККД

Відомо, що ККД гіротропного термоелемента оптимальної форми [2] визначається наступним чином:

$$\eta_1 = \eta_k \frac{1}{1 + \frac{2M_H(1+M_H)}{T_2 Z_H}} \quad (4)$$

де $M_H = \sqrt{1 - Z_H \bar{T}}$, Z_H – термомагнітна добротність, T_2 – температура гарячої сторони, η_k – ККД циклу Карно, \bar{T} – середня температура.

ККД гіротропного термоелемента прямокутної форми має наступний вигляд [1]:

$$\eta_2 = \frac{\eta_k}{\frac{4}{Z_H T_2} - \frac{2T_1}{T_2} - \frac{1}{2}\eta_k} \quad (5)$$

де T_1 – температура холодної сторони.

Для кільцевого гіротропного термоелемента ККД [3]:

$$\eta_3 = Z_H \frac{\Delta T}{4} \quad (6)$$

На рис. 4 наведено температурні залежності добротності для термоелектричних матеріалів *InSb*, *InAs* та *Bi₂Te₃*. Видно, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є *InSb*, що узгоджується з експериментальними результатами, приведеними в роботі [1].

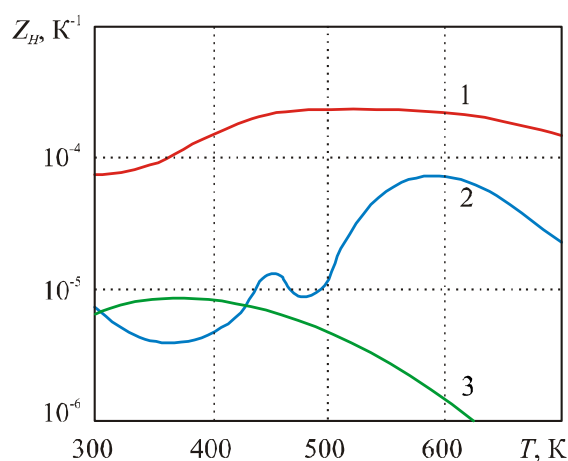


Рис. 4. Температурні залежності добротності термоелектричних матеріалів для гіротропних термоелементів (1 – *InSb*, 2 – *InAs*, 3 – *Bi₂Te₃*).

Для розрахунків було вибрано матеріал *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К. Гіротропні термоелементи різної форми піддавались дії магнітного поля з індукцією 1 Тл. За даними розрахунків побудовані залежності ККД від температури гарячої сторони термоелемента T_2 при постійній холодній стороні $T_1 = 300$ К для *InSb* (рис. 5).

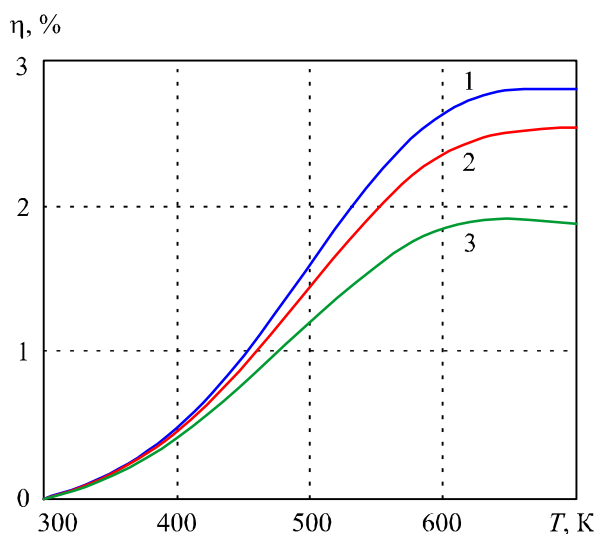


Рис. 5. Залежність ККД від температури для гіротропних термоелементів різної форми (1 – оптимальної форми, 2 – прямокутної форми, 3 – кільцевої форми).

З рис. 5 видно, що при перепаді температур між гарячою та холодною стороною 400 К та магнітному полі з індукцією 1 Тл для гіротропного термоелемента оптимальної форми максимальне значення ККД складає приблизно 2.8 %, що менше ніж у терморпних елементів на основі Bi_2Te_3 та $PbTe$. Однак гіротропні термоелементи характеризуються підвищеною надійністю і можливістю нарощування високих напруг завдяки безпайному з'єднанні у просторову спіральну структуру, що робить такі термоелементи перспективними для використання у вимірювальній та військовій техніці. Такі термоелементи також можуть бути використані для виготовлення високочутливих сенсорів температури і теплового потоку.

Висновки

1. Виконано порівняння параметрів термоелектричних матеріалів ($InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3) для гіротропних термоелементів. Встановлено, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є $InSb$, середнє значення добротності якого в інтервалі температур 400 – 600 К становить $4 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$.
2. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропних термоелементів прямокутної, спіральної та оптимальної форм для термоелектричного матеріалу $InSb$.
3. Визначено температурні залежності ККД для гіротропних термоелементів різної форми. Встановлено, що максимальне значення ККД гіротропного термоелемента оптимальної форми для матеріалу $InSb$ в інтервалі температур 300 – 700 К і магнітній індукції 1 Тл становить 2.8 %.

Література

1. Анатичук. Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства Киев, Наукова думка. – 1979. 766 с.
2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. – Черновцы: Рута, 2006. – 226 с.
3. Анатичук. Л.И. „Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии”. Киев, Черновцы: „Наукова думка”, 2003. – 386 с.

4. Самойлович А.Г, Коренблит Л.Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках //УФН. – 1953. – Т. 49, № 2. – С. 243 – 272.
5. Nakamura H., Ikeda K., Yamaguchi S. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. // XVI-th international conference on thermoelectrics, – Dresden, Germany. – 1997. – P. 142 – 146.
6. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Федорук Я.Г., Шинкарук С.М. Вихрові термоелектричні струми в гіротропному середовищі з радіальним розподілом температури // Термоелектрика. – 2004. – № 1. – С. 19 – 24.
7. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Гіротропний термоелемент в неоднорідному магнітному полі//Термоелектрика. – 2006. – №1. – С. 16 – 22.
8. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Оптимізація матеріалів для гіротропних термоелементів//Термоелектрика. – 2008. – №4. – С. 21 – 26.
9. Агаєв З. Ф., Арасли Д. Г., Алиев С. А. Термомагнітний перетворювач ІЧ-випромінювання. – Проблеми енергетики. – 2003. – № 3. – С. 12 – 21.
10. Немов С.А., Прошин В.І., Тарантасов Г.Л., Парфен'єв Р.В., Шамшур Д.В., Черняев А.В. Поперечний ефект Нернста-Еттінгсгаузена, резонансне розсіяння та надпровідність у *SnTe*: Ін. – Фізика твердого тіла. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 461 – 464.
11. Harman T.G., Honig J.M. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. – New York, Mc. Graw – Hill, 1967. – 377 p.
12. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field //Research report. NIFS series, Nagoya, Japan (1998). – 23 p.
13. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field.// Proceedings of XVI International conference on Thermoelectrics. – Dresden (Germany). August 26-29, 1997. – P. 142 – 146.
14. Баранський П.І., Гайдар Г.П. Анізотропія термоелектричних властивостей багатодолинних напівпровідників кубічної симетрії під впливом зовнішніх спрямованих дій. – Термоелектрика, 2014, №1, ст. 13.
15. Goldsmid H.J., Volckmann E.H. Galvanomagnetic and thermoelectric measurements on polycrystalline//Proceedings of 16 International conference on Thermoelectrics. Dresden (Germany), August 26 – 29, 1997. – P. 142 – 146.
16. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Low-temperature Thermoelectric Cooling under Optimal Legs Inhomogeneity in the Optimal Nonuniform Magnetic Field, in Proceedings of the 16 International Conference on Thermoelectrics, Dresden, August 26-29, 1997. – P. 397 – 400.
17. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 08.01.16

УДК 538.9



Антонюк В.В.

Антонюк В.В., Скрипський І.М.

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



Скрипський І.М.

**КОНТАКТНІ КОМУТАЦІЙНІ СТРУКТУРИ
ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ТЕМ НА
ОСНОВІ ТЕЛУРИДУ ВІСМУТУ**

Розроблено спосіб одержання тонких багатошарових контактних структур на термоелектричному матеріалі генераторного типу та досліджено їх антидифузійні властивості. Показано, що максимальна динамічна стійкість термоелектричних приладів спостерігається у випадку, коли сплави металів підгрупи заліза з фосфором та вольфрамом з аморфною структурою використовуються як антидифузійні шари.

Встановлено, що запропоновані контактні структури дають можливість мінімізувати негативний вплив неоднорідності коефіцієнтів теплового розширення термоелектричного матеріалу і антидифузійних плівок, що суттєво збільшує час експлуатації термоелектричних пристроїв.

Ключові слова: термоелектричний матеріал, телурид вісмуту, антидифузійні шари, багатошарові плівки, сплав нікель-вольфрам.

A method for preparation of thin multilayer contact structures based on generator thermoelectric material is developed and their antidiffusion properties are studied. It is shown that maximum dynamic stability of thermoelectric devices is observed in the case when alloys of iron subgroup metals with phosphorous and tungsten having amorphous structure are used as antidiffusion layers.

It is established that contact structures proposed here allow minimization of the negative effect of inconsistency between thermal expansion coefficients of thermoelectric material and antidiffusion films which increases considerably the service life of thermoelectric devices.

Key words: thermoelectric material, bismuth telluride, anti-diffusion layers, multi-layer films, nickel-tungsten alloy.

Вступ

Твердотілі термоелектричні перетворювачі енергії мають низку суттєвих переваг перед традиційними електричними генераторами і знаходять все ширше застосування. Однак наразі забезпечувана термоелектричними установками ефективність перетворення нижча, ніж у генераторів звичайної конструкції. Крім того, сучасний стан виробництва термоелектричних перетворювачів характеризується невиправдано високим споживанням термоелектричного матеріалу і внаслідок цього високою собівартістю [1].

Одним із факторів, що обмежує широке практичне використання термоелектричних перетворювачів, є недостатня надійність контактних і комутаційних структур термоелементів. В умовах практичної експлуатації термоелектричний і комутаційний матеріали мають мати взаємну фізичну і хімічну стійкість, яка, з одного боку, забезпечує їх довготривалу

експлуатацію, а з іншого – створює резерв для збільшення ККД перетворення за рахунок підвищення робочої температури.

Відомі різні методи комутації термоелементів: паяння, заливка розплавом, сумісне пресування термоелектричних віток і комутаційного матеріалу, термічне, магнетронне, іонно-кластерне напилення комутаційних матеріалів у вакуумі або інертному газі, гальванічне або хімічне нанесення комутаційного матеріалу.

Першочерговим є вибір комутаційних матеріалів, які безпосередньо контактують з напівпровідниковими вітками. Елементи підгрупи заліза *Ni*, *Co*, *Fe* хімічно інертні відносно напівпровідникового матеріалу, мають задовільні антидифузійні властивості, добре змочуються припоями, їх коефіцієнти лінійного розширення близькі до коефіцієнта лінійного розширення термоелектричного матеріалу [2].

Способи хімічного та гальванічного нанесення металів на напівпровідники дають можливість уникнути труднощів, що виникають внаслідок термічної обробки термоелементів при паянні, пресуванні, плазмовому напиленні, заливці розплавом, оскільки гальванічні процеси протікають за низьких температур, прості у виконанні, не вимагають дороговартісного обладнання і роблять можливим ефективно регулювати товщину осаджених шарів.

Перспективний шлях розв'язання цієї проблеми – створення контактних і комутаційних шарів з наперед заданими властивостями і технологій їх з'єднання з термоелектричними матеріалами з досягненням гранично низьких значень контактних опорів [3].

Вирішальне значення для технологічних властивостей електролітичних покриттів металами та їх сплавами має структура осаду. Оцінювати структуру того чи іншого електролітичного покриття можна не тільки рентенографічних та металографічних досліджень, але за результатами поляризаційних вимірювань.

Спосіб отримання сплавів гальванічним шляхом відомий давно. Однак систематичним вивченням загальних властивостей електролітичного осадження сплавів почали займатись порівняно недавно. Практичне значення цих робіт в тому, що вони значно розширюють асортимент гальванічних покриттів, а в багатьох випадках покриття зі сплавів володіють цінними властивостями, які немає у металах, з яких складається даний сплав. Гальванічне покриття сплавами пов'язано з низькою специфічних труднощів. Наприклад, потрібне більше точне регулювання таких параметрів технологічного процесу, як густина струму на електродах, концентрація іонів випадках осаджуваних металів. У багатьох випадків осадження сплавів здійснюється гальванотермічним способом, який полягає в черговості нанесення тонких шарів кожного з металів і подальшій термічній обробці виробів, під час якої метали взаємно дифундують, утворюючи сплав змінного складу. Цей метод не знайшов такого широкого застосування, як гальванічний [4].

Експериментальна частина

Проводились експериментальні роботи з осадження антидифузійних шарів на зразки ТЕМ на основі телуриду вісмуту, одержаних послідовним нанесенням тонких (1.5 – 3 мкм) шарів металів підгрупи нікелю та їх сплавів з іншими металами.

На диски термоелектричного матеріалу, синтезованого в Інституті термоелектрики, після попередньої підготовки їх поверхні за методикою, прийнятою в ІТЕ, наносились такі покриття:

1. ТЕМ | *SnNi*(10 мкм) | *SnBi*(4 мкм) – для дисків *n*- і *p*-типу;
2. ТЕМ | *NiW*(3 мкм) | *SnNi*(10 мкм) | *SnBi*(4 мкм) – для дисків *n*-типу;

3. ТЕМ |Fe(3мкм) | NiW(3 мкм) | SnNi(10 мкм) | SnBi(4 мкм) – для дисків *p*-типу;
4. ТЕМ |Co_{хім.}(3 мкм) | SnNi(10 мкм) | SnBi(4 мкм) – для дисків *n*- і *p*-типу.
Покриття наносилися з електrolітів і за умов, описаних у [5 – 7].

Таблиця

Зміна характеристик термоелектричних пристроїв

| Склад покриття на вітках | Час відпалу, год. | ΔR , Ом | ΔW , Вт | $\Delta \eta$, % |
|--|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| ТЕМ NiW(3 мкм) SnNi(10 мкм) SnBi(4 мкм) – для дисків <i>n</i> -типу; | 50 | 0.003 | 0.9 | 0.18 |
| | 100 | 0.014 | 0.67 | 0.01 |
| ТЕМ Fe(3мкм) NiW(3 мкм) SnNi(10 мкм) SnBi(4 мкм) – для дисків <i>p</i> -типу | 200 | 0.026 | 0.59 | - 0.1 |
| | 300 | 0.043 | 0.39 | - 0.25 |
| ТЕМ Co _{хім.} (3 мкм) SnNi(10 мкм) SnBi(4 мкм) – для дисків <i>n</i> - і <i>p</i> -типу | 50 | 0.003 | - 0.05 | - 0.19 |
| | 100 | 0.014 | - 0.42 | - 0.28 |
| | 200 | 0.107 | - 0.58 | - 0.56 |
| | 300 | 1.58 | - 1.10 | - 0.86 |
| ТЕМ SnNi(10 мкм) SnBi(4 мкм) – для дисків <i>n</i> - і <i>p</i> -типу | 50 | 0.05 | - 0.33 | - 0.24 |
| | 100 | 0.19 | - 0.55 | - 0.63 |

З металізованих дисків ТЕМ за допомогою струнного інструменту з нанесеним абразивом нарізалися вітки, з яких були змонтовані термоелектричні пристрої та виміряні їх найважливіші показники – опір *R*, потужність *W*, ККД η . Пристрої піддавались відпалу за температури 200°C і через певні проміжки часу проводились повторні виміри показників.

Обговорення результатів

Як видно з таблиці 1, багатошарові комбіновані плівки заліза, сплавів нікель-вольфрам, нікель-олово та олово-вісмут, нанесені на диски ТЕМ, дають можливість значно підвищити ресурсну стійкість та надійність термоелектричних приладів.

На думку авторів, це зумовлено такими чинниками.

1. Як залізо, так і сплав нікель-вольфрам, значно пасивніші у реакціях зі складовими компонентами термоелектричного матеріалу порівняно з іншими досліджуваними покриттями – кобальтом і сплавом нікель-олово. Ці сплави за своїми властивостями належать до жаростійких сплавів за рахунок вмісту вольфраму та заліза. Згідно з даними досліджень дифузійних процесів [8] контакт кобальту з телуридом вісмуту і сурми руйнується з утворенням реактивнодифузійного шару твердого розчину телуриду та стибіду кобальту. Товщина цього шару збільшується з часом і підвищенням робочої температури. Характерною ознакою такого шару є низька механічна стійкість. Для заданого перерізу віток досягнення шаром критичної товщини супроводжується руйнуванням контакту виникаючими термічними напруженнями, що суттєво знижує їх ресурсну стабільність [9].
2. Нікель-вольфрамкові плівки, на відміну від чисто нікелевих чи кобальтових, мають рентгеноаморфну структуру, і, відповідно, менші внутрішні напруження. І хоча сплав нікель-олово, нанесений за даних умов, також рентгеноаморфний, його компоненти значно активніше взаємодіють з компонентами термоелектричного матеріалу за підвищених температур, ніж залізо і вольфрам. Адгезійна міцність

досліджуваних покриттів становить 17 – 20 МПА для зразків *n*-типу та 15 – 17 МПА для зразків *p*-типу.

3. Формуючи антидифузійні покриття з тонких шарів різних металів або їх сплавів, ми перекриваємо пори, тріщини та інші дефекти, які завжди наявні в гальванічних плівках, шаром іншого металу або сплаву, що значно покращує антидифузійні властивості порівняно з плівкою одного металу.

Висновки

- 1 Для мінімізації негативного впливу таких факторів, як невідповідність коефіцієнтів лінійного розширення між ТЕМ і контактними антидифузійними структурами, внутрішніх напруг самого покриття, які призводять до суттєвого зменшення динамічної стійкості контактних структур, як антидифузійні шари запропоновано застосовувати хімічно або електролітично нанесені тонкі (до 3-х мкм) багатошарові плівки металів та їх сплавів.
- 2 Встановлено, що максимальна динамічна стійкість композитних контактних і комутаційних структур на основі хімічно або електролітично нанесених тонких багатошарових плівок металів та їх сплавів спостерігається у випадку, коли для таких покриттів використовуються метали підгрупи заліза та їх гальванічні сплави з вольфрамом.
- 3 Потенціал виділення окремо кожного з металів від'ємніший, ніж потенціал, за якого утворюється сплав (з утворенням твердого розчину потенціальна енергія його компонентів зменшується). Ця різниця може бути настільки великою, що на катоді розряджаються іони металів, осадження яких в чистому вигляді з водних розчинів неможливе. Прикладом може бути електролітичне осадження сплавів вольфраму з нікелем, залізом та іншими металами, в той час, як отримати чисто вольфрамові покриття можливо тільки з розплавів.

Література

1. Анатычук Л.И.. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. / Л.И. Анатычук // – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
2. Pat. USA 4654224 МКИ: НОИЛ35/34 Method of manufacturing a thermoelectric element //Allred D., Dec K., - Published. 31/03/1987.
3. Анатычук Л.И.. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. / Л.И. Анатычук, В.А. Семенюк // – Черновцы: Прут, 1992 – 264 с.
4. Вайнер Я. В. Технология электрохимических покрытий. / Я. В. Вайнер, М.А. Дасоян // М., «Машгиз», 1962. – 347с.
5. Вишенков С.А. Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. / С.А. Вишенков // М., «Машиностроение», 1975. – 312 с.
6. Садаков Г.А. Гальванопластика. / Г.А. Саадаков // – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
7. Пат. RU 2 446 390 С1, МПК С 25 D 3/56. Электролит и способ для получения защитного покрытия сплавом никель-вольфрам / Федосюк В.М., Малюш М.М., Сосновская Л.Б. и др.; Институт физики твердого тела и полупроводников АН Беларуси. - № 95105857/02; заявл. 14.04.1995; опубл. 27.07.1998.
8. Соколова В.М.. Исследование диффузионных процессов в низкотемпературных термоэлементах. / В.М. Соколова, Л.Д. Дудкин, Л.И. Петрова, Н.Х. Абрикосов // Гелиотехника.- 1978.- № 1. – С. 18 –21.
9. Соколова В.М.. Расчет ресурсной стабильности низкотемпературных термобатарей. / В.М. Соколова, Л.Д. Дудкин, В.А. Мазур // Гелиотехника. – 1978. – № 5. – С. 7 – 10.

Надійшла до редакції 14.01.2016.

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.

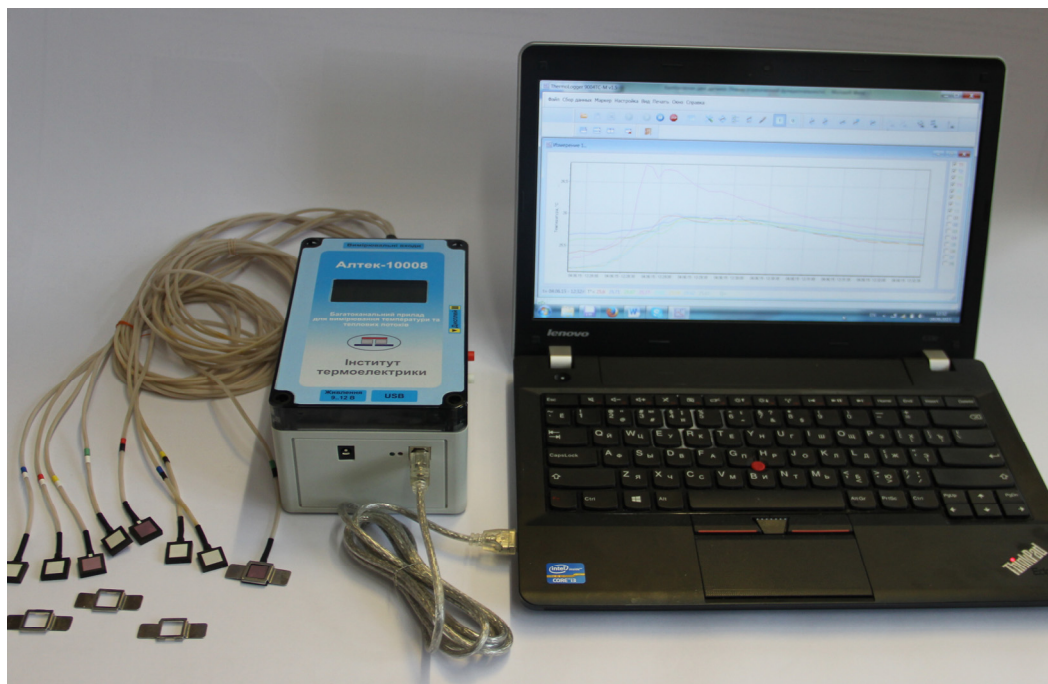
Важливим фактором при дослідженні теплових потоків тіла людини за допомогою термоелектричних сенсорів є точність та швидкодія реєстрації сигналів термоелектричних сенсорів.

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, °С | 0 ÷ + 50 |
| 11. | Точність вимірювання температури, °С | 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 АА, 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 АА (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.

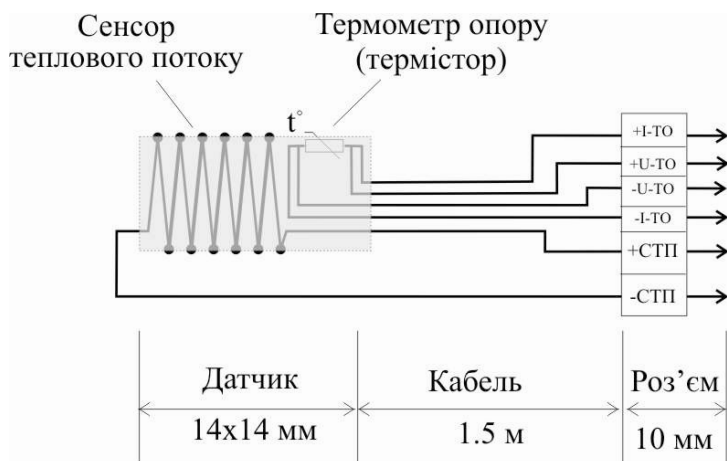


Рис. 2. Схема термоелектричного зонда.

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 экспресс-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.

Анатичук Л.І.^{1,2}, Гаврилюк М.В.¹, Лисько В.В.¹, Тюменцев В.А.¹

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

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

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС «АЛТЕК-10003» ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЛИТКІВ МАТЕРІАЛІВ

Показано результати розробки автоматизованої системи «АЛТЕК-10003», призначеної для автоматизації процесу вимірювань властивостей термоелектричних матеріалів у вигляді стрижнів і обробки їх результатів. Блок керування містить багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач, систему переміщення вимірювальних зондів, систему терморегулювання і джерела живлення елементів вимірювального блока. Управління процесом вимірювань, обробка та відображення результатів здійснюється за допомогою комп'ютера, до якого блок вимірювань підключається по стандартному каналу USB. Результати відображаються у вигляді графіків і таблиць.

Наведено приклади використання розробленої системи управління вимірювальною системою для визначення розподілів термоелектричних властивостей матеріалу в стрижнях, а також аналіз точності та відтворюваності результатів.

Ключові слова: електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, похибка, термоелектричний матеріал, автоматизація.

The results of development of automated system "ALTEC-10003" intended for automation of the process of measuring the properties of thermoelectric material shaped as rods and data processing are presented. Control unit comprises a multi-channel analog-digital converter, measuring probes travel system, thermal control system and power supplies for measuring unit components. Measurement process control, processing and display of the results are done with the aid of computer to which measuring unit is connected via standard USB channel. The results are displayed as plots and tables.

Examples of using the elaborated measuring system control to determine the distributions of material thermoelectric properties in the rods, as well as the analysis of precision and reproducibility of the results are presented.

Key words: electric conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, error, thermoelectric material, automation.

Вступ

Загальна характеристика проблеми

Найкращими матеріалами, які використовуються у термоелектричних модулях для холодильної техніки, нині залишаються з'єднання вісмуту (Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Bi_2Sb_3) та їх тверді розчини. Для отримання таких термоелектричних матеріалів у промислових умовах поширеними методами є зонна перекристалізація та екструзія [1]. У першому випадку, внаслідок сегрегації домішок в процесі вирощування та інших факторів, отриманий матеріал є

неоднорідним, особливо на кінцях стрижнів. Для екструдованого матеріалу також характерні значні спотворення однорідності на початку стрижня, коли умови процесу ще не стабілізувались.

Тому важливу роль при виготовленні модулів відіграє контроль якості термоелектричного матеріалу. При цьому одне з найважливіших завдань у створенні обладнання для контролю якості – його швидкодія та незалежність від суб'єктивних факторів. Для цього є корисною повна автоматизація процесів вимірювання.

Аналіз літератури. Вибір матеріалу з необхідними властивостями в лабораторних умовах зазвичай здійснюється шляхом вимірювання розподілів електропровідності і термоЕРС уздовж злитка.

В основу визначення електропровідності покладено двозондовий метод вимірювання, за якого струм пропускається через торцеві поверхні злитка, а електричний потенціал на його поверхні вимірюється двома рухомими зондами з відомою відстанню між ними [2, 3]. Електропровідність обчислюється за значеннями струму і різниці потенціалів між зондами з урахуванням геометричних розмірів (площі перерізу злитка і відстані між зондами). Такий метод вважається загально визнаним для дослідження стрижнів напівпровідникового матеріалу (міжнародний стандарт SEMI MF397-02 «Test Method for Resistivity of Silicon Bars Using a Two-Point Probe»).

В основу визначення коефіцієнта термоЕРС покладено метод гарячого зонда [4]. Один з двох зондів нагрівається відносно іншого і при контакті зі злитком між ними виникає термоЕРС. Коефіцієнт термоЕРС обчислюється як відношення утвореної термоЕРС до різниці температур між зондами.

Для підвищення продуктивності експрес-вимірювань електропровідність і термоЕРС вимірюють в одному циклі, за одного опускання зондів, один з яких нагрітий (рис. 1). Для виключення термоЕРС при обчисленні електропровідності вимірювання здійснюються за двома напрямками струму або на знакозмінному прямокутному меандрі струму.

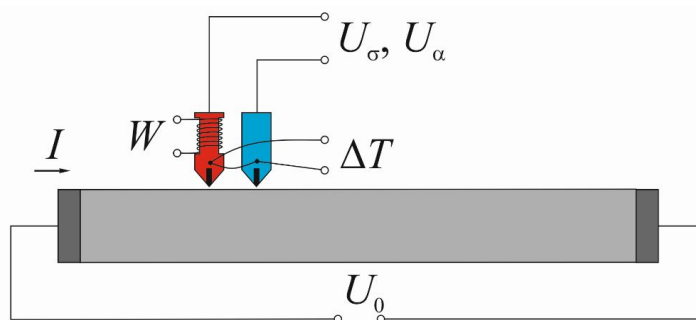


Рис. 1. Схема вимірювання електропровідності і термоЕРС злитків.

В Інституті термоелектрики НАН і МОН України було здійснено серію досліджень, спрямованих на створення високоточних методів та обладнання для вимірювання властивостей злитків термоелектричних матеріалів. Результатами цих досліджень стали нові фізичні методи зменшення похибок вимірювань і обладнання на їх основі для точного вимірювання електропровідності і термоЕРС матеріалів у вигляді злитків [5 – 9]. Досягнуті похибки розробленого обладнання такі: електропровідності – до 1 %, термоЕРС – до 1.5 %. Створено також методику визначення теплопровідності злитків у динамічних умовах.

Для злитка довжиною 300 мм з кроком в 10 мм при чотирьох кутах повороту злитка необхідно провести понад сто вимірювань. Під час позиціонування зондів і проведення

вимірювань вручну для повного циклу вимірювань може знадобитися до чотирьох годин. Крім того, в цьому випадку можливі суб'єктивні помилки в роботі оператора при позиціонуванні зондів, зчитуванні показів приладів, розрахунках, побудові графіків тощо.

Тому особливо важливим завданням при розробці такого обладнання є автоматизація процесу вимірів, що дає можливість не тільки уникнути виникнення суб'єктивних похибок, але і значно підвищити швидкість вимірювань. Автоматизація також сприяє ідентичності умов вимірювань, а значить і підвищенню точності вимірювань.

Мета роботи – створення системи керування вимірюваннями і переміщенням зондів для автоматизації процесів визначення термоелектричних властивостей матеріалів, обробки і відображення їх результатів.

Опис конструкції вимірювального обладнання

Вихідними при розробці автоматизованого вимірювального обладнання були такі основні технічні вимоги: довжина злитків – 50 – 400 мм, їх діаметр – 6 – 30 мм; мінімальна дискретність відліку координати вздовж осі злітка – 0.1 мм; мінімальна дискретність відліку кута повороту злітка – 1 градус. Установка повинна працювати під управлінням комп'ютера, яким встановлюється завдання на вимірювання, необхідні обчислення та їх усереднення, будуються графіки, заповнюються таблиці, зберігаються і друкуються результати.

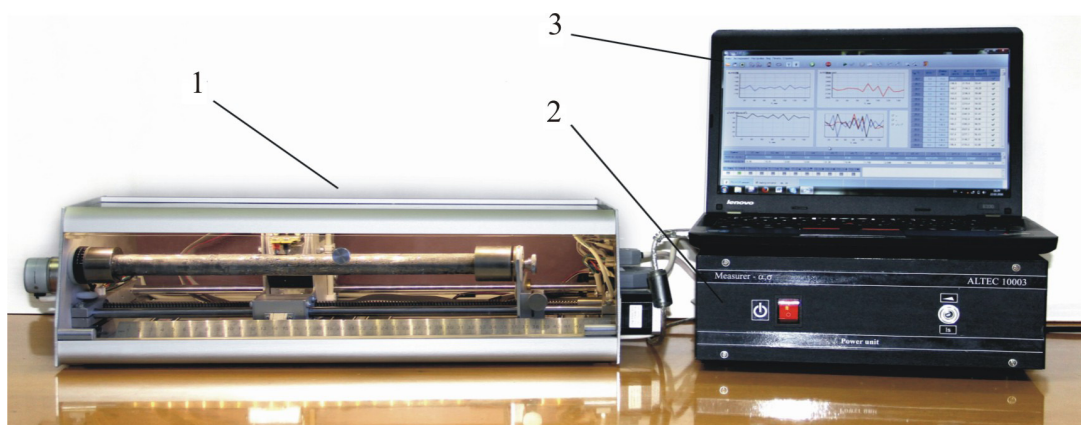


Рис. 2. Установка для вимірювання термоелектричних параметрів стрижнів напівпровідникового матеріалу «АЛТЕК-10003».

1 – вимірювальний блок (держак стрижнів); 2 – блок керування;
3 – комп'ютер з програмним забезпеченням.

Конструкцією передбачені сталість відстані між зондами, температури гарячого зонда, зусилля притиску зондів до зразка, однаковий час при вимірюванні термоЕРС і час подачі струму при вимірюванні електропровідності. Для забезпечення однакових температурних умов вимірювань у блоці установки передбачена система термостабілізації з можливістю підігріву на 5 – 10 градусів вище кімнатної температури.

Весь процес вимірювання управляється за допомогою комп'ютерних програм високого рівня, які працюють разом з мікропрограмами низького рівня АЦП блока управління.

Зовнішній вигляд такої установки – «АЛТЕК-10003» – наведено на рис. 2. Вона складається з трьох блоків: вимірювального – держака стрижнів, блока керування та комп'ютера. На рис. 3 наведено її блок-схема.

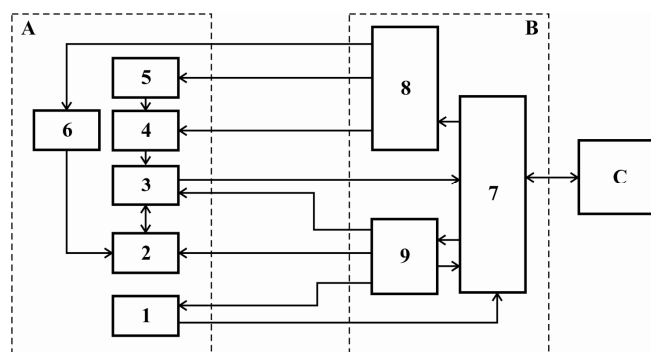


Рис. 3. Блок-схема установки «АЛТЕК-10003» для вимірювання термоелектричних властивостей стрижнів матеріалу.

A – вимірювальний блок, *B* – блок керування, *C* – комп’ютер;

1 – термостат корпусу, 2 – стрижень термоелектричного матеріалу, 3 – вимірювальні зонди, 4 – механізм переміщення зондів, 5 – механізм переміщення каретки, 6 – механізм повороту стрижня, 7 – мікроконтролер з вбудованим АЦП, 8 – джерела живлення та драйвери крокових двигунів, 9 – вимірювальний вузол.

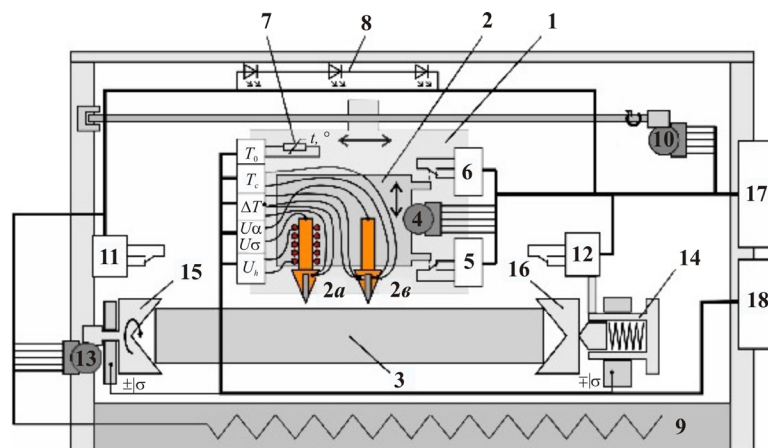


Рис. 4. Функціональна схема вимірювального блока установки «АЛТЕК-10003».

1 – рухома каретка, 2 – вимірювальний вузол, 2а – «гарячий» зонд, 2в – «холодний» зонд, 3 – стрижень термоелектричного матеріалу, 4 – кроковий двигун механізму підйому-опускання зондів, 5, 6 – кінцеві перемикачі верхнього та нижнього положення зондів, 7 – датчик температури навколишнього середовища, 8 – світлодіодна підсвітка вимірювального блока, 9 – нагрівник корпусу вимірювального блока, 10 – кроковий двигун механізму поздовжнього переміщення каретки, 11, 12 – кінцеві перемикачі механізму поздовжнього переміщення каретки, 13 – кроковий двигун механізму обертання стрижня, 14 – механізм притиску та фіксації стрижня, 15, 16 – кінцеві струмопідводи, 17, 18 – роз’єми підключення вимірювального блока до блока керування вимірюваннями.

Основним блоком в установці є вимірювальний блок, яким здійснюється весь процес первинного вимірювання і який складається з держака стрижня і вимірювальних зондів. На рис. 4 наведено його функціональну схему.

Вимірювальний блок розміщений в алюмінієвому корпусі з передньою прозорою відкидною кришкою, який, крім конструктивного несучого елемента виконує функцію і термостата. У його дні розміщені нагрівальні елементи, що дають можливість підтримувати температуру повітря всередині корпусу на рівні 300 К. При вимірюванні стрижень термоелектричного матеріалу встановлюється в держак, який складається з двох співвісних

струмопідводів, один з яких (правий) є рухомих вздовж осі стрижня і має елементи його притиску і фіксації.

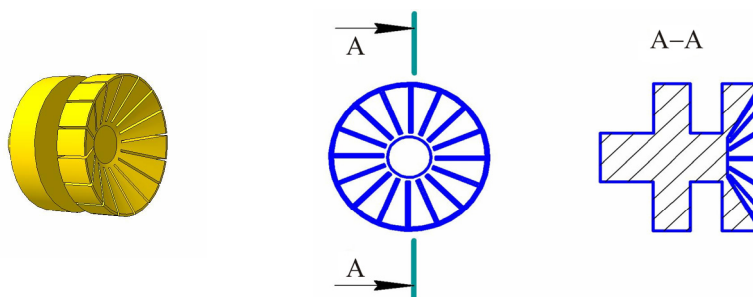


Рис. 5. Вигляд та конструкція струмопідводів.

Для самоцентрування стрижнів струмопідводи зроблені у вигляді розрізаних конусів (рис. 5). Вони мають радіальні пази, які розділяють притискну поверхню на 16 секторних частин, якими забезпечується контакт з реальною формою торців стрижня. Цим забезпечується як мінімум 16 точок електричного контакту для кожного торця стрижня з струмопідводами. На бічних стінках корпусу змонтовані механізми поздовжнього переміщення вимірювальних зондів і повороту самого стрижня навколо своєї осі.

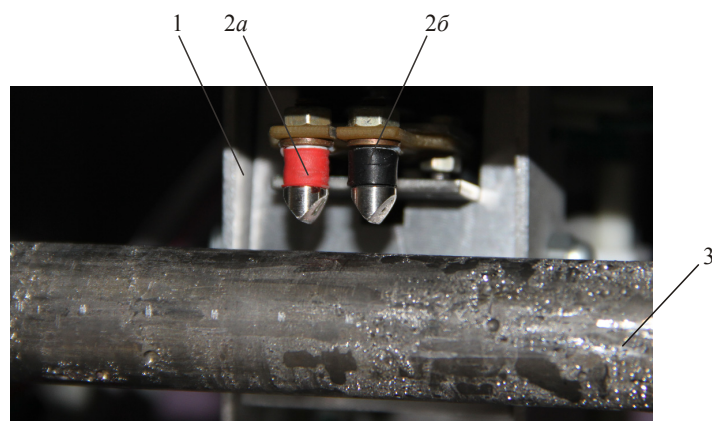


Рис. 6. Вимірювальний вузол.

1 – рухома каретка, 2а – «гарячий» зонд, 2б – «холодний» зонд, 3 – злиток.

Вимірювальний вузол встановлено на рухомій каретці (рис. 6). На ній розташована вимірювальна головка з двома зондами. Вона призначена для здійснення електричних і температурних вимірювань і містить два жорстко закріплених ножеподібних зонди: один з підігрівом – «гарячий зонд» (2а), другий без підігріву – «холодний зонд» (2б). Для зменшення похибок у визначенні температури зони контакту зонду з поверхнею стрижня зонди виготовлені з матеріалу з високою теплопровідністю (міді). Для збільшення зносостійкості в зонди вмонтовано ножеподібні вольфрамові пластини.

У каретці розташовано також механізм підйому-опускання зондів, який складається з крокового двигуна з редуктором та кінцеві вимикачі верхнього та нижнього положення зондів.

Автоматизація процесу вимірювань здійснюється блоком керування, який управляє переміщенням зондів у вимірювальному блоці, забезпечує стабілізованими напругами і струмами елементи електричної схеми вимірювального блоку. Вимірювання напруг та термоЕРС здійснюється за допомогою 8-канального 24-розрядного АЦП, що передає виміряні

напруги по USB інтерфейсу до комп'ютера. Блок керування містить вимірювальний вузол, мікроконтролерний вузол та силовий вузол. Елементи силового вузла для управління кроковими двигунами складаються з трьох однакових драйверів крокових двигунів, якими переміщуються вимірювальні зонди в горизонтальному і вертикальному напрямках та повертається стрижень.

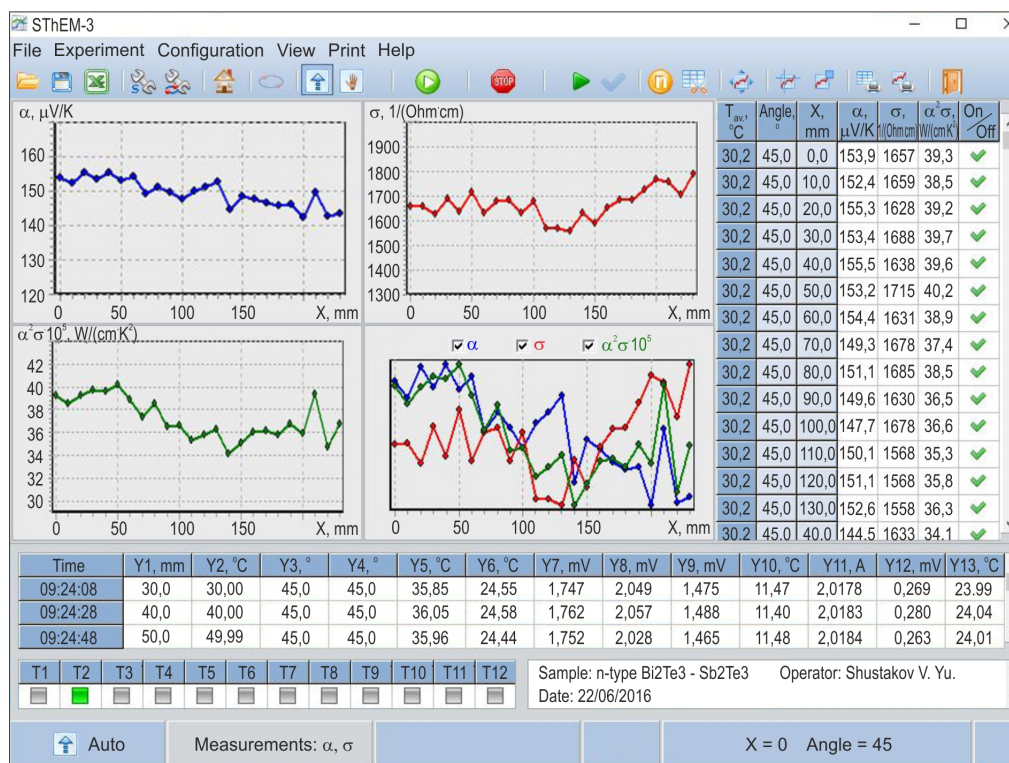


Рис. 7. Головне вікно програми керування вимірюваннями «SThEM-3».

Установка управляється комп'ютером з програмним забезпеченням «SThEM-3» (Semiconductor ThermoElectric Material), розробленим сумісно з НПП «Терекс» (м. Київ, Україна). Програма дає можливість виконувати вимірювання в режимі реального часу, обробляти результат вимірювання, виводити дані на екран у вигляді графіків і таблиць, зберігати їх на комп'ютері, експортувати в MS Excel, роздруковувати.

Програма керування вимірюваннями «SThEM-3» має стандартну структуру, прийнятну в операційній системі Windows. Вигляд головного вікна програми наведено на рис. 7. Воно містить засоби управління процесом вимірювання (кнопки виклику вікон налаштування експерименту, індикатори включення/виключення струму через зразок, живлення нагрівника гарячого зонда, тощо), область побудови графіків результатів вимірювань, таблиці з вимірними величинами та розраховані значення властивостей стрижня. Також відображається інформація про стрижень, що внесена самим оператором.

Програмне забезпечення дає можливість працювати в «ручному» і «автоматичному» режимах.

У «ручному» режимі користувач має можливість встановити зонди в будь-якому місці досліджуваного стрижня, провести вимірювання і обчислення з прив'язкою до координат стрижня. В «ручному» режимі також може бути здійснено визначення теплопровідності злитка. Для цього на одному з торців стрижня потрібно розмістити спеціальний пристрій, конструкцію якого наведено на рис. 8.

Пристрій складається з еталонного нагрівача зразка 3, стрижня з термоелектричного матеріалу 6 з встановленими термопарами-зондами 4. Для зменшення теплових втрат та забезпечення відтворення однакових теплових умов під час вимірювань пристрій забезпечено екранним нагрівачем 1, диференціальною «нуль-термопарою» 2 і екранною трубкою 5.

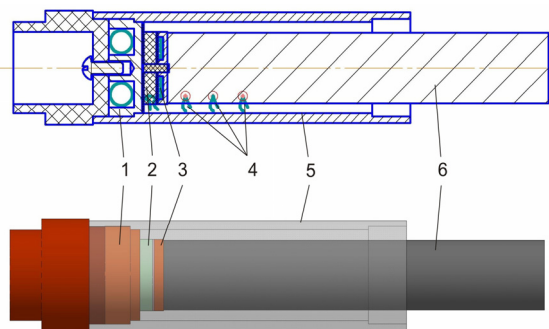


Рис. 8. Конструкція пристрою для вимірювання теплопровідності.

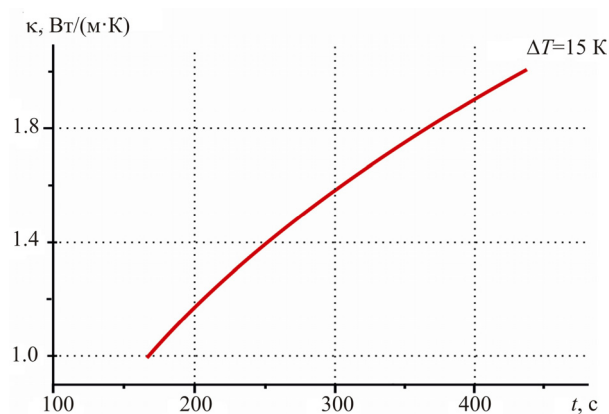


Рис. 9. Градувальна залежність для визначення теплопровідності.

Градувальну залежність, отриману комп'ютерним моделюванням для заданої конструкції пристрою, наведено на рис. 9.

У «Автоматичному» режимі користувач формує завдання у вигляді таблиці координат, за якими установка автоматично виконує за заданою циклограмою серію вимірів, обчислює електрофізичні параметри матеріалу з прив'язкою їх до координат стрижня.

Результат обчислень заноситься в таблицю і одночасно будується графік залежності величини від координати виміру. В таблиці можна усереднити результати по всіх кутах повороту, зберегти і роздрукувати таблиці і графіки.

Необхідно відзначити, що апаратна і програмна частини установки розроблена з можливістю робити вимірювання як на стрижнях, так і на плоских зразках будь-яких розмірів, наприклад, дисках. Для цього потрібно тільки змінити держак зразка і встановити відповідні коефіцієнти в програмному забезпеченні.

Експериментальні дослідження автоматизованого обладнання «АЛТЕК-10003» для вимірювання властивостей злитків термоелектричних матеріалів

Спільно з Державним підприємством «Буковинастандартметрологія» було розроблено і затверджено програму і методику метрологічної атестації установки «АЛТЕК-10003». Встановлено, що відносна похибка під час вимірювання електропровідності – не більша 0.5 %,

при вимірюванні термоЕРС – не більша 1 %, що відповідає очікуваним значенням, отриманим за допомогою комп'ютерного моделювання.

Також було визначено швидкодію та продуктивність обладнання. Встановлено, що одне вимірювання займає 20 секунд. Відповідно для вимірювання стрижня довжиною 30 см при чотирьох кутах його оберту і при кроці 10 мм необхідно 40 хвилин.

Таблиця

Порівняння значень теплопровідності, отриманих за допомогою установки «АЛТЕК-10003», зі значеннями теплопровідності, отриманими абсолютним методом на установці «АЛТЕК-10001»

| № стрижня з/п | Значення теплопровідності, визначене на установці «АЛТЕК-10003», к, Вт/(м*К) | Значення теплопровідності, визначене на установці «АЛТЕК-10001», к ₀ , Вт/(м*К) | Відхилення, % |
|---|---|---|------------------|
| <i>Bi₂Te₃ – Sb₂Te₃ n-типу</i> | | | |
| 1 | 1.8 | 1.93 | 7.0 |
| 2 | 1.4 | 1.54 | 9.1 |
| 3 | 1.6 | 1.74 | 8.0 |
| <i>Bi₂Te₃ – Sb₂Te₃ p-типу</i> | | | |
| 4 | 1.6 | 1.77 | 9.6 |
| 5 | 1.7 | 1.85 | 8.0 |
| 6 | 1.8 | 1.93 | 6.7 |

Здійснено також дослідження похибки при визначенні теплопровідності. Для цього значення теплопровідності, отримані при вимірюванні на стрижнях, порівнювались зі значеннями теплопровідності зразків, вирізаних з цих же стрижнів та виміряних на установці «АЛТЕК-10001» абсолютним методом. Результати порівняння наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, похибка у визначенні теплопровідності на установці «АЛТЕК-10003» відрізняється від вимірювань абсолютним методом на 7 – 10 %.

Системні автоматизовані вимірювання стрижнів корисні для оптимізації складу та режимів отримання термоелектричних матеріалів.

Застосування такого обладнання особливо привабливе у промислових умовах. Однією установкою «АЛТЕК-10003» може бути здійснено за рік контроль якості майже 1500 кг термоелектричного матеріалу. Упровадження такого контролю дає можливість не тільки видалити з технології виготовлення модулів браковані стрижні. Визначення $\alpha^2\sigma$ вздовж стрижнів робить можливим надійно і з мінімальними втратами знайти місця неякісного матеріалу на їх кінцях, які підлягають видаленню. Топографія $\alpha^2\sigma$ дає можливість також визначити місця на стрижнях, де якість матеріалу висока, середня або понижена. З урахуванням однакових значень електропровідності така розбраковка робить можливим вибирати термоелектричний матеріал для модулів підвищеної, середньої та пониженої якості. При цьому модулі підвищеної якості мають мати кращі показники, ніж виготовлені без використання автоматизованого контролю якості.

Використання автоматизованого комплексу «АЛТЕК-10003» у виробничих умовах підтвердило його ефективність. Дослідження здійснювались в компанії «Алтек-М». Типові залежності властивостей стрижнів наведено на рис. 10. На рисунку спостерігається частина злитка 1 з максимальним значенням $\alpha^2\sigma$, частина 2 зі значеннями $\alpha^2\sigma$, що відповідають усередненим значенням якості модулів без розбраковки, частини 3, у яких значення $\alpha^2\sigma$ дещо нижчі, ніж усереднені, та частини 4 з незадовільними значеннями $\alpha^2\sigma$. Останні вилучаються з

технологічного процесу виготовлення модулів. Такий розподіл матеріалу за його якістю забезпечує виготовлення модулів зі значеннями ΔT_{\max} 75 – 73 К з частини злитку 1, 72 – 70 К з частини 2 і 69 – 68 К з частини 3.

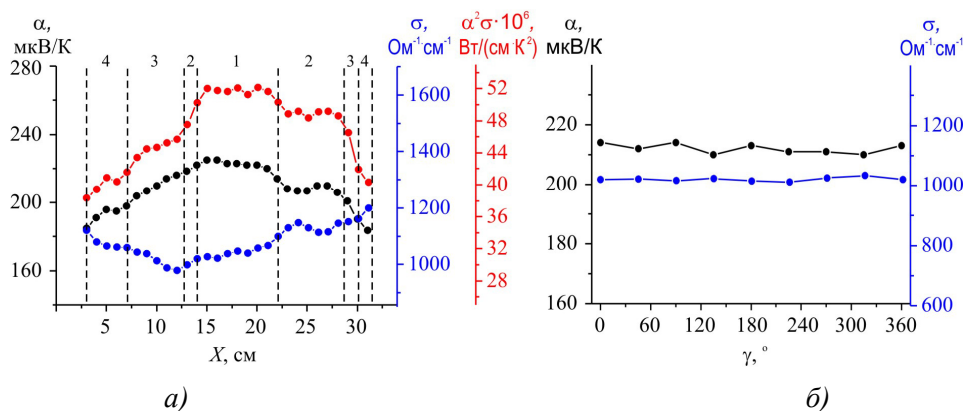


Рис. 10. Розподіли коефіцієнта термоЕРС та електропровідності у стрижні термоелектричного матеріалу n -типу на основі твердого розчину $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$, отриманого методом вертикальної зонної плавки (а – по довжині X стрижня, б – по куту повороту γ стрижня).

Таким чином, використання автоматизованих вимірювань у промисловому виготовленні модулів дає можливість отримувати модулі підвищеної якості і відбраковувати неякісний матеріал.

Висновки

1. Державною метрологічною атестацією автоматизованого вимірювального комплексу «АЛТЕК-10003» встановлено, що відносна похибка при вимірюванні електропровідності не більша 0.5 % і не більшою 1 % при вимірюванні термоЕРС, що відповідає значенням, отриманим за допомогою комп'ютерного моделювання.
2. Шляхом порівняння результатів вимірювань теплопровідності злитків термоелектричних матеріалів на установці «АЛТЕК-10003» зі значеннями теплопровідності зразків, вирізаних з цих злитків та виміряних на установці «АЛТЕК-10001», абсолютним методом було встановлено, що похибка визначення теплопровідності розробленим пристроєм знаходиться в межах 7 – 10 %.
3. Підтверджено ефективність використання вимірювального комплексу «АЛТЕК-10003» у виробничих умовах. Встановлено, що впровадження автоматизованого контролю якості матеріалу робить можливим не тільки вилучати з технологічного процесу виготовлення модулів неякісний матеріал, а й отримувати модулі підвищеної якості – з ΔT_{\max} орієнтовно на 2 – 4 К вище.

Література

1. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А.М. Смирнов // М.: Наука, 1972. – 320 с.
2. Епремян А.О. Добротность современных полупроводниковых термоэлектрических материалов / А.О. Епремян, В.М. Арутюнян, А.И. Ваганян // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №5. – С. 7 – 18.

3. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. / Л.И. Анатычук // К.: Наук. думка, 1978. – 768 с.
4. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. / А.С. Охотин, А.С. Пушкарский, Р.П. Боровикова [и. др.] // М. : Наука, 1974. – 167с.
5. Зондовый метод определения ТЭДС эпитаксиальных пленок / Л.И.Анатычук, О.Я. Лусте, В.Т. Димитрашук, А.П. Мельник [и. др.] // ПТЭ. – 1971. – №2. – С. 239 – 240.
6. Разиньков В.В. Обладнання для визначення параметрів злитків термоелектричних матеріалів / В.В. Разиньков // Термоелектрика. – 2002. – №4. – С. 70 – 79.
7. Анатичук Л.І. Високоточний метод вимірювання електропровідності стрижнів термоелектричних матеріалів / Л.І. Анатичук, В.В. Лисько // Термоелектрика. – 2008. – №1. – С. 70 – 75.
8. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials // Journal of Electronic Materials. – 2012. – Vol. 41. – № 6. – P. 1680 – 1685.
9. Автоматизоване обладнання для вимірювання властивостей стрижнів термоелектричних матеріалів / Л.І. Анатичук, М.В. Гаврилюк, В.В. Лисько [і. інш.] // Термоелектрика. – 2015. – №4. – С. 83 – 88.
10. Патент України №38470. МПК G01R 27/00 / Анатичук Л.І., Лисько В.В. Заявка від 11.08.2008. Опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.

Надійшла до редакції 10.02.2016.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

Стаття повинна відповідати профілю журналу. Зміст статті має бути чітким, стислим, без повторень.

В редакцію направляють електронну версію статі.

Текст статті повинен бути набраним у текстовому редакторі не нижче MS Word 6.0/7.0.

Параметри сторінки: «зеркальні поля» верхнє поле – 2,5 см, нижнє поле – 2,0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього – 1,27 см, нижнього – 1,27 см.

Графічні матеріали, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .orj чи .cdr, допускається у форматах .jpg чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

Статті подаються англійською мовою для англійськомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів статті подаються англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 12. За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

Для прищвидшення публікації статті просимо просимо дотримуватись наступних правил:

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
 - ініціали та прізвище авторів – з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по центру;
 - назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна) - з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по центру; назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заглавними буквами полу жирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретним і в теж час по можливості коротким;
 - анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині російською та англійською мовами;
 - ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;
 - основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;
- формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;
- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, а використовувані символи повинні бути пояснені;
 - рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і

контрастними, осі графіків - паралельними краям листа, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні;

таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

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

- Журнальна стаття: автор (спочатку прізвище, потім ініціали), назва статті, назва журналу, номер випуску, рік, номер сторінки (першої та останньої сторінок статті).

- Книга: автор (спочатку прізвище, потім ініціали), назва книги, номер тому або видання, місто, де видавалася, видавництво, рік, число сторінок.

- Патент: Bengen M.E., German Patent Appl. OZ 123, 438, 1940; German Patent 869,070, 1953, Tech. Oil Mission Reel, 143,135, 1946.

- Якщо в джерелі більше одного автора, то вказують всі прізвища та ініціали. Не використовуйте скорочення "і інші".

До статті додається:

- лист з клопотанням про публікацію (від організації, де виконувалась робота, або від авторів статті);

- відомості про автора (авторів): прізвище, ім'я, по батькові російською та англійською мовами; повна назва та поштова адреса установи, де працює автор, науковий ступінь, посада, номер телефону, електронна пошта;

- кольорова або, як виняток, чорно-біла фотографія автора (авторів). При числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться;

- заява автора такого змісту:

Ми, що нижче підписалися автори, передаємо засновникам і редколегії журналу «Термоелектрика» право на опублікування статті. українською, російською та англійською мовами. Ми підтверджуємо, що дана публікація не порушує авторського права інших осіб чи організацій.

Дата Підписи