

Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Чернівці,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГРУНТОВИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ НИХ

Розглянуто особливості застосування ґрунтових термоелектричних генераторів в якості перетворювачів низькопотенційної теплової енергії в електричну. Наведено вимоги до конструктивних та теплофізичних характеристик термоелектричного перетворювача для малих перепадів температури, характерних для ґрунту. Представлено методики виготовлення термоелектричних батарей з мікромініатюрними вітками термоелементів і їх вихідні параметри.

Ключові слова: ґрунтовий термоелектричний генератор, низькопотенційне джерело тепла, термоелектрична батарея.

Рассмотрены особенности применения почвенных термоэлектрических генераторов в качестве преобразователей низкопотенциальной тепловой энергии в электрическую. Приведены требования к конструктивным и теплофизическим характеристикам термоэлектрического преобразователя для малых перепадов температуры, характерных для почвы. Представлены методики изготовления термоэлектрических батарей с микроминиатюрными ветками термоэлементов и их выходные параметры.

Ключевые слова: почвенный термоэлектрический генератор, низкопотенциальный источник тепла, термоэлектрическая батарея.

Peculiarities of ground thermoelectric generators applications as low-potential heat energy converters into electrical energy were considered. Requirements for constructional and thermalphysic characteristics of a thermoelectric converter for little temperature drops typical for the ground were stated. Methods of thermopiles with microminiature legs manufacturing and their output parameters were represented.

Keywords: ground thermoelectric generator, low-potential heat source, thermopile.

Загальна характеристика проблеми

Як відомо [1-3], одним із джерел низькопотенційної енергії є ґрунт, значна поширеність якого створює передумови для перспективного його використання в якості джерела тепла. Більшість теплових процесів, які протікають на поверхні ґрунту або в його поверхневому шарі, може становити інтерес для їх застосування при перетворенні в електроенергію за допомогою ґрунтового термоелектричного генератора (ГТЕГ).

Специфіка теплових процесів, що відбуваються у поверхневому шарі ґрунту, накладає певні умови, які необхідно врахувати при створенні і використанні ГТЕГ. Ефективність ГТЕГ залежить від багатьох природних факторів таких, як тип та структура ґрунту, його дисперсність і вологість,

хіміко-мінералогічний склад, місця розташування ГТЕГ, кліматичної зони, метеоумов та інших. У зв'язку з цим, важливими факторами при створенні ГТЕГ будуть фактори зміни теплового потоку і розподілу температури за профілем ґрунту.

Основним конструктивним елементом ГТЕГ, в якому здійснюється перетворення теплової енергії в електричну, є термоелектричний модуль (перетворювач), теплофізичні і термоелектричні параметри якого відіграють визначальну роль під час перетворення енергії.

Мета даної роботи – узагальнення факторів, що мають істотний вплив на ефективність перетворення ГТЕГ та аналіз особливостей теплофізичних характеристик і методик виготовлення термоелектричних моду-

лів з мікромініатюрними вітками термоелементів, які використовують в якості джерела тепла низькопотенційне тепло ґрунтів.

Особливості застосування ґрунтових термоелектричних генераторів (ГТЕГ)

Застосування ГТЕГ в якості перетворювачів низькопотенційної теплової енергії в електричну створює певні специфічні умови щодо можливості їх використання. Так, умовно можна виділити дві групи факторів, що істотно впливають на перетворюючу здатність ГТЕГ [4]:

- фактори, пов'язані з теплофізичними характеристиками і тепловим балансом активного шару ґрунту;
- конструктивні особливості і теплофізичні характеристики ГТЕГ.

Характер змінюваності факторів першої групи є стихійним і практично непередбачуваним. Теплофізичні характеристики ґрунту залежать від його типу, структури, складу, вологості, вмісту органічних складових, які крім того змінюються з часом. Істотний вплив на характеристики ґрунту також мають агротехнічні, меліоративні і погодні умови.

Вплив факторів другої групи врахувати і запрограмувати в реальній конструкції ГТЕГ значно простіше. Це можна зробити за рахунок оптимізації конструктивних елементів ГТЕГ, підбором матеріалів з наперед заданими теплофізичними характеристиками, вибором оптимальної конструкції термоелектричного перетворювача з вітками, матеріал яких оптимізований для відповідного теплового режиму роботи та ін.

Отже, при застосуванні ГТЕГ в реальних умовах визначальними факторами є характер зміни теплового потоку і розподілу температури вздовж профілю ґрунту. Причому величина теплового потоку і градієнту температури в ґрунті змінюються не лише за величиною, але і за напрямком, що зумовлено добовою і річною періодичністю зміни амплітуди теплового потоку в активному шарі ґрунту (рис. 1) [5].

Поширення коливань температури в ґрунті відбувається так, що період коливань темпе-

ратури є незмінним на всіх глибинах; амплітуда коливань зменшується з глибиною в геометричній прогресії і затухає на деякій глибині, характерній для кожного типу ґрунту. Згасання амплітуди добових коливань температури в залежності від виду ґрунту і кліматичних умов конкретного регіону може відбуватися на глибині від 35 до 100 см. Добовий тепловий потік може бути як прямим, так і зворотнім [6]. Це зумовлено тим, що негативний тепловий потік виникає зазвичай вночі, коли нагрітий протягом дня ґрунт починає віддавати тепло. При цьому величина негативного теплового потоку здебільшого в 2–3 рази менша, ніж позитивного.

Слід також зазначити, що розташування ГТЕГ в ґрунті вносить певні спотворення в загальну теплову картину. Це призводить до необхідності врахування співвідношення між тепловим опором ГТЕГ і тепловим опором еквівалентного об'єму ґрунту.

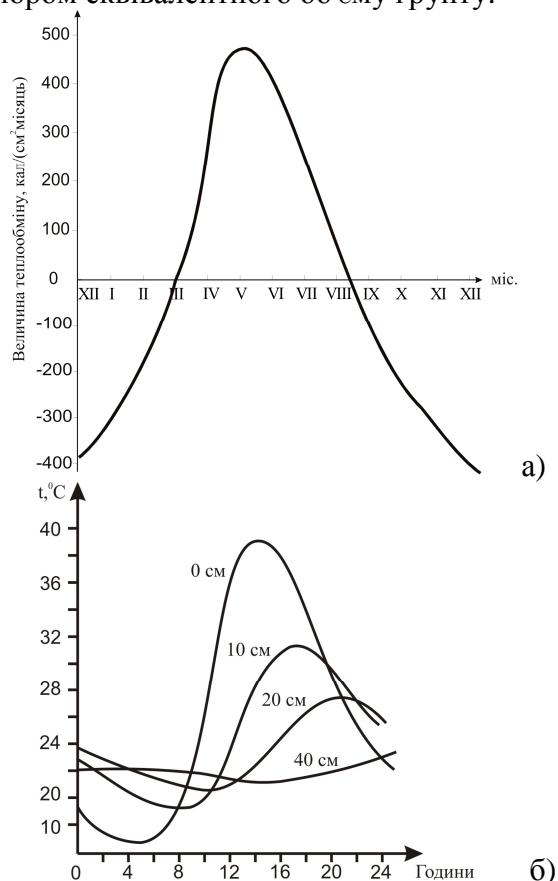


Рис. 1. Типовий характер теплообміну в ґрунті впродовж року (а) та зміна температури ґрунту на різних глибинах впродовж доби (б) для помірних широт.

Умовою оптимального вибору теплового опору ГТЕГ для конкретного типу ґрунту і фактора форми H/D є співвідношення [7]:

$$k_{\text{опт}} = \frac{4 H}{\pi D} \approx 1,3 \frac{H}{D}, \quad (1)$$

де $k_{\text{опт}}$ – відношення теплового опору еквівалентного об'єму ґрунту до теплового опору ГТЕГ; H, D – висота і діаметр ГТЕГ.

Співвідношення (1) дає можливість здійснювати оптимізацію термогенератора за його теплофізичними характеристиками і аналогічними характеристиками ґрунту для досягнення найкращих характеристик ГТЕГ.

Вимоги до термоелектричних батарей

Низькопотенціальний характер теплових процесів у ґрунті висуває особливі вимоги до основного конструктивного елемента ГТЕГ – його термоелектричної батареї. Внаслідок того, що ГТЕГ має працювати і виробляти необхідну електричну потужність при незначних перепадах температур (в межах 10–20 К), виникає необхідність використання у термоелектричній батареї великої кількості віток (від 1000 і більше) малого перерізу для забезпечення необхідного рівня напруги та електричної потужності для живлення малопотужних електронних автономних пристроїв.

Багатоелементність термобатареї є одним з визначальних факторів у конструкції ґрунтового термогенератора, що працює при малих перепадах температур і теплових потоках, які наявні у ґрунті.

Термоелектричні матеріали для модулів ГТЕГ

Як раніше зазначалося, особливістю ґрунтових термогенераторів є те, що вони використовують низькопотенційне тепло ґрунту. Діапазон робочих температур ГТЕГ знаходиться в межах 250–330 К. При цьому робочий перепад температури, який може бути використаний для роботи ГТЕГ, знаходиться в межах 10–20°C. Ці обставини накладають істотні обмеження на термоелектричні матеріали та типи термоелементів, які можуть бути використані для термопелетувачів, що застосовуються в ГТЕГ.

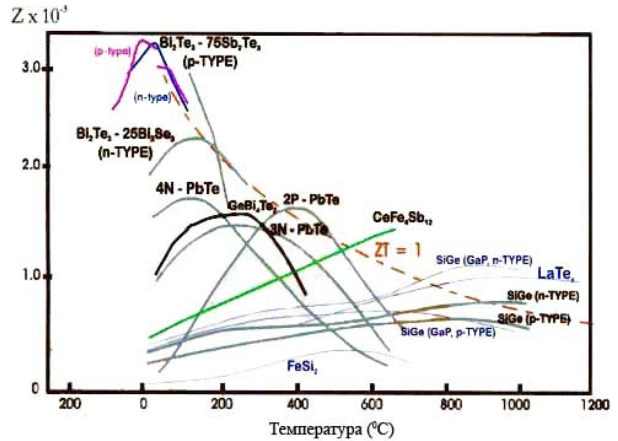


Рис. 2. Залежність термоелектричної добротності від температури для різних термоелектричних матеріалів.

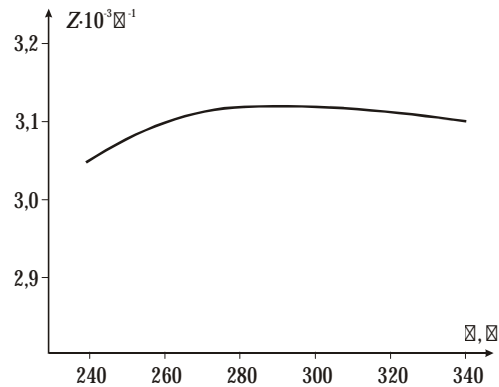


Рис. 3. Залежність термоелектричної ефективності низькотемпературного Bi_2Te_3 від температури.

На сьогодні відома велика кількість матеріалів, що володіють термоелектричними властивостями (рис. 2) [8].

Однак проведений аналіз показує, що найкраще відповідає вищеперерахованим умовам низькотемпературний (робочий інтервал температур 250–350 К) термоелектричний матеріал, виготовлений на основі твердих розчинів Bi_2Te_3 , температурна залежність ефективності якого показана на рис. 3.

З рис. 3 видно, що в розглядуваному нами температурному діапазоні термоелектричні матеріали на основі твердих розчинів телуриду вісмуту мають досить пологому залежність термоелектричної добротності Z від температури. Крім того, за однорідністю і здатністю до відтворення параметрів монокристалічні матеріали вигідно відрізняються від полікристалічних, отриманих методом

Таблиця 1. Властивості термоелектричних матеріалів, отриманих різними методами.

Метод отримання матеріалу	Тип провідності	Параметри матеріалу			
		α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$\kappa \cdot 10^3$, Вт/см·К	$Z \cdot 10^3$, К ⁻¹
Метод Чохральського	<i>n</i>	-208	1190	16,7	3,1
	<i>p</i>	+200	1160	15,2	3,0
Метод Бріджмена	<i>n</i>	-208	896	14,6	2,65
	<i>p</i>	+205	1150	16,5	2,8
Метод екструзії	<i>n</i>	-191	1010	15,8	2,3
	<i>p</i>	+208	896	14,6	2,65
Пресовані матеріали	<i>n</i>	-180	900	15,3	1,9
	<i>p</i>	+190	950	15,1	2,27

Примітка: α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, κ – теплопровідність, Z – добротність.

екструзії чи холодного пресування. Порівняльні характеристики термоелектричних матеріалів, отриманих різними методами, наведені в таблиці 1.

Із таблиці 1 видно, що при виборі термоелектричного матеріалу перевагу слід надавати монокристалічним зразкам Bi_2Te_3 , вирощених методом Чохральського. Але крім переваг, монокристалічні матеріали мають і недоліки. Чим більша досконалість монокристалу, тим менша його механічна міцність. При механічній або електроіскровій обробці вони легко розколюються за площинами спайності, у зв'язку з чим виготовлення з них гілок термоелементів невеликих розмірів стає проблематичним.

Механічно більш міцні матеріали отримують методами зонної перекристалізації, екструзії та пресування, але вони поступаються монокристалам за рівнем термоелектричної ефективності. Проте, до переваг цих методів можна віднести високу технологічну продуктивність та можливість використання більш дешевих матеріалів за рахунок зниження в допустимих межах вимог до їх чистоти.

Методики виготовлення термоелектричних батарей з мікромініатюрних віток термоелементів

При формуванні гілок термоелементів у термоелектричну батарею (модуль) застосовуються різні методи обробки напівпровідникових матеріалів, серед яких найбільш поширеними є механічна або електроіскрова обробка [4].

При виготовленні мікромініатюрних термо-

батарей застосовують електроіскрову різку злитків термоелектричного матеріалу на заготовки, які в подальшому обробляються за допомогою багатострунної механічної різки, з подальшим доведенням заготовок до точних розмірів методом шліфівки з використанням шліфпорошків з малим діаметром абразивних частинок.

Подальший процес виготовлення термобатарей передбачає виконання наступної послідовності операцій. Злитки термоелектричного матеріалу *n* і *p*-типу провідності розрізають на заготовки із заданою довжиною і висотою за допомогою електроіскрового станка. Переріз гілок термоелемента із умов технологічності вибирається у вигляді квадрата. Висота всіх заготовок приводиться до одного розміру, що дорівнює висоті вітки термоелемента, шляхом тонкої доводки за рахунок дошліфівки. Аналогічним чином вирівнюється товщина заготовок. Отримані в такий спосіб прямокутні заготовки *n* і *p*-типу за допомогою високотемпературного клею склеюються через електроізоляційні прокладки із малим коефіцієнтом теплопровідності в монолітний блок, у якому заготовки *n* і *p*-типу розміщуються почергово. В подальшому отриманий блок розрізається в напрямку, поперечному до прямокутних заготовок, і одержуються заготовки елементарних термобатарей. Після дошліфівки бокових поверхонь таких заготовок до заданого розміру (другий розмір перерізу вітки термоелемента), вони склеюються описаним способом у термобатарейку. Вітки термоелементів у блоці комутуються між собою

послідовно або послідовно-паралельно в термобатарей. Комутація гілок термоелементів в ТЕБ може здійснюватися одним із відомих способів групової комутації: напленням електропровідного шару через маску, методами гальванізації, звичайним спаюванням тощо.

На рис. 4 наведено схему, яка демонструє спосіб виготовлення термоелектричної мікробатарей [9]. Такий спосіб полягає в наступному. Спочатку виготовляють прямокутні пластини n - і p -типу провідності з нанесенням на торцеві поверхні антидифузійних шарів 1-4 (рис. 4а).

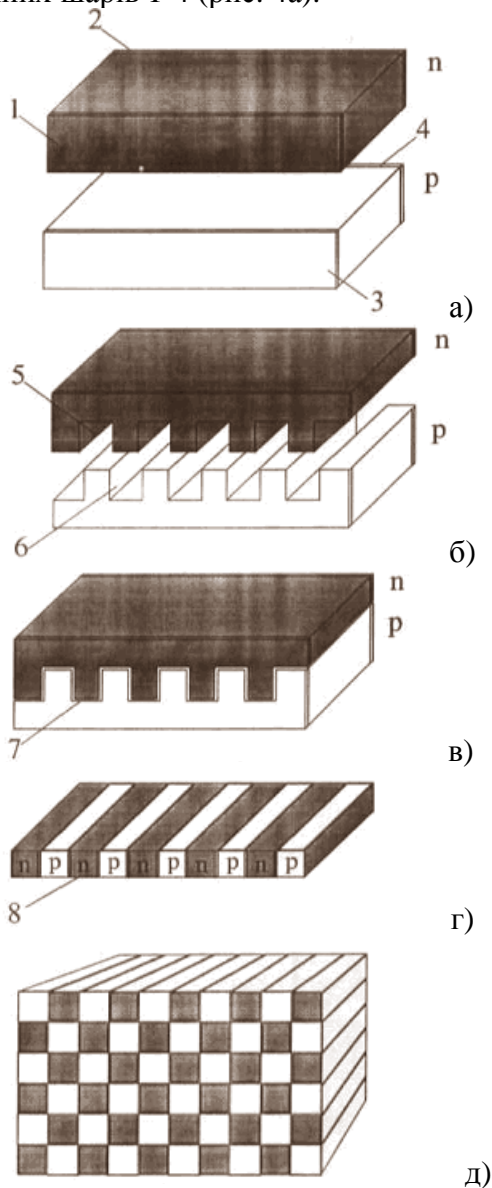


Рис. 4. Спосіб виготовлення мікробатарей.

На спеціально розробленому обладнанні (наприклад багатострунному розрізувальному верстаті) у пластинках роблять прорізи необхідних розмірів 5-6 (рис. 4 б). Внутрішні поверхні пластин покривають високотемпературними компаундами з робочою температурою 300–400°C, після чого пластини з'єднують так, щоб між ними утворився зазор 10–30 мкм, заповнений компаундом 7 (рис. 4в). Після полімеризації компаунду зовнішні частини пластин видаляють до утворення пластини 8, яка складається з гілок n - і p -типу провідності, з'єднаних між собою (рис. 4г). Потім пластини з гілок n - і p -типу провідності розташовують одна над одною та з'єднують компаундом для формування термоелектричної мікробатарей (рис.4д). Комутацію гілок здійснюють металізованими антидифузійними шарами. Теплопереходи на гарячій і холодній поверхнях батарей створюють високотемпературним компаундом з теплопровідними наповнювачами – алмазними або корундовими порошками.

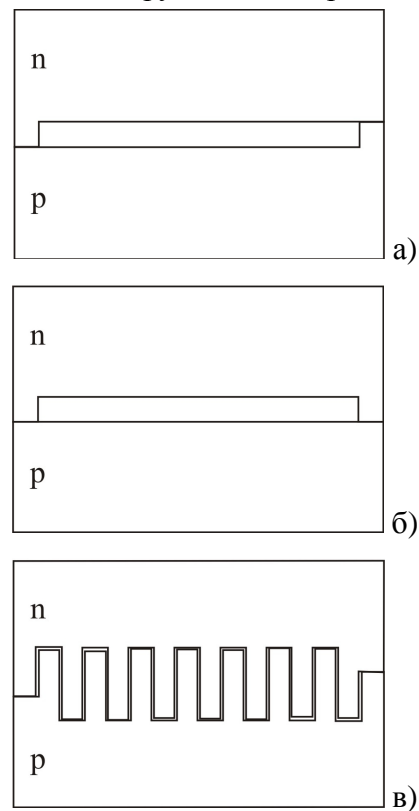


Рис. 5. Спосіб виготовлення термоелектричної мікробатарей

Таблиця 2. Параметри багатоелементних термоелектричних мікробатарей.

Тип батареї	H , мм	h_0 , мм	S , мм ²	s_0 , мм ²	n , віток	$T_{x\ min}$, °C	$T_{x\ max}$, °C	$T_{z\ max}$, °C	$T_x = 2^\circ\text{C}$		$T_z = 125^\circ\text{C}$	
									U , В	W , мВт	Q , Вт	η , %
Altec-1101	1.4	1	25	0.01	1890	-30	80	125	20.1	171	6.10	2.8
Altec-1110	2.8	2	25	0.25	94	-50	120	230	1.0	107	3.21	3.3
Altec-1120	10.8	10	25	0.25	94	-50	120	230	1.0	21	0.64	3.3
Altec-1130	1.8	1	100	0.25	376	-50	120	230	4.0	853	25.69	3.3
Altec-1140	5.8	5	100	0.25	376	-50	120	230	4.0	171	5.14	3.3
Altec-1150	20.8	20	100	0.25	376	-50	120	230	4.0	43	1.28	3.3
Altec-1160	2.8	2	225	0.25	848	-50	120	230	9.0	962	28.92	3.3
Altec-1170	10.8	10	225	0.25	848	-50	120	230	9.0	192	5.78	3.3
Altec-1180	1.8	1	400	0.25	1508	-50	120	230	16.1	3421	102.88	3.3
Altec-1190	5.8	5	400	0.25	1508	-50	120	230	16.1	684	20.71	3.3
Altec-1200	20.8	20	400	0.25	1508	-50	120	230	16.1	171	5.72	3.0

Примітка: H – висота термобатареї; h_0 – висота вітки; S – переріз термобатареї; s_0 – переріз вітки; n – кількість віток; $T_{x\ min}$, $T_{x\ max}$ – мінімально і максимально допустима робоча температура холодної сторони термобатареї, відповідно; $T_{z\ max}$ – максимально допустима робоча температура гарячої сторони термобатареї; U – напруга на узгодженому навантаженні; W – електрична потужність термобатареї; Q – теплова потужність, що споживається термобатареєю; η – коефіцієнт корисної дії.

Деякий інший спосіб виготовлення термоелектричної батареї, запропонований нами, наведено в [10]. У виготовлених прямокутних пластинах n - і p -типу провідності з нанесеними на торцеві поверхні антидифузійних шарів роблять прорізи необхідних розмірів з формуванням на краях кожної з пластин виступів, товщина яких забезпечує необхідний зазор між ними під час їх склеювання між собою (рис. 5а), або на одній з них (рис. 5б). Внутрішні поверхні пластин покривають високотемпературними компаундами, після чого пластини з'єднують так, щоб виступи на краях пластин стикувалися між собою, забезпечивши при цьому заданий зазор між пластинами і майбутніми вітками термоелементів (рис.5в). Після полімеризації компаунду зовнішні і бокові частини пластин з виступами видаляють до утворення пластини, яка складається з віток n - і p -типу провідності, з'єднаних між собою. Потім пластини з віток n - і p -типу провідності розташовують одна над одною та з'єднують компаундом для формування термоелектричної мікробатареї. Комутацію віток здійснюють металізованими антидифузійними шарами.

Параметри мікромодулів для ГТЕГ

Принцип роботи багатоелементних термоелектричних батарей заснований на застосуванні термоелектричних ефектів, що виникають в напівпровідниках. Велике число термопар в термобатареях (від сотень до декількох тисяч) дозволяє отримати необхідні електричні напруги при відносно невеликих перепадах температур, що є вирішальним фактором у випадку використання їх у ґрунтах, які являють собою низькопотенційні джерела тепла.

В Інституті термоелектрики (ІТЕ) протягом останніх років розроблено різноманітні конструкції багатоелементних термоелектричних мікробатарей, параметри яких наведено в таблиці 2.

Висока надійність розроблених в ІТЕ термобатарей дозволяє створювати ґрунтові термоелектричні генератори на їх основі з ресурсом роботи не менше 30 років.

Висновки

1. При створенні термоелектричних модулів для ґрунтових генераторів найефективніше використовувати низькотемпературні термоелектричні матеріали на основі розплавів Bi_2Te_3 .

2. Широкий асортимент розроблених в Інституті термоелектрики мікротермобатарей дозволяє створювати різноманітні конструкції ґрунтових термоелектричних генераторів для живлення малопотужних пристроїв тривалої дії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Нертин С.В., Чудновский А.Ф.* Физика почвы . – М.: Наука, 1967. – 237 с.
2. *Чудновский А.Ф.* Физика теплообмена в почве. – Л.-М.: Госиздат. Техничко-теоретической литературы, 1948. – 286 с.
3. *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
4. *Микитюк П.Д.* Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дис. канд. ... фіз.-мат. наук. - Чернівці, 2004.
5. *Анатичук Л.І., Микитюк П.Д.* Термогенератори, що використовують теплові потоки в ґрунтах // Термоелектрика. – 2003. – № 3. – С. 86-95.
6. *Микитюк П.Д., Петренко Н.С.* Термоелектричне джерело живлення, що використовує тепло ґрунту // Термоелектрика. – 2003. – № 2. – С. 73-80.
7. *Микитюк П.Д.* Термоелектричне джерело живлення для систем охоронної сигналізації // Термоелектрика. – 2012. – № 4. – С. 99-104.
8. Симкин А.В., Бирюков А.В., Репников Н.И., Иванов О.Н. Термоэлектрическая эффективность низкотемпературных генераторных материалов и возможности её повышения // Журнал нано- та електронної фізики. – 2013. – 5 (4). – С. 04070-1– 6.
9. Пат. 93217 Україна, МПК H01L 35/00. Спосіб виготовлення термоелектричної мікробатареї / Анатчук Л.І., Константинович І.А.; Інститут термоелектрики. – № u 2014 03210; заявл. 31.03.14; опубл. 25.09.14, Бюл. № 18.
10. Заявка на корисну модель № u 2014 08777 від 04.08.14. Спосіб виготовлення термоелектричної батареї // Микитюк П.Д., Дудаль В.О. – 2014.