Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Ефективність застосування термоелектричних модулів**

Виконав: студент **6** курсу, групи **ЕМм-61**

напряму підготовки (спеціальності)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

	(підпис)	**Гоцанюк Н.О.** (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	**Куземко Н.А.** (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	**Вакуленко О.О.** (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	**Тарасенко М.Г.** (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	**Козак К.М.** (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*
(повна назва факультету)

Кафедра *електричної інженерії*
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *Тарасенко М.Г.*

«_____» _____ 2020 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
(шифр і назва)

студенту *Гоцанюку Назару Олександровичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Ефективність застосування термоелектричних модулів*

Керівник роботи *Куземко Наталія Анатоліївна, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від *01 вересня 2020 року № 4/7–619*

2. Термін подання студентом роботи *16 грудня 2020 р.*

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н., доц. Гурик О.Я.*		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	*ст. викл. Клепчик В.М.*		

7. Дата видачі завдання *01 вересня 2020 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд за напрямком дипломної роботи	01.09.20 – 01.10.20	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки	01.10.20 – 20.11.20	
	дипломної роботи		
3	Підготовка розділу *«Охорона праці та безпека в надзв. ситуаціях»*	23.11.20 – 29.11.20	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	17.11.20 – 29.11.20	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	30.11.20 – 06.12.20	
6	Отримання відгуку та рецензії на дипломну роботу,		
	підготовка доповіді на захист	06.12.20 – 15.12.20	

Студент _____ *Гоцанюк Н.О.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Куземко Н.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг кваліфікаційної роботи становить 75 сторінок. В роботі міститься 33 рисунки, 29 формул і 9 таблиць. Об'єктом дослідження є термоелектричні джерела електричної енергії, що використовують тепло згоряння органічних палив.

Термоелектрична енергетика бере початок у роботах Г.Ома, виконаних ще у 1826 р. У його дослідах по визначенню закономірностей протікання струму у провідниках спочатку використовувались гальванічні елементи Вольта. Однак поляризація у цих елементах, яка супроводжувалась зростанням їх внутрішнього опору, було причиною низької точності вимірювань [2]. І. Поггендорф порадив Ому використати у своїх дослідах термоелектричне джерело струму. Ом створив термоелектричний генератор, у якому термоелектрична батарея була виготовлена із стрижнів Ві і припаяних до них мідних провідників. Таким чином, вже перші використання термогенераторів сприяли відкриттю фундаментальних законів фізики.

Виходячи з цього, актуальними є дослідження фізики перетворення тепла в електричну енергію, а також створення екологічно безпечних приладів термоелектричного перетворення енергії для їх практичного застосування у різноманітних пристроях.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення рівня ефективності термоелектричних модулів та можливість ефективного забезпечення живленням автономних установок малої потужності.

Об'єктом дослідження є термоелектричні модулі які використовують тепло згоряння органічних палив.

Перелік ключових слів:

ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ТЕРМОЕЛЕКТРИКА, ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР, ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МОДУЛЬ, ЕФЕКТ ЗЕЕБЕКА ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ, ПОРТАТИВНИЙ ПРИСТРІЙ, ПОРТАТИВНА ЕЛЕКТРОНІКА, ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ.

ЗМІСТ

с.

ВСТУП 6

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ 9

1.1 Основні етапи розвитку та приклади застосування термоелектричних джерел енергії 9

1.2 Характеристика ефективних термоелектричних матеріали для термо-електричних модулів 15

1.3 Ефективні способи комутації віток термоелектричних модулів 20

1.4 Висновки до розділу 1 25

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ 26

2.1 Шляхи підвищення ефективності роботи термоелектричних генераторів 26

2.2 Ефективність використання термоелектричних модулів 33

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ 35

3.1 Основні параметри та конструктивні елементи термоелектричних модулів 35

3.1.1 Конструктивні характеристики термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту Bi2Te3 35

3.1.2 Основні параметри термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3 42

3.2 Експериментальні дослідження характеристик термоелектричних модулів 43

3.3 Ефективні схеми застосування термоелектричних модулів 48

3.3.1 Будова та принцип роботи генератора тепла та електрики 35

3.3.2 Будова та принцип роботи портативної печі з термоелектричним модулем 52
3.4 Висновки до розділу 3 61

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 62

4.1 Правила техніки безпеки при експлуатації обладнання, що проектується 62
4.2 Електробезпека 64
4.3 Фактори, що впливають на протипожежну стійкість об'єкту 65

ВИСНОВКИ 69

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 70

ВСТУП

Відомо, що традиційна послідовність перетворення енергії (теплова – механічна енергія робочого тіла – механічна робота рухомих частин генератора – електрична енергія) має ряд недоліків: низький ККД в установках малої потужності, істотне забруднення оточуючого середовища, необхідність будівництва великих енергетичних комплексів для здешевлення електроенергії, наближеність енергетичних комплексів до джерел енергії, а, отже, віддаленість від споживача. Такий спосіб вирішення проблеми енергозабезпечення дуже загострює проблему транспортування електроенергії. Крім того, концентрація енергетичних джерел сильно напружує місцевий екологічний баланс. Будь-яка висока концентрація енергії є небезпечною для суспільства. Свідченням цього є численні катаклізми і техногенні аварії.

Наприклад, сумнозвісна Чорнобильська трагедія призвела до того, що енергетичні проблеми не лише в Україні ще багато десятиліть будуть розглядатися через призму її наслідків.

Тому значно менша кількість проміжних станів перетворення тепла в електричну енергію при застосуванні термоелектричних модулів (ТЕМ) та можливість ефективного забезпечення живленням саме автономних установок малої потужності вигідно виділяє ТЕМ серед інших джерел електричної енергії.

Прикладом цьому є створення термогенераторів в основі яких знаходиться ТЕМ для живлення космічних апаратів. Так, космічна станція «Вояджер - 2», створена для дослідження віддалених планет Сонячної системи, завдяки застосуванню термоелектричних джерел живлення відпрацювала у космосі більше 15 років. І зараз вона продовжує функціонувати вже за межами Сонячної системи. Без термоелектричних генераторів такий проект не міг бути здійснений. Термоелектричні джерела широко використовуються і для живлення охоронних систем, автономних підводних пристроїв – акустичних маяків та іншої навігаційної апаратури. Важливим є і застосування термоелектричних джерел енергії у різноманітних наземних пристроях – метеорологічних станціях,

системах попередження цунамі та іншій апаратурі в умовах, коли традиційні, наприклад хімічні джерела, через їх обмежений ресурс, не можуть бути використані. Отже, наявність таких джерел істотно сприяє створенню апаратури, яка знаходиться на передових рубежах науково-технічного прогресу, в тому числі і в оборонній техніці.

Принциповою перевагою термоелектричних перетворювачів енергії є можливість їх функціонування при невеликих перепадах температури. Це відкриває можливості використання для функціонування термогенераторів низькопотенційних відновлювальних джерел тепла: перепадів температури в океані, в повітрі та між повітрям і поверхнею ґрунту та ін. Зважаючи на це, у 1999 році в центральному науково-дослідному інституті при міністерстві оборони США (Defese Advanced Research Project Agenci – DARPA) розпочалися роботи по дослідженню термоелектричних систем, які використовують енергію оточуючого середовища. Однак, СКТБ «Фонон», правонаступником якого є Інститут термоелектрики, ще у 1984 році була запатентована ідея створення термоелектричних генераторів, що використовують енергію оточуючого середовища.

Виходячи з цього, актуальними є дослідження фізики перетворення тепла в електричну енергію, а також розробка екологічно безпечних приладів термо-електричного перетворення енергії для їх практичного застосування у різноманітних пристроях.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення рівня ефективності термоелектричних модулів та можливість ефективного забезпечення живлен-ням автономних установок малої потужності.

Об’єктом дослідження є термоелектричні модулі які використовують тепло згоряння органічних палив.

Предметом дослідження є процеси які відбуваються при перетворенні тепла в електричну енергію у термоелектричних модулях.

Апробація роботи. Гоцанюк Н.О. Ефективність застосування термо-електричних модулів. // Н.А. Куземко, Н.О. Гоцанюк // Збірник тез доповідей.

Матеріали IX міжнародної науково - технічної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 25 - 26 листопада 2020р.) / М-во освіти і науки України, Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя – Т.: ТНТУ, 2020. – Т.2. С. 100.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, переліку посилань (64 найменування).

Загальний обсяг текстової частини – 75 сторінок, 9 таблиць, 33 рисунки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Основні етапи розвитку та приклади застосування термоелектричних джерел енергії

Термоелектричні явища — ряд явищ, які пов'язують між собою електричний струм та потоки тепла в речовинах і контактах між ними.

На початку XX століття термоелектричні пристрої за електричною ефективністю на одиницю затраченого тепла конкурували з першими динамомашинами.

1909 р. – німецький інженер Е. Альтенкірх показав, що ефективність термоелектричного матеріалу пропорційна квадрату α і ефективними є ті матеріали, у яких відношення σ/χ не підпорядковується закону Відемана-Франца.

1927 р. – перша міжнародна угода по практичній температурній шкалі, яка в інтервалі температур від 650 до 1064°С (точки плавлення золота) відтворювалась за допомогою термопари платино родій -10%-платина.

1947 р. - Марія Телке створила перший термоелектричний генератор енергії (на основі сульфіду плюмбуму з надлишком Плюмбуму та Сульфуру) з ККД 3,3 % .

1949 р. – Абрам Федорович Йоффе (академік АН СРСР, уродженець Полтавщини) створює теорію фізики та хімії твердого тіла (напівпровідникових термоелементів). Експериментальні роботи та теоретичні напрацювання А.Ф. Йоффе дозволили термоелектриці вийти на новий якісний рівень – розпочалося використання на практиці напівпровідникових термоелементів, які виявилися в десятки разів ефективнішими, ніж металічні.

1953 р. - виготовлено перший термоелектричний холодильник або тепловий насос.

В наш час для промислових матеріалів досягнуто значення ZT = 1.0-1.5. Кращі термоелектричні елементи характеризуються ККД 8-12 %, що не дозволяє їм, на даний час, конкурувати у великій енергетиці з тепловими машинами.

У таблицях 1.1-1.2 наведено основні характеристики термогенераторів на органічному паливі, розроблених за останні 180 років. З аналізу цих даних витікає наступне.

Таблиця 1.2 - Генератори раннього періоду розвитку термоелектричної енергетики

Роки	Автори розробки	Матеріал батареї	Напруга, В	Потужність Вт	ККД, %
1826	Г. Ом	Bi-Cu	–	–	0,3
1832	Больто	Fe-Pt	–	–	0,1
1838	Дове	–	–	–	–
1840	Поггендорф	Fe-нейзильбер	–	–	0,2
1843	Пула	Fe-нейзильбер	–		0,2
1865	С. Маркус	Нейзильбер, сплав ZnSb	0,75	17	0,4
1866	Е. Беккерель	CuS, Нейзильбер	4,2	–	
1868	Ш. Кламон	Fe, Bi-Sb	3,0	–	0,6
1871	Ф. Ное	Нейзильбер, сплав ZnSb	–		0,8
1885	Шодрон	Fe, Zn-Sb	–	20	0,9
1887	Рауб	Fe, Zn-Sb	–		1,2
1887-1889	Р. Гюльхер	Ni, Zn-Sb	–	2-6	1,1
1906	А. Хейл	ZnSb, константан	–	1-15	1,2

1. Історію розвитку термоелектричних модулів можна поділити на три основні етапи (Рис.1.1): перший етап охоплює термогенератори, що створені на металевих сплавах; другий – на металевих сплавах та напівпровідниках; третій – термогенератори, що розроблені з використанням напівпровідникових термобатарей.

Таблиця 1.2 - Термоелектричні генератори на органічному твердому паливі

№	Роки	Країна (компанія)	Тип генератора	Матеріал батареї	P, Вт	ККД, %	Питома потужність, Вт/кг	Питома вартість $/Вт
1	1959	СРСР (НДІ Мінв'язку СРСР)	ТГГ-10	Zn-Sb,	10	1,0	—	—
2			ТГГ-15	константан	16	1,0	—	—
3	1960	США (Вестінхауз)	ТЕГ-100	TeGe; ZnSb	100	2,4	–	–
4			ТЕГ-260	Bi_2Te_3, PbTe PbTe	267	1.4	20	–
5	1961	Франція (Алькатель)	Gazel-4	PbTe	80	2,6	0,87*	—
6	1962	Франція (Томсон ЦСФ)	TG-50	PbTe	50	2,8	0,8*	—
7	1964	Франція (Алькатель)	TG-40	Bi_2Te_3	400	2,6	—	—
8	1964	СРСР (ІНП АН СРСР)	ТЕГ-50	Zn-Sb, константан	50	1,0	—	—
9	1964	СРСР (ІНП АН СРСР)	ТЕГ-300	Zn-Sb, константан	300	1,0	—	—
10	1964	Франція (Томсон ЦСФ)	TG-100	PbTe	100	2,8	—	—
11			TG-50	Bi_2Te_3	50	2,8	—	—
12	1965-1970	США (Teledyne Energy System)	ТЗ	Bi_2Te_3	3	2,5*	0,42*	—
13			2Т1Р	Bi_2Te_3	10	2,2*	0,66*	229,5*
14			2Т8Р	Bi_2Te_3	80	2,2*	1,03*	97,5*
15			5Т	Bi_2Te_3	90	2,2*	1,05*	94,4*
16	1966	США	—	Si-Ge	100	2,1	5	—
17	1969-1970	СРСР (ВНИИТ)	УГМ-1	Bi_2Te_3	2,5	2,2	0,5*	—
18			УГМ-80	Bi_2Te_3	80	—	—	—
19			УГМ-100 СХ	Bi_2Te_3	100	2,6	1,0	—
20	1990	Росія (Биапос)	КАТЕГ 15/12	PbTe	15	2,2*	1,0*	—
21			КАТЕГ 30/24	-//-	30	2,3*	1,1*	—
22			КАТЕГ 60/24	-//-	60	2,2*	1,2*	47,6
23			КАТЕГ 90/24	-//-	90	2,2*	1,2*	44,4
24	2004	Росія (Термокластер)	ГТГ-30-12		30	2,3*	1,4*	—
25			ГТГ-150Н	—	150	—	1,15*	—
26			ГТОС		200	2,5*	5,0*	—
27	2004	Канада (Global Thermoelectric)						
28			5015	PbTe	15	2,3*	0,75*	166*
29			5030	-//-	21	2,4*	1,05*	129,3*
30			5060	-//-	60	3,2*	1,5*	87,0*
31			5120	-//-	120	3,5*	1,97*	51,9*
32			5220	-//-	220	2,6*	2,65*	40,3*
33			1120	-//-	100	2,9*	0,85*	91,9*
34			8550	-//-	550	3,2*	5,4*	31,4*

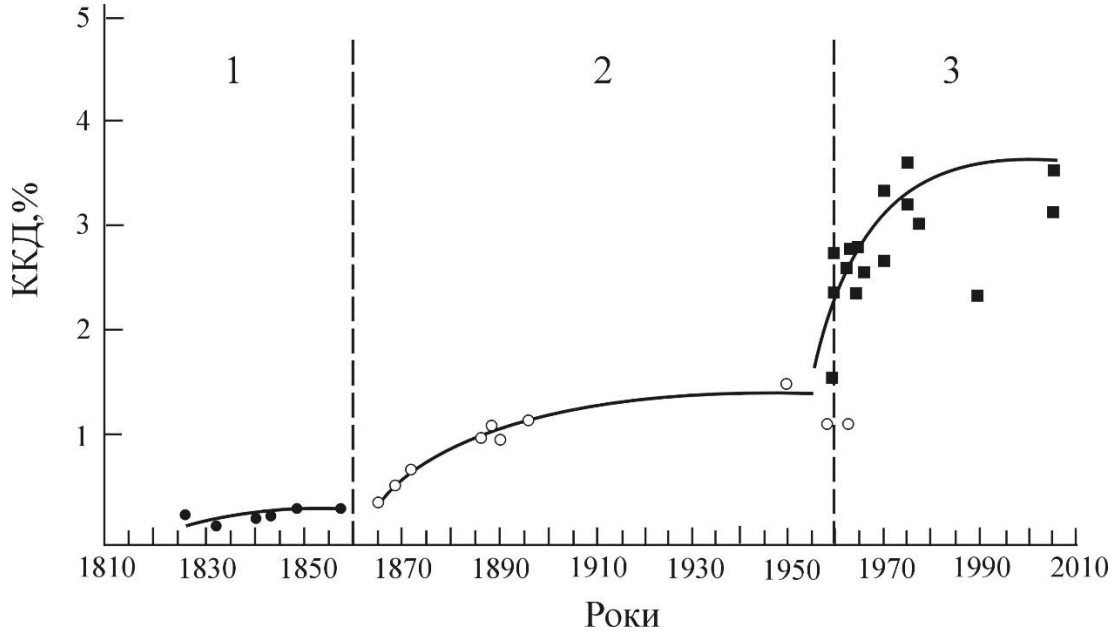


Рисунок 1.1 - Етапи розвитку термогенераторів на органічному паливі.

2. Електронна теорія напівпровідникових матеріалів та методи оптимізації матеріалів, що витікають з неї, дозволили досягти значного покращення їх добротності. Успіхи у зростанні добротності термоелектричних матеріалів наведено на Рис. 1.2.

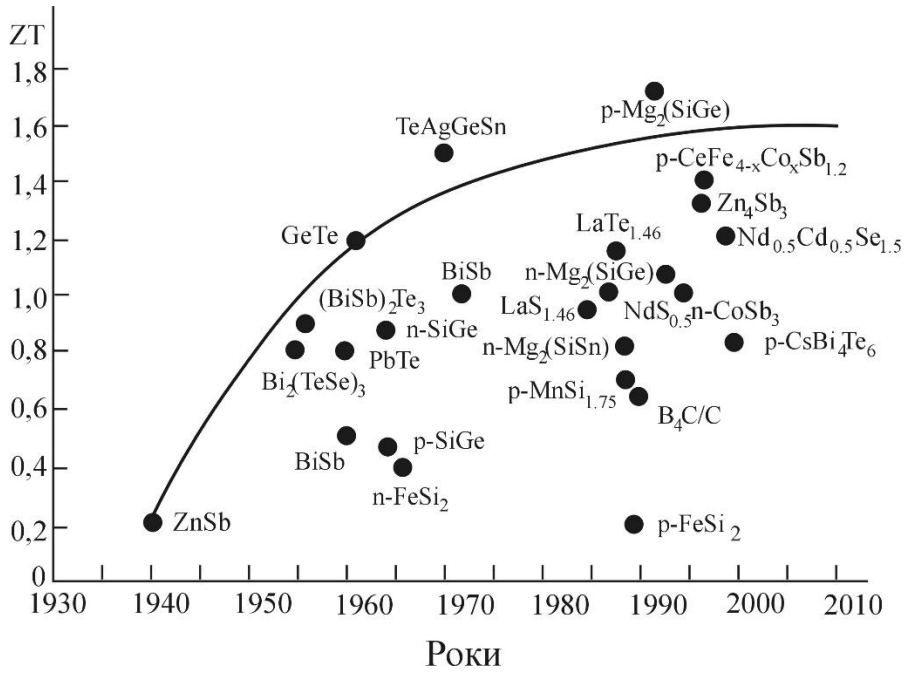


Рисунок 1.2 - Зростання добротності термоелектричних матеріалів за останні 65 років.

Видно, що ефективність термоелектричних матеріалів порівняно з ефективністю сплавів Zn-Sb зросла до 8 разів, причому створено матеріали як n- так і p-типу провідності. Слід було чекати, що таке зростання добротності матеріалів мало супроводжуватись відповідним зростанням ККД термо-генераторів.

Очікуване зростання ККД мало би мати значення 8-12 % (Рис.1.3). Однак у розробках 1961-2005 рр. ККД досягає всього 3,5 %. Отже, використання напівпровідників не призвело до радикального покращення ККД генераторів.

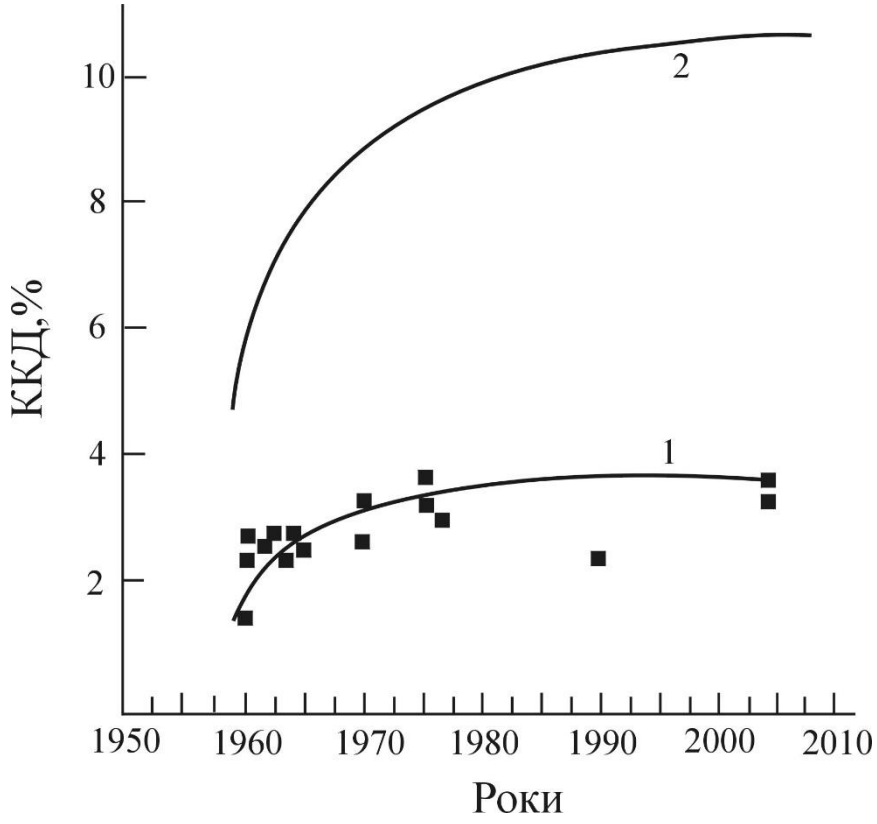


Рисунок 1.3 - Реальне (1) і очікуване (2) зростання ККД термогенераторів.

Дійсно, при зростанні ККД до 8-12 % термогенератори стають конкурентноздатними порівняно з машинними джерелами електрики при потужностях менших 1 кВт (Рисунок1.4).

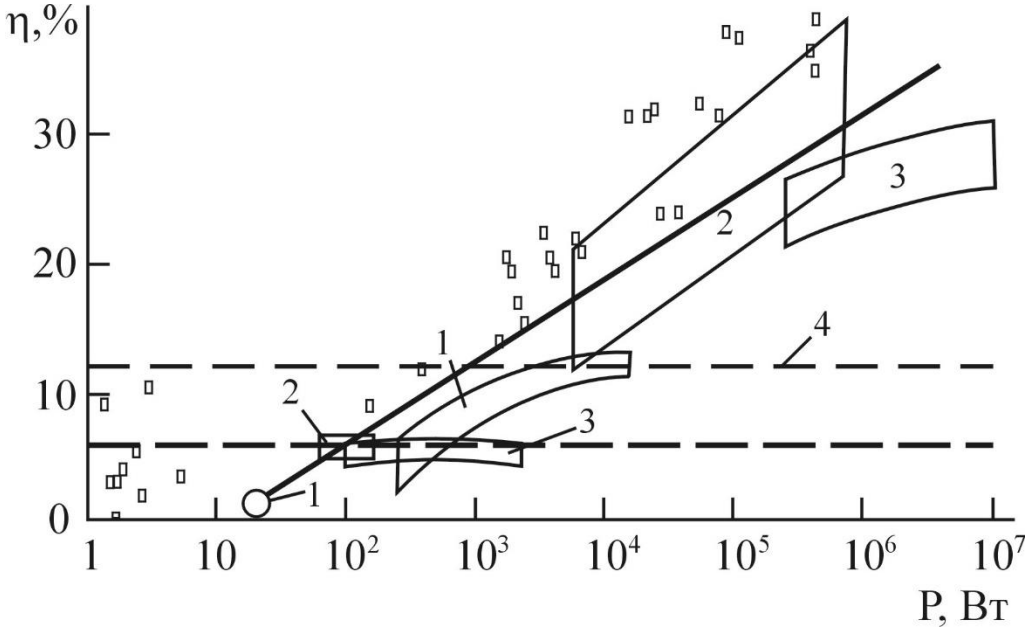


Рисунок 1.4 - Залежність ККД від потужності для різних енергетичних установок:

1 – карбюраторний двигун; 2 – дизель; 3 – газова і парова турбіни; 4 – границя ККД термоелектричного перетворювача. Квадрати відповідають використанню відомих двигунів Стірлінга.

Насправді цей діапазон потужностей може бути суттєво розширений внаслідок переваг термоелектричних генераторів за автономністю використання, ресурсом роботи (у 5-10 разів більший, ніж у машинних джерел), безшумністю у роботі.

Отже, одним з головних напрямків подальшого розвитку у термоелектричних генераторах є реалізація досягнень у підвищенні ефективності термоелектричних матеріалів. Досягнення цієї мети вимагає застосування нових фізичних підходів (фізичних моделей генераторів), у яких були би реалізовані можливості термоелектричних матеріалів.

ККД термогенераторів окрім ККД термоелектричного перетворення енергії залежить також від ряду інших коефіцієнтів корисної дії:

$$\eta_Г = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5,$$

де η_1 – ККД перетворення енергії палив у теплову енергію; η_2 – ККД, що дорівнює відношенню теплової потужності, що перетікає через ТЕГ, до загальної теплової потужності; η_3 – ККД, що дорівнює відношенню теплової потужності,

яка пройшла через ТЕБ, до теплової потужності, яка пройшла через ТЕГ (враховує тепло, що втратилось на елементах конструкції термогенератора); η_4 – ККД термобатареї; η_5 – відношення електричної енергії, що надається споживачу до виділеної термогенератором електричної енергії (врахування втрат електричної енергії допоміжними споживачами – насосами, вентиляторами). Тобто, ККД термогенераторів залежить не тільки від ККД термобатарей, який, в свою чергу, залежить від добротності (Z) термоелектричного матеріалу

$$\eta_4 = \eta_{Карно} \cdot Z \qquad (1.1)$$

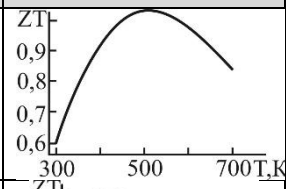
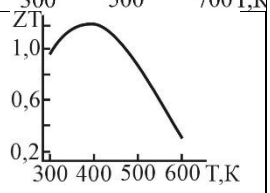
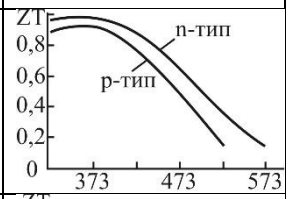
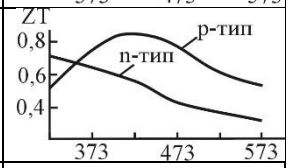
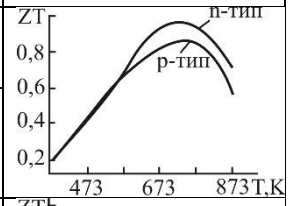
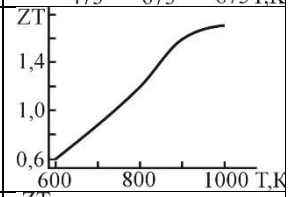
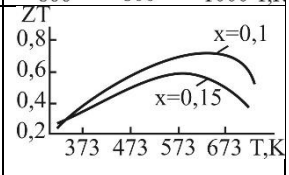
Ефективна реалізація можливостей сучасних термоелектричних матеріалів повинна супроводжуватися також зростанням і інших чинників, від яких залежить ККД термогенераторів: ефективності пальників (η_1), оптимізації конструкції (η_3), покращення ефективності термобатарей, мінімізації витрат на допоміжні функції термогенератора. Важливим є і зростання робочого інтервалу температур (зростання $\eta_{Карно}$) та використання схем рекуперації тепла. Така схема на практиці була використана тільки в одній із конструкцій термогенератора на рідкому паливі, що дало збільшення ККД до ~ 4,2 % [18].

Отже, ефективність та відповідно широта застосувань термоелектричних джерел енергії на органічному паливі залежать від успіху у розв’язанні комплексу задач, які, в першу чергу, витікають з досліджень та вибору раціональних фізичних моделей термогенераторів. Результати таких досліджень наведено у наступних розділах.

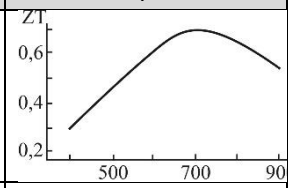
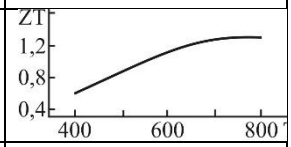
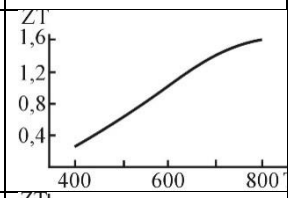
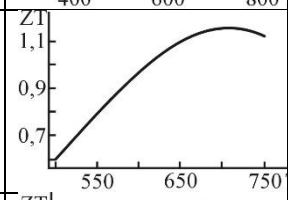
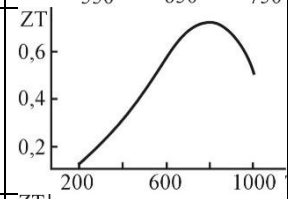
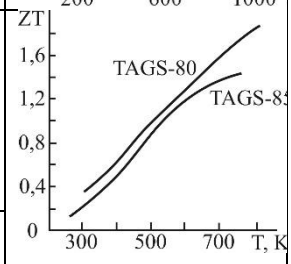
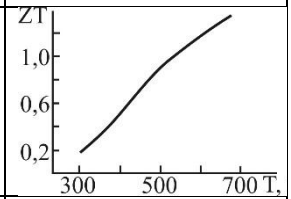
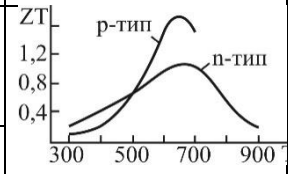
1.2 Характеристика ефективних термоелектричних матеріали для термоелектричних модулів

У таблиці 1.3 наведено матеріали, які ефективні у інтервалі температур 330-630К для модулів одно секційних генераторів та інтервалі 630-1300К для модулів багатосекційних генераторів. Такі матеріали повинні мати максимальне значення добротності і температурну залежність, що відповідає максимуму добротності у робочому інтервалі температур.

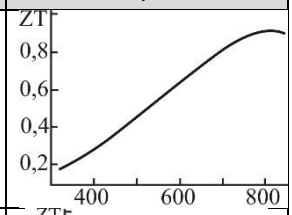
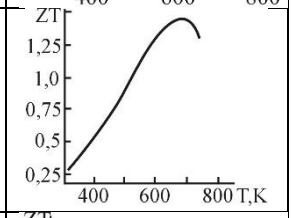
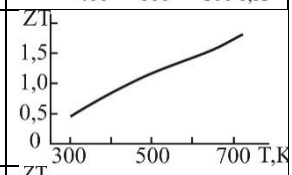
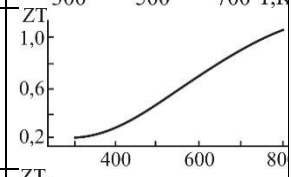
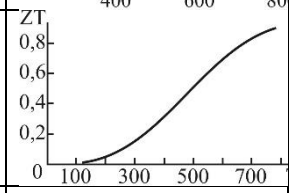
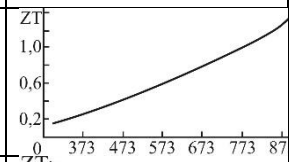
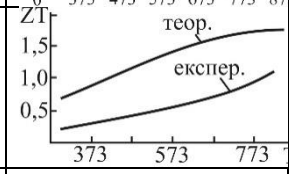
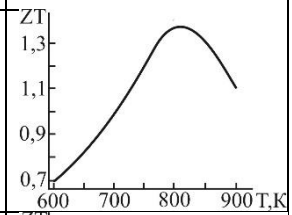
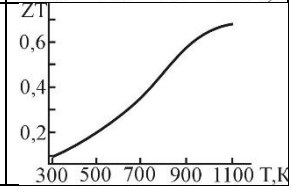
Таблиця 1.3 - Властивості термоелектричних матеріалів

№ п/п	Матеріал/ легований	Тип провід-ності	Робочий інтервал температур, К	$Z \cdot 10^3$, K^{-1}	Літера-тура	Температурна залежність ZT
1	2	3	4	5	6	7
1	Bi_2Te_3(75%)+ Bi_2Se_3 (25%)/ CuBr, AgI	n	298-573	$2,3_{400}$	[24]	
2	Bi_2Te_3(74%)+ Sb_2Te_3 (26%)/ Ag, $PbCl_2$	p	до 570	$3,2_{300}$	[24]	
3	Bi_2Te_3(30%)+ Sb_2Te_3 (70%)/ Te (2%)	p	298-573	$2,5_{573}$	[3]	–
4	Bi_2Te_3(20%)+ Sb_2Te_3 (80%)/ Te (6%)	p	298-573	$2,1_{573}$	[3]	–
5	Bi_2Te_3 (Rhythm)	n p	273-573 273-500	$3,0_{323}$ $2,5_{373}$	[27]	
6	Bi_2Te_3 (Beta)	n p	273-623 273-623	$1,7_{373}$ $2,0_{373}$	[27]	
7	PbTe (стехіом.)/ Br, Pb	n	550-900	1,3	[3]	–
8	PbTe/ PbI_2(0,03%)	n	300-873	$1,42_{723}$	[3, 14, 19]	
9	PbTe/ Na (3%)	p	300-873	$1,16_{723}$	[3, 14]	
10	PbTe(75%)+ SnTe (25%)/ $PbCl_2$+Pb	n	600-900	$1,7_{950}$	[24]	
11	$(Pb_{1-x}Ge_x)Te$/ гарячепресований при 923 К	n	373-723	$1,2_{573}$	[22]	

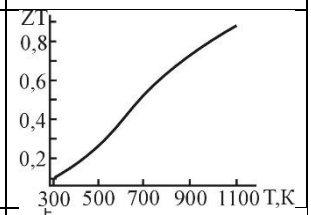
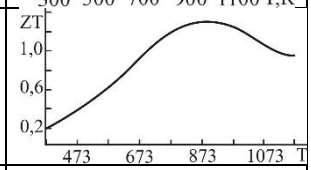
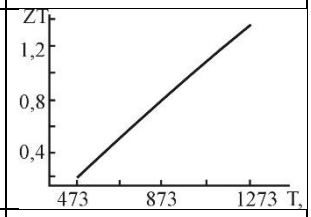
Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7
12	PbSe (стехіом.)/ $PbCl_2$+Pb	n	550-950	1,05	[5]	
13	PbS (стехіом.)/ Cl	n	550-950	0,9	[3]	
14	$AgSbTe_2$ (стехіом.)	p	300-850	$1,8_{600}$	[5, 24]	
15	GeTe (стехіом.)/ Te (2,5%)	p	300-800	0,9	[3]	–
16	GeTe-MnTe-PbTe	n	300-800	$2,0_{700}$	[22]	
17	GeTe(90%)+ $AgSbTe_2$ (10%)	p	523-773	$1,6_{650}$	[24]	
18	$MnSi_{1,75}$/ складно легований	p	500-800	$0,7_{700}$	[14]	
19	TAGS-80 (80%GeTe)	p	500-800	$2,3_{800}$	[14]	
20	TAGS-85 (85%GeTe)	p	500-800	$0,9_{800}$	[14]	
21	β-Zn_4Sb_3	p	400-700	$2,3_{610}$	[22]	
22	Zn_4Sb_3	p	500-700	$2,0_{670}$	[25]	
23	$Mg_2Si_{0,6}Ge_{0,4}$	n	300-700	$1,6_{680}$	[24, 25]	
24	$Mg_2Si_{0,6}Ge_{0,4}$	p	300-700	$2,8_{625}$	[3, 23]	

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7
25	$Mg_2Si_{0,8}Sn_{0,2}$		400-800	$1,1_{800}$	[23]	
26	$Ti_x(Zr_{0,5}Hf_{0,5})_{1-x}$ NiSn(Half-Heusler)		300-700	$2,07_{700}$	[25]	
27	$AgPb_{18}SbTe_{20}$	n	300-700	$2,2_{700}$	[23]	
28	BaNiCoSb (скутер.)	n	400-800	$1,4_{800}$	[28, 29]	
29	$(Ce\text{-}Yb)_y(Fe\text{-}Co)_4Sb_{12}$ (скутер.)	p	300-800	$1,15_{780}$	[23]	
30	$CeFe_3Co_{0,5}Sb_{12}$ (скутер.)	p	500-873	$1,4_{873}$	[23]	–
31	$CeFe_{4-x}Co_xSb_{12}$/ 0<x<1	p	473-873	2,3	[23]	
32	$CoSb_3$ (скутер.)	n	500-873	$2,0_{550}$	[22]	
33	$CoSb_3$ (скутер.)	n	500-900	1,1	[28]	
34	β-$FeSi_2$	p	800	0,25	[28]	
35	β-$FeSi_2$	n	800	0,5	[28]	
36	GeTe(95%)+ Bi_2Te_3(5%)	p	600-900	1,4		
37	Si (70%)+ Ge (30%)/ GaB	p	950-1300	0,55	[24]	

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7
38	Si (80%)+ Ge (20%)/ P, As	n	930-1300	0,7	[24, 28]	–
39	Si (70%)+ Ge (30%)	n	930-1300	0,7	[24]	
40	$Nd_{0,5}Cd_{0,5}Se_{1,5}$	n	773-973	$1,2_{973}$	[22]	
41	$NdS_{1,5}$	n	773-1073	0,9	[28]	–
42	$LaS_{1,42}$	n	1273	0,75	[28]	–
43	$LaTe_{1,46}$	n	1200	0,95	[28]	–
44	La_2Te_3	n	1273	1,0	[26]	
45	B_4C/C	p	>1300	0,2	[29]	

Аналіз даних наведених у таблиці 1.3 показав, що для робочих температур до 630 К найбільш ефективні матеріали – це квазібінарні тверді розчини на основі Bi_2Te_3. Твердий розчин Bi_2Te_3+ Sb_2Te_3 (20-30 мол. % Bi_2Te_3) має максимальну добротність $3,3\cdot10^{-3}К^{-1}$ при кімнатній температурі [3, 14]. Середня добротність у інтервалі температур 300-600 К складає ~2,1-2,2 $К^{-1}$, ККД ~12 %. Кращий матеріал n-типу – квазібінарний твердий розчин Bi_2Te_3 + Bi_2Se_3. Середня добротність у цьому ж інтервалі температур ~ $1,8\cdot10^{-3}К^{-1}$, ККД ~11 %. За умови легування $Bi_2Te_{2,4}Se_{0,6}$ домішками AgI, оптимальна концентрація носіїв знаходиться у межах $3\cdot10^{19}$-$1,2\cdot10^{20}$ $см^{-3}$ відповідно для температур 300 і 600 К. При високих температурах більш ефективний матеріал, що містить ~ 75 % Bi_2Te_3 ($Bi_2Te_{2,25}Se_{0,75}$). Він має більшу ширину забороненої зони, внаслідок чого ефекти власної провідності проявляються за більш високої температури, середня добротність його у інтервалі температур 300-670 К складає $1,9\cdot10^{-3}К^{-1}$ [14].

Для створення позитивної вітки найбільш ефективним є матеріал на основі телуриду вісмуту і сурми, легований $PbCl_2$. Оптимальні концентрації носіїв

струму знаходяться у межах від (1,8-2,2)·10^{19} для 300К до (7-9)·10^{19}см$^{-3}$ для 500-600К. Оптимальний подвійний сплав твердого розчину містить 75 мол.% Sb_2Te_3 [14].

Незважаючи на велику кількість досліджень, направлених на оптимізацію складу і легуючих добавок, а також удосконалення технології, ZT низькотемпературних генераторних матеріалів на основі Bi_2Te_3 на практиці вдалось збільшити лише до рівня, близького до 1. Слід зазначити, що теорія розрахунку двомірних структур з квантовими ямами на основі Bi_2Te_3 (композитні матеріали) передбачає підвищення ZT до 2. Однак технологія отримання матеріалів з квантовими ямами малої ширини досить складна. Тому у даний час експериментальних підтверджень високої ефективності таких матеріалів у режимі генерування енергії ще дуже мало. Аналогічна ситуація з порошковими та функціонально-градієнтними матеріалами.

Таким чином, у даний час завдяки високим термоелектричним показникам, кристалічні матеріали на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3 найбільш ефективні для створення генераторних модулів, робочий діапазон температур яких знаходиться на рівні 300 - 600 К.

1.3 Ефективні способи комутації віток термоелектричних модулів

Вибір матеріалу комутації визначається відсутністю або мінімальною хімічною взаємодією його з напівпровідником і близькими коефіцієнтами лінійного розширення.

Температурні втрати на металевій комутації невеликі і не перевищують 1-5 К [14]. Електричні втрати також малі, оскільки опір комутації у модулі, зазвичай, на два порядки менший, ніж опір напівпровідників. Співвідношення для опису ефективності термоелемента має такий вигляд [19]:

$$z = \frac{\alpha^2}{\lambda(\rho + \rho_K)}, \qquad (1.2)$$

де $\rho = 1/\sigma$, ρ_K – питомий опір комутації термоелемента. Тобто добротність термоелемента суттєво не змінюється, якщо ρ_K не перевищує декількох відсотків ρ. Теплові і електричні втрати при вдалому виборі матеріалу комутації і технології її отримання визначаються за виразом:

$$\eta_K = (1-\delta_T)(1-\delta_e), \tag{1.3}$$

де δ_T, δ_e – відповідно теплові та електричні втрати в комутації.

Найбільш широко використовується метод паяння і сумісного гарячого пресування [14, 19]. Метод паяння металевих шин (Ni, Co, Fe, Cu) до залужених віток був освоєний у Сухумському ФТІ. Для попередження дифузії домішок з припою у напівпровідник використовувався антидифузійний шар NiSb. Метод містить багато операцій і стадій, вимагає детального підбору флюсів, припоїв, а також повного видалення флюсу після паяння [19]. Крім того, при високотемпературному паянні комутації відбувається різка термічна дія на термоелектричний матеріал, зазвичай, припої мають високі термічні та електричні опори, можлива також дифузія домішок з припою у напівпровідник [25]. Тому метод паяння переважно використовується для комутації низькотемпературних (холодильних) модулів.

Комутуючі шини виготовлені з Co. Така ж технологія комутації використана у модулях фірми „Позіт” [19]. У цілому сумісне пресування віток і комутації – це високопродуктивна технологія. Однак за підвищених температур і тривалих циклічних навантажень електричний опір на межі комутуюча пластина – напівпровідниковий матеріал зростає, що зменшує надійність та ресурс роботи модулів [25].

Перевагами термічного напилення комутаційних шарів металів у вакуумі є можливість автоматизації процесу та висока технологічність. Однак, такий метод вимагає достатньо складного і дорогого обладнання й використовується переважно для нанесення тонких антидифузійних шарів. Адгезія плівок, наприклад Co, нанесених таким методом складає 25-30 кг/см^2, контактний опір $(6\text{-}9)\cdot10^{-6}$ Ом/см^2.

Технологія плазмового нанесення антидифузійних та комутаційних шарів на напівпровідникові вітки модулів використовується фірмами Hi-Z та „Біапос" [14, 19]. Комутація термоелементів здійснюється за допомогою порошків металів або сплавів розпорошених у струмені плазми. Фактично це процес зварювання шарів, які послідовно наносяться на торці напівпровідникових віток. Вибір режимів напилення дозволяє регулювати міцність адгезії шарів між собою і пористість нанесеної речовини. Міцність зчеплення комутаційних шарів з термоелектричним матеріалом отриманих плазмовим напиленням знаходиться у межах 45-75 кг/см^2, контактний опір $(3 \div 16) \cdot 10^{-6}$ Ом/см^2 [25].

Хімічне нанесення металів на напівпровідники дозволяють уникнути труднощів, що виникають внаслідок термічної обробки термоелементів оскільки гальванічні процеси протікають за низьких температур. Гальванічний метод антидифузійних шарів та комутації простий у виконанні, не вимагає дорогого обладнання і дозволяє ефективно регулювати товщину осаджених шарів.

Вирішальне значення для отримання якісного і надійного контакту комутації з термоелектричним матеріалом має стан поверхні напівпровідника: мікро- та макроструктура, чистота поверхні [25]. Підготовка поверхні до металізації включає різні методи механічної обробки, електрополірування, іонне травлення, а також різні методи обезжирювання та відмивки.

У даній роботі надійну комутацію віток модуля по гарячій стороні отримано шляхом використання андифузійних шарів на основі Ni, нанесених гальванічним методом. За умови спеціальної обробки поверхні напівпровідника міцність та адгезія шарів нікелю до кристалів твердих розчинів за величиною не поступається міцності зв'язку між тими ж кристалами. Це зумовлено утворенням хімічного зв'язку при взаємодії атомів Ni з атомами, наприклад, Te і Se. Ймовірність утворення такого зв'язку збільшується, оскільки тверді розчини завжди кристалізуються з відхиленням від стехіометрії і містять вільний Te і Se [26].

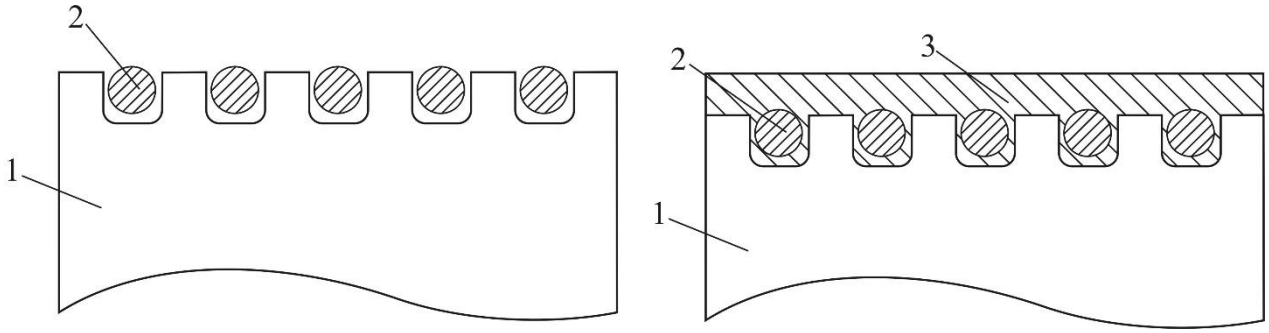
Мінімізація виникаючих у нанесених антидифузійних шарах термічних напруг досягнута вибором товщини і структури цього шару, а також

оптимальним складом електроліту та умов проведення процесу осадження. За результатами дослідження впливу цих чинників визначено оптимальну величину і знак внутрішніх напруг гальванічного нікелевого шару. Встановлено, що оптимальна товщина антидифузійного шару, при якій зберігається стійкість модуля до циклічних змін температури знаходиться на рівні 30 мкм.

У залежності від конструктивних особливостей модуля і режимів його роботи втрати на контактних і комутаційних опорах можуть складати від кількох відсотків до кількох десятків відсотків [19]. Тому найбільш привабливим для комутації віток є використання металів з високою тепло- і електропровідністю, наприклад міді, срібла. У такому шарі відповідно збільшуються внутрішні напруження, які послаблюють адгезію Ni до термоелектричного матеріалу.

Ненапружений комутуючий шар отриманий шляхом використання додаткових комутаційних дротяних елементів (Cu, Ni, W), на яких гальванічним методом формується комутуюча пластина (Рис.1.5).

Дослідження комутації віток модуля по гарячій стороні з різними дротяними елементами показали, що енергетичні характеристики модулів (потужність, ККД) з мідно-нікелевою комутацією кращі, ніж модулів з чисто нікелевою комутацією віток (Рис.1.6). Це зумовлено підвищеним опором Ni за робочих температур 523-573 К.



а б

Рисунок 1.5 - Переріз вітки гарячої сторони модуля з додатковими дротяними елементами: а – до комутації; б – після гальванічної комутації;

1 – термоелектричний матеріал; 2 – дротяні елементи; 3 – гальванічний Ni.

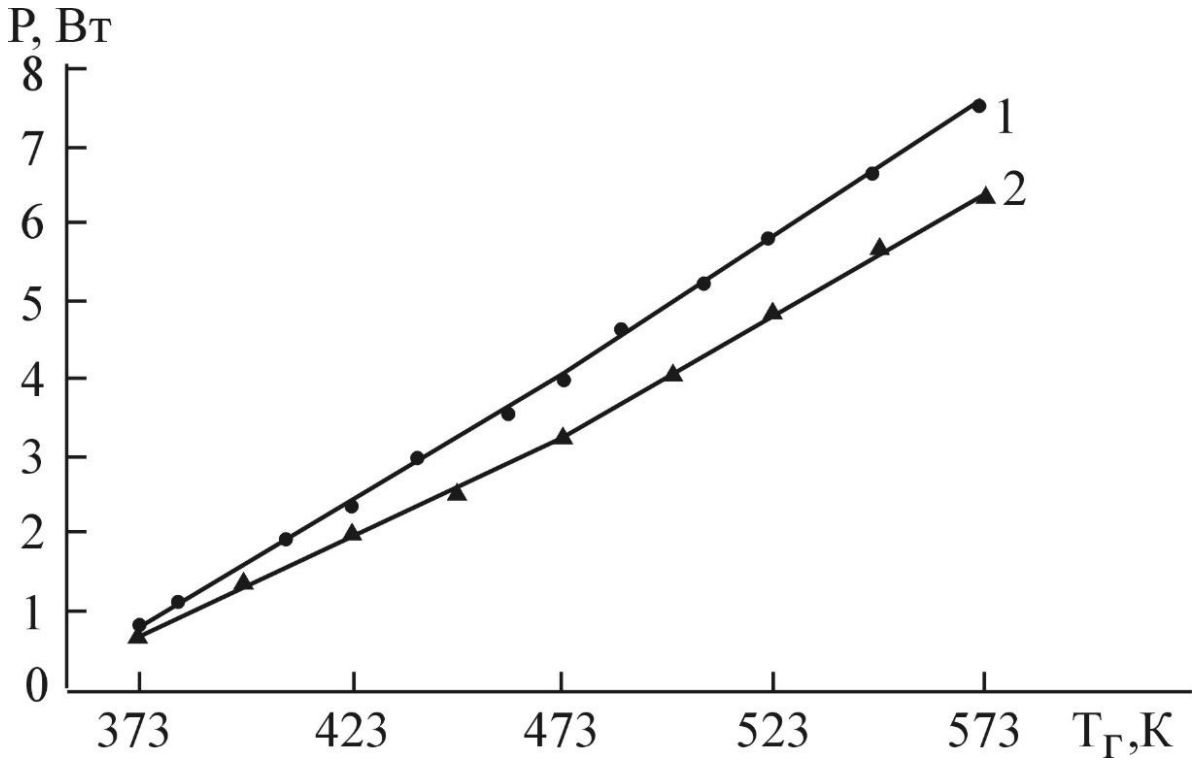


Рисунок 1.6 - Залежність електричної потужності модулів з мідно-нікелевою (1) та нікелевою (2) комутацією від температури гарячого спаю при T_X = 303 К.

Однак ресурс роботи модулів з мідно-нікелевою комутацією суттєво менший (у ~2-3 рази), ніж модулів з нікелевою комутацією (Рис.1.7).

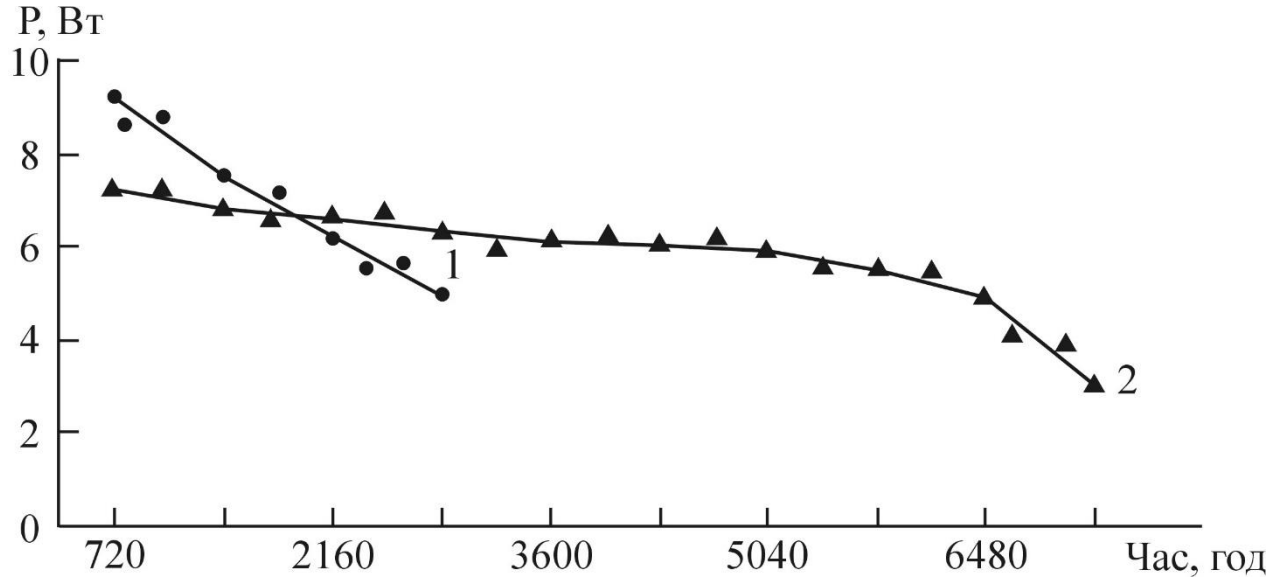


Рисунок 1.7 - Залежність потужності модулів з мідно-нікелевою (1) і нікелевою (2) комутацією від часу роботи.

Комутуючий шар з меншим омічним опором, порівняно з чисто нікелевою комутацією, отриманий за умови використання вольфрамових дротяних елементів. Для кожного типу модуля, геометричних розмірів віток визначено оптимальну кількість та діаметр дротяних елементів, а також товщину комутаційної пластини, яку необхідно сформувати на термоелементах. Підібраний відповідний склад електроліту та визначені оптимальні режими гальванічного нанесення комутації. Отримана таким методом комутація віток у модулях має мінімальні напруги за умови тривалих циклічних термічних навантажень. Контактний опір складає $(5\text{-}7)\cdot10^{-6}$ Ом/см^2, сила адгезії нікелевого покриття до напівпровідника в залежності від його типу знаходиться у межах 180-280 кг/см^2. Різниця зумовлена міцністю самого напівпровідника, оскільки розрив відбувається по основному матеріалу.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Проведений літературний огляд показав, що досягнутий рівень ефективності термогенераторів на органічному паливі в основному зумовлений покращенням добротності термоелектричних матеріалів, що в свою чергу дозволить значно розширити можливості застосування термоелектричних генераторів на органічному паливі.

2. Аналіз основних шляхів підвищення ефективності термоелектричних модулі дозволив виявити основні напрямки їх подальшого розвитку, серед яких першочерговим є підвищення ККД.

Отже проведений літературний огляд показав доцільність дослідження проблем підвищення ККД термоелектричних модулів та створення на їх основі екологічно безпечних приладів термоелектричного перетворення енергії для їх практичного застосування у різноманітних пристроях.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Шляхи підвищення ефективності роботи термоелектричних генераторів

Враховуючи зростаючу потребу в автономних джерелах електричної енергії, стає очевидною необхідність вдосконалення ТЕГ і, особливо, збільшення їх ККД.

Головні напрямки підвищення ККД термогенераторів на органічному паливі – це зменшення втрат тепла з продуктами згоряння. Ця проблема досліджувалась авторами [25,27] для генераторів з полум'яним спалюванням органічного палива, у яких температура продуктів згоряння на виході ТЕГ досягає 973 К. За даними [25], теплові втрати з продуктами згоряння за таких умов можна зменшити приблизно на 26 %. За умов згоряння палива температура продуктів реакції суттєво нижча (523–673 К), що звісно змінить ефективність рекуперації тепла. Крім того, горіння має ряд особливостей, які проявляються за різних способів подачі реагентів на стаціонарний шар . Тому оцінка ефективності рекуперації тепла у термогенераторах з дифузійним джерелом тепла важлива для визначення шляхів їх оптимізації.

Фізична модель термогенератора, використана для визначення ефективності рекуперації тепла, наведена на рис. 2.1.

Корисне тепло Q_1, надходить від поверхні до термобатареї (ТЕБ) випромінюванням Q_1в і конвекцією або теплопровідністю Q_1к.

$$Q_1=Q_{1в}+Q_{1к} \tag{2.1}$$

$$Q_{1в}=\varepsilon\cdot\sigma_0\cdot(T_q^4-T_1^4)\cdot S\cdot\varphi, \tag{2.2}$$

де ε –ступінь чорноти поверхні ; $S=\pi\cdot d\cdot H$ – випромінююча поверхня ; σ0= – стала Стефана–Больцмана; $\varphi=1-\frac{2}{\pi N}\sum_{i=1}^{N}\operatorname{arctg}(\delta/X_i)$ – кутовий коефіцієнт, де δ – повітряний проміжок між пальником і теплоприймальною поверхнею генератора; N – кількість кроків розбиття висоти та теплоприймальної поверхні;

Xi – поточна координата; H=N·(Xi+1–Xi) – висота шару і теплоприймальної поверхні.

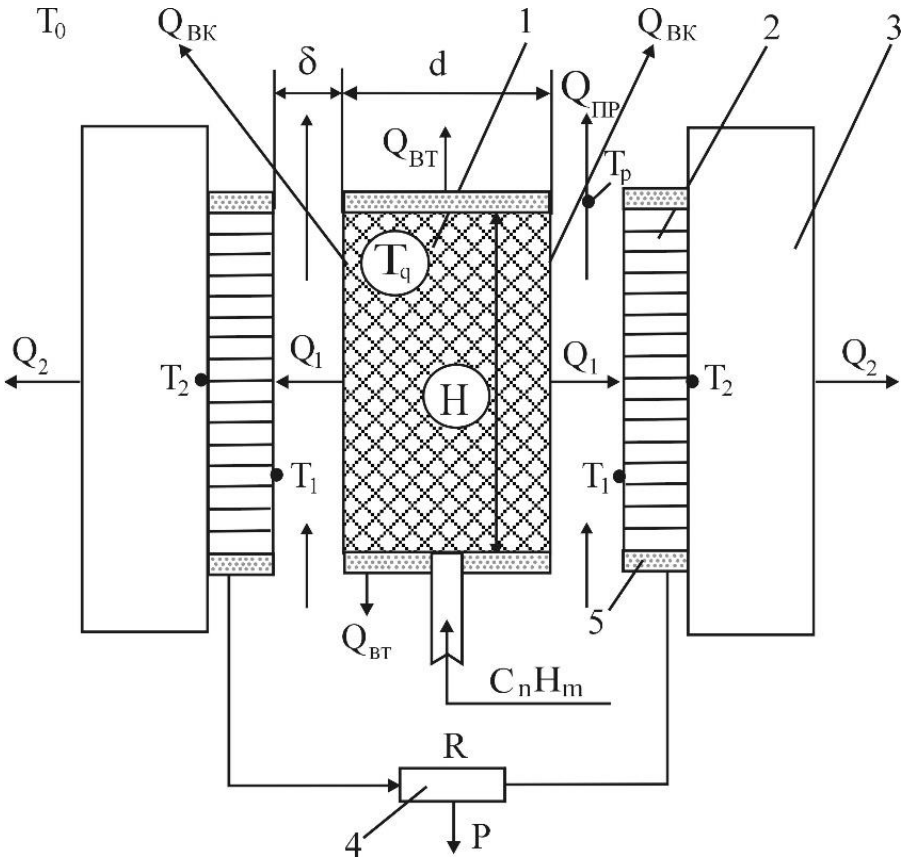


Рисунок 2.1 - Фізична модель термогенератора з дифузійним джерелом тепла:

1 – джерело тепла; 2 – термобатарея; 3 – повітряний радіа-тор; 4 – електричне навантаження; 5 – теплоізоляція.

$$Q_{1к}=\varepsilon_к\cdot(\kappa_к/\delta)\cdot(T_q-T_1)\cdot S, \qquad (2.3)$$

де $\varepsilon_к$ –коефіцієнт, який враховує зміну фізичних властивостей середовища (теплопровідність, теплоємкість, густина) за умови зміни температури; $\kappa_к$ – коефіцієнт теплопровідності повітря.

Частина генерованого тепла $Q_{вт}$ втрачається випромінюванням і конвекцією з верхнього і нижнього торців джерела тепла і внаслідок неповного попадання на ТЕБ теплового випромінювання $Q_{вк}$ від , що враховує кутовий коефіцієнт φ. Загальні втрати джерела тепла:

$$Q_в=Q_{вк}+Q_{вт}, \qquad (2.4)$$

де $$Q_{вт}=[2\cdot\varepsilon_в\cdot\sigma_0\,(T_q^4-T_0^4)+1{,}5\cdot a_в\,(T_q-T_0)]\;0{,}25\,\pi\,d^2, \qquad (2.5)$$

(у формулі 1,5=1,0+0,5, де 1,0 відповідає верхньому торцю (сприятливі умови для конвекції), 0,5 – відповідає нижньому торцю (менш сприятливі умови)).

$$Q_{вк}=\varepsilon_в\cdot\sigma_0\,(T_q^4-T_0^4)\cdot S\cdot(1-\varphi), \qquad (2.6)$$

де $\varepsilon_в$ – ступінь чорноти торців джерела тепла; $a_в$ – коефіцієнт конвективного теплообміну поверхні торця джерела тепла з навколишнім середовищем, який знайдено за виразами:

$$Nu=a_в\cdot d/\kappa_к;\ Nu=C\cdot(Gr\cdot Pr)^n \Rightarrow a_в=(\kappa_к/d)\cdot C\cdot(Gr\cdot Pr)^n \qquad (2.7)$$

коефіцієнти C і n знайдено за даними [27]:

Gr·Pr	C	n
$1\cdot10^{-3}$–$5\cdot10^{-2}$	1,18	1/8
$5\cdot10^{2}$–$2\cdot10^{7}$	0,54	1/4
$2\cdot10^{7}$–$1\cdot10^{13}$	0,135	1/3

Рівняння теплового балансу для джерела тепла, нехтуючи невеликими втратами тепла по елементах конструкції, має такий вигляд:

$$Q=Q_{1в}+Q_{1к}+Q_{вт}+Q_{вк} \qquad (2.8)$$

Тепловий потік Q_1 встановлюється залежно від перепаду температури T_1–T_2 на ТЕБ, яка генерує ЕРС згідно закону Зеєбека і її теплового опору R_t. У замкнутому колі на електричному навантаженні R виділяється електрична потужність:

$$P=Q_1\cdot\eta_{те}. \qquad (2.9)$$

Невикористане тепло:

$$Q_2=Q_1-P=Q_1\cdot(1-\eta_{те}) \qquad (2.10)$$

відводиться у навколишнє середовище.

Згідно визначенню, теплота згоряння палива містить тепло $Q_п$, поглинуте при нагріванні палива до температури реакції, нагріванні повітря до температури реакції Q_0, тепловиділення реакції, а також тепловиділення за умови охолодження до початкової температури продуктів реакції, у тому числі і при конденсації реакційної води $Q_{пр}$.

Витрату палива, яку необхідно реалізувати для забезпечення заданих характеристик, визначено з виразу:

$$g_n=Q/G, \quad (2.11)$$

де G– теплота згоряння палива (для пропану 50,5 МДж/кг, 11080 ккал/кг).

Кількість тепла, необхідна для випаровування і нагрівання пропану, що знаходиться у паливній ємності у зрідженому стані, до температури реакції

визначено за формулою:

$$Q_п=\lambda_1\cdot g_n+c_n\cdot(T_g-T_0)\cdot g_n, \quad (2.12)$$

де λ_1– теплота пароутворення пропану; C_N– теплоємність пропану, при відповідній температурі. Кількість тепла, яка необхідна для нагрівання повітря до температури реакції, знайдено за виразом

$$Q_0=c_0\cdot(T_q-T_0)\cdot g_n\cdot 15{,}71, \quad (2.13)$$

де c_0 – теплоємність повітря; коефіцієнт 15,71 визначає масу повітря, яка необхідна для згоряння одиниці маси пропану.

У процесі охолодження продуктів реакції CO_2, H_2O і складових використаного повітря виділяється тепло

$$Q_{пр}=Q(CO_2)+Q(H_2O)+Q_c \quad (2.14)$$

$$Q(CO_2)=c_1(T_q-T_0)\cdot g_n\cdot 3 \quad (2.15)$$

$$Q(H_2O)=[c_2(T_q-373)+\lambda_2+c_3(373-T_0)]\cdot g_n\cdot 1{,}636 \quad (2.16)$$

$$Q_c=Q_0-c_4\cdot(T_q-T_0)\cdot g_n\cdot 3{,}636, \quad (2.17)$$

де c_1, c_2, c_3, c_4 – теплоємності відповідно CO_2, водяної пари, води і кисню; λ_2 – питома теплота пароутворення води.

Загальний ККД термогенератора дорівнює добутку теплового і термоелектричного ККД

$$\eta=\eta_т\cdot\eta_{те} \quad (2.18)$$

Для підвищення теплового ККД використано теплову схему, у якій здійснюється рекуперація тепла, що втрачається ТЕГ. Суть її у тому, що тепло (Q_2), яке відводиться від термобатареї і втрачається з продуктами згоряння ($Q_{пр}$), використовується для компенсації частини тепла реакції, яке витрачається на нагрівання, випаровування палива і нагрівання повітря.

Часткове використання тепла, що відводиться від термобатареї, зменшує втрати тепловиділення реакції на величину

$$Q_{p1}=\lambda_1 \cdot g_n + c_n \cdot (T_2 - T_0) \cdot g_n + c_0 \cdot (T_2 - T_0) \cdot 15{,}71 \cdot g_n \,, \quad (2.19)$$

а використання тепла продуктів згоряння на величину

$$Q_{p2}=\lambda_1 \cdot g_n + c_n \cdot (T_p - T_0) \cdot g_n + c_0 \cdot (T_p - T_0) \cdot 15{,}71 \cdot g_n, \quad (2.20)$$

де $T_p=0{,}5\cdot(T_q - T_1)$ – температура продуктів реакції на виході термогенератора.

Очевидно, що $Q_{p1}<Q_{p2}$. Максимальний ККД генератора, у якому використовується рекуперація тепла, оцінено за формулою

$$\eta = P/(Q - Q_{p2}). \quad (2.21)$$

Результати розрахунку характеристик термогенератора на пропан-бутані, у якому використано рекуперацію, наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Енергетичний баланс термоелектричного генератора з джерелом тепла

Характеристика	Позначення	Tg = 600 K		Tg = 800 K	
		Вт	% від Q	Вт	% від Q
1	2	3	4	5	6
1. Теплова потужність КДТ	Q	183		921	
2. Тепло, що надходить до ТЕБ, в тому числі:	Q_1	148,1	80,9	748,6	81,28
– випромінюванням;	Q_{1B}	117,8	64,37	651,0	70,68
– конвекцією і теплопровідністю	Q_{1K}	30,3	16,57	97,6	10,59
3. Втрати тепла, втому числі:	Q_B	34,84	19,03	172,3	18,70
– випромінюванням і конвекцією з торців пальника;	Q_{BT}	28,52	15,58	140,65	15,27
– із-за неповного попадання корисного випромінювання на ТЕБ	Q_{BK}	6,32	3,45	31,65	3,4
4. Невикористане тепло	Q_3	143,9	78,63	726,6	78,89
5. Електрична потужність ТЕБ	P	4,2	2,29	22	2,38
6. Тепло, що поглинається паливом в тому числі:	$Q_П$	3,72	2,03	25,23	2,74
– при випаровуванні;	$Q_{ПВ}$	1,54	0,84	7,51	0,82
– при нагріванні	$Q_{ПН}$	2,18	1,19	17,72	1,92
7. Тепло для нагрівання повітря	Q_0	17,66	9,65	146,4	15,9
8. Тепло, що виділяється при охолодженні продуктів реакції:	$Q_{ПР}$	37,1	20,2	250	27,14
– CO_2;	$Q_{(CO_2)}$	3,0	1,65	24,36	2,65
– H_2O;	$Q_{(H_2O)}$	20,1	10,9	110,1	11,95
– складових використаного повітря	Q_C	14,0	7,65	115,9	12,58
9. Тепло, що відводиться від ТЕБ	Q_2	106,8	58,36	476	51,68
10. Максимальне рекуперованe тепло	Q_{P2}	18,5	10,10	125,3	13,60

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
11. ККД ТЕГ, %	η	2,3		2,34	
12. ККД ТЕГ з рекуперацією тепла, %	η_P	2,6		2,80	

Характеристики джерела тепла та інші вихідні умови наступні: S = 452 см^2; теплове навантаження 0,4 і 2,0 Вт/см^2; ε = 0,8; $\varepsilon_в$= 0,2; φ=0,95; δ=5 мм; T_0=293 К; ΔT=110 К.

Аналіз одержаних результатів показав, що за умови зустрічної подачі реагентів основний вклад у передачу тепла до термоелектричної батареї (80-87 %) вносить теплове випромінювання. Конвекція відіграє основну роль у процесах підведення повітря і відведення продуктів згоряння. Решта тепла передається до термобатареї теплопровідністю через повітряний проміжок між термобатареєю, величина якого для даного випадку оптимальна.

Частина тепла реакції (12 – 19 %), витрачається на підвищення внутрішньої енергії палива і повітря, причому основна його кількість ~83–85 % витрачається на нагрівання повітря.

У процесі охолодження продуктів реакції і складових повітря, що не приймали участі у реакції залежно від умов, виділяється 20-27 % тепла. Це тепло фактично не надходить до ТЕБ і втрачається з продуктами згоряння палива. Частковою рекуперацією тепла продуктів реакції підвищується внутрішня енергія реагентів, внаслідок чого ККД ТЕГ збільшується у ~1,1-1,2 рази. З цією метою можна використати також тепло, яке відводиться від термобатареї, але воно характеризується низьким потенціалом. Оскільки на практиці прагнуть понизити температуру холодного спаю термобатареї, то в результаті рекуперації цього тепла досягається менший ефект.

Другий напрямок, який досліджено з метою покращення енергетичних характеристик ТЕГ з дифузійним джерелом тепла – це інтенсифікація тепло- та масообмінних процесів у проміжку теплоприймальна поверхня термобатареї шляхом примусової подачі додаткової кількості повітря до .

Як об’єкт досліджень використано термогенератор електричною потужністю 10 Вт з примусовим відведенням тепла від термобатареї. Примусова

подача повітря реалізована за допомогою власних вентиляторів, які подають повітря до холодних радіаторів. Температура повітря, що надходить від холодних радіаторів до , знаходилась у межах 323-328 К, швидкість подачі 0,14 м/с.

Досліджено дві схеми примусової подачі повітря (Рис. 2.2): подача повітря з бокових сторін вертикально розташованого шару (Рис. 2.2а, вид зверху); подача повітря знизу поздовж вертикально розташованого шару (Рис. 2.2б, вид збоку). У обох випадках відведення продуктів згоряння здійснювалось через верхню частину термогенератора.

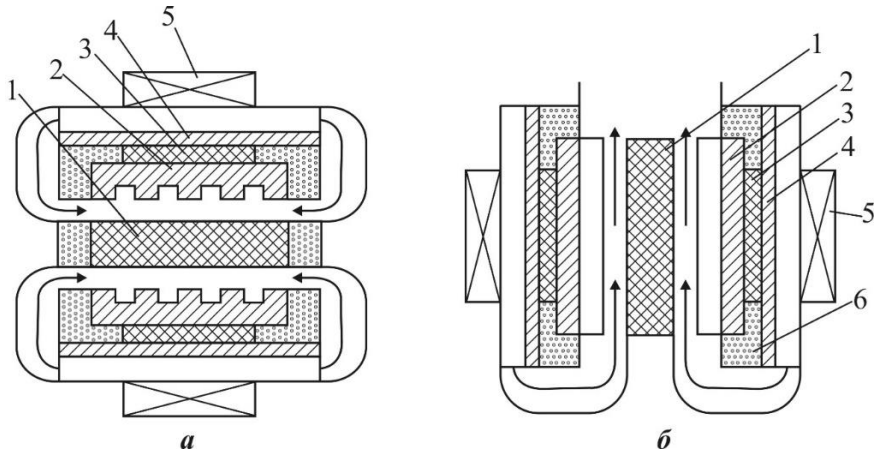


Рисунок 2.2 - Схема примусової подачі повітря (показано стрілками) до поверхні:

1 – теплоприймальна поверхня ; 2 – гарячий теплообмінник; 3 – термобатарея; 4 – холодний теплообмінник; 5 – вентилятор; 6 – теплоізоляція;

а – подача збоку; б – подача знизу.

Результати досліджень показали, що за постійної витрати палива (68,3 г/год) нагнітання повітря з бічних сторін ТЕГ (Рис. 1.5а) мало впливає на електричну потужність ТЕГ і ККД. Збільшення потужності складає 1-2 % при збільшенні температури в середньому на 5-10 К. За таких умов подача повітря за схемою «б» (вздовж ребер гарячого оребрення) збільшує електричну потужність на ~10 %. Ступінь перетворення газового палива при цьому не змінюється.

В обох випадках примусова подача повітря покращує горіння внаслідок інтенсифікації тепло - і масообміну у повітряному проміжку і тепло-

приймальною поверхнею термобатареї, але втрати тепла з примусовим повітрям різні: у випадку “а” вони більші (подача повітря на поверхню здійснюється з двох боків) і не компенсуються приростом потужності ТЕГ внаслідок підвищення температури.

2.2 Ефективність використання термоелектричних модулів

В даному пункті дипломної роботи нами здійснено порівняльний техніко – економічний розрахунок використання портативної печі з термогенераторами типу TEC1-12709 в порівнянні з акумуляторними батарейками типу два А.

Витрати на термоелектричний генератор порівнювалися з вартістю отримання енергії від чотирьох батарейок напругою 1,2 В, ціна однієї батарейки рівна 80 грн. При даній напрузі матимемо:

$$W = I \cdot U \cdot \tau, \tag{2.22}$$

де W - кількість електроенергії, Вт·год;

I - сила струму, А;

U - напруга, В;

τ - час роботи акумулятора, В.

$$W = 4{,}8\text{В} \cdot 2{,}5\,\text{А} \cdot \text{год.} = 9{,}6\,\text{Вт} \cdot \text{год.}$$

В якості навантаження використаємо світлодіодну лампу на 3 Вт. Від одного заряду батарей акумуляторів лампа світитиме:

$$\tau = 9{,}6\ \text{Вт} \cdot \text{год} / 3\text{Вт} = 3{,}2\ \text{год.} \tag{2.23}$$

Якщо врахувати кількість циклів заряду розряду акумуляторних батарей, отримаємо:

$$500\,\text{циклів} \cdot 3{,}2\,\text{год.} = 1600\,\text{год}, \tag{2.24}$$

а з врахуванням ціни однієї батареї:

$$80\,\text{грн.} \cdot 4\,\text{шт.} = 320\,\text{грн}, \tag{2.25}$$

що відображатиме вартість акумуляторного блоку з чотирьох батарей протягом всього періоду їх експлуатації.

Віднесемо цю вартість до вартості ТЕГ типу TEC1-12709, яка становить 3000 грн. і на основі цього визначимо кількість комплектів:

$$3000\,\text{грн.} / 320\,\text{грн.} \approx 9,4\,\text{шт.} \tag{2.26}$$

Таким чином щоб вартість витрат обох варіантів зрівнялась, нам необхідно буде придбати понад 9 комплектів акумуляторних батарей, що в перерахунку на час експлуатації становитиме:

$$9,4\ \text{шт.} \cdot 1600\ \text{год.} \approx 15040\,\text{год.} = 1,71\ \text{р.} \tag{2.27}$$

Отже, термін окупності портативної печі з термогенераторами типу TEC1-12709 становитиме понад 15 тис.год. або 1,71 року.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Основні параметри та конструктивні елементи термоелектричних модулів

3.1.1 Конструктивні характеристики термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3

Термоелектричний генераторний модуль (рис. 3.1) – це просторова система, яка складається з окремих термопарних елементів. Елементи з'єднані у електричне коло послідовно або послідовно-паралельно, а по тепловому потоку – паралельно.

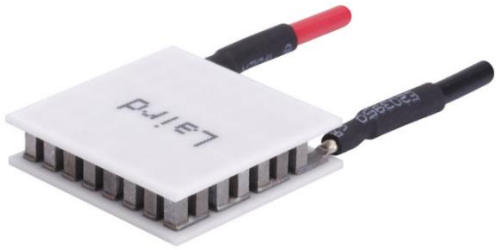


Рис. 3.1 - Загальний вигляд термоелектричного генераторного модуля

На рис. 3.2 наведено метод послідовного з'єднання термоелементів модуля.

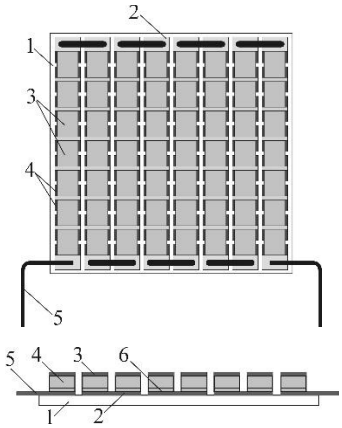


Рис. 3.2 - Елементи термоелектричного генераторного модуля:

1 – керамічна пластина; 2 – комутаційна пластина на холодній стороні модуля; 3 – комутаційна пластина на гарячій стороні модуля; 4 – вітки n- та p-типу; 5 – електричні виводи; 6 – антидифузійний шар.

В класичному генераторі (модулі) термопари розміщені між двома плоскими пластинами які виготовлені з оксиду або нітриду алюмінію рис.3.3.

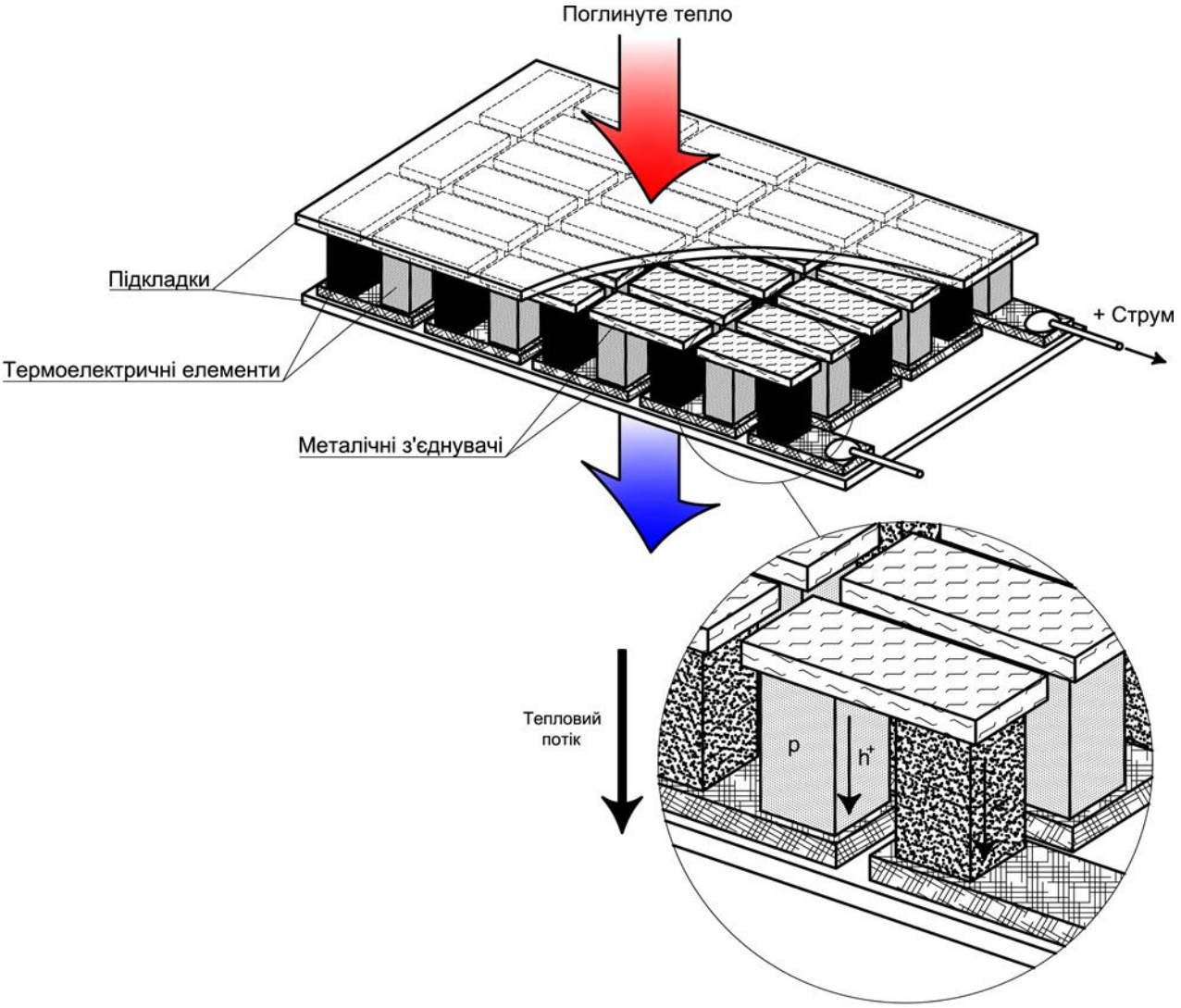


Рис. 3.3 - Конструкція термоелектричного модуля з послідовно з’єднаними термопарними термоелементами

Комутація віток здійснюється або паянням або гальванічним методом (на гарячій стороні – як описано в першому розділі).

Особливу увагу слід приділити проблемам надійності та деградації термоелектричних модулів. Як було показано вище (рис. 1.8), за умови неперервної роботи при температурах гарячої сторони 573 К електрична потужність модулів поступово зменшується.

Таке зменшення спостерігається у модулях з різною комутацією. У випадку використання мідних дротяних елементів падіння потужності, а відпо-

відно і ККД прискорюється внаслідок дифузії міді у термоелектричний матеріал. У випадку чисто нікелевої комутації падіння потужності менше, однак в цілому деградація модулів за таких умов все таки відбувається. Головний чинник цього – окислювальні та випаровувальні процеси, що протікають під дією високих температур та газових складових навколишнього середовища. Це призводить до підвищення комутаційного опору і, як наслідок, до погіршення енергетичних характеристик модуля.

Одним з ефективних методів підвищення надійності термоелектричних модулів є їх герметизація. Найбільш простий метод герметизації – це нанесення тонкого шару еластичного компаунда (смола, силіконовий герметик) на зовнішні поверхні периферійних термоелементів, розташованих між двома теплопровідними керамічними пластинами модуля.

Інший варіант герметизації передбачає використання ущільнюючого елемента (гумова манжета), який розташований по периметру модуля і затискається між двома теплопровідними металевими пластинами (холодна і гаряча) механічним способом. Наведені вище методи використовуються переважно для герметизації модулів, зокрема холодильних.

Герметизація модулів фірми «Hi-Z» та «Біапос» здійснюється у контейнерах стільникової структури з термостійкого ізоляційного матеріалу. Термоелементи з матеріалу на основі Bi_2Te_3 запресовують у спеціальну термостійку стільникову матрицю одночасно з комутаційними елементами. Таким чином отримують монолітний модуль, де усі проміжки між термоелементами заповнені термостійким ізоляційним матеріалом, який захищає термоелектричний матеріал від впливу навколишнього середовища. Однак такий метод не забезпечує повного захисту матеріалу термоелементів та контактних з’єднань від впливу навколишнього середовища, оскільки повітря все таки проникає по мікротріщинах, які утворюються внаслідок різних коефіцієнтів термічного розширення матеріалів.

Герметизація модулів виробництва «Global Thermoelectric», «TES» здійснюється у металевому корпусі, який складається з двох частин. Одна

частина являє собою холодний радіатор, а інша – гарячий радіатор або стінка камери згоряння. Обидві частини, між якими розташований термоелектричний модуль, з'єднуються по периметру методом зварювання. Тобто термоелектричний перетворювач генератора (модуль, батарея), гарячий та холодний радіатори – це єдиний блок. Така конструкція не мобільна: у випадку виходу з ладу декількох термоелементів, заміні підлягає весь блок.

Один з найбільш ефективних методів підвищення надійності модулів – це їх герметизація. За таких умов суттєво зменшується вплив навколишнього середовища, сповільнюються процеси деградації модулів, зумовлені окиснювальними та випаровувальними процесами, які протікають при робочих температурах модуля. За таких умов герметизований модуль – це окрема одиниця, яка може використовуватись, як самостійно, так і для створення генераторів різної потужності шляхом набору необхідної кількості модулів.

Зрозуміло, що частина тепла, яка перетікає від гарячої до холодної сторони модуля по металевому герметичному корпусу, буде зменшувати ефективність генераторного модуля. Тому важливо визначити, які втрати можуть мати місце за умови використання металевих герметичних корпусів і яким чином вони можуть бути зменшені.

Фізична модель, за якою проведено розрахунок втрат тепла у герметичному модулі, наведена на рис. 3.4.

Фізична модель містить: джерело тепла 1; металевий корпус 2; багатошарову структуру 3 на гарячій стороні модуля (теплопереходи, електроізоляцію, комутацію); термоелектричний матеріал 4; багатошарову структуру 5 на холодній стороні та холодний радіатор 6. Внутрішній об'єм металевого корпусу заповнений ксеноном.

Система рівнянь теплового балансу для наведеної фізичної моделі :

$$Q_1 = Q_2 + Q_5 + Q_6,$$
$$Q_2 = P + Q_3 + Q_i^{\Gamma} + Q_8,$$
$$Q_3 = Q_4 + Q_i^{X},$$

де Q_1 – загальний тепловий потік, який надходить до модуля від джерела тепла; Q_2 – тепловий потік, що надходить до термоелементів; Q_3 – тепловий

потік, що надходить від термоелементів до холодної частини металевого корпусу; Q_4 – тепловий потік, що надходить до холодного теплообмінника.

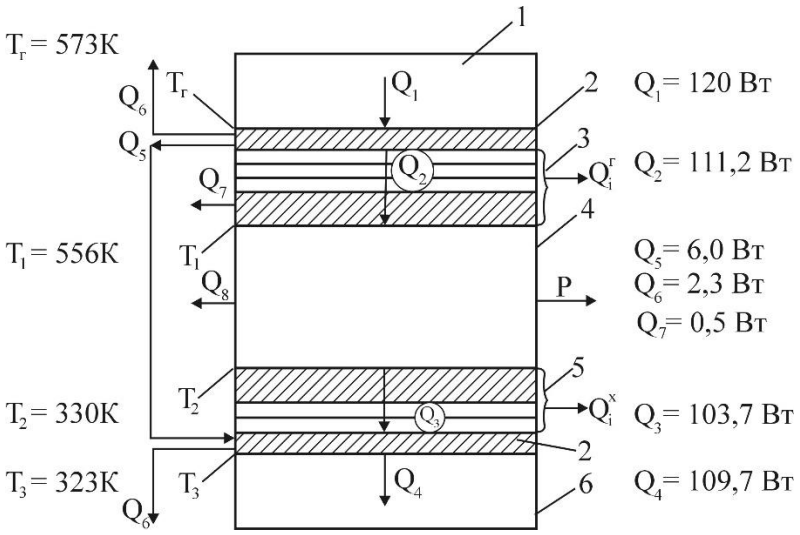


Рис 3.4 - Фізична модель однокаскадного герметизованого модуля:

1 – джерело тепла; 2 – стінка герметичного корпусу; 3 – багатошарова структура гарячої сторони модуля; 4 – термоелектричний матеріал; 5 – багатошарова структура холодної сторони модуля; 6 – холодний радіатор.

Втрати тепла в модулі: Q_5 – внаслідок перетікання по стінках металевого корпусу; Q_6 – з поверхні корпусу у навколишнє середовище шляхом випромінювання та конвекції; Q_7 – внаслідок теплопровідності ксенону; Q_8 – від бічних поверхонь термоелементів шляхом теплопровідності та випромінювання; $Q_i^Г$ Q_i^X – випромінюванням та конвекцією від кожного шару багатошарової структури.

Аналіз чинників теплових втрат показав:

1. Втрати тепла Q_i від кожного теплопровідного шару у навколишнє середовище (випромінюванням, конвекцією) несуттєві (0,0001- 0,004 %) і ними можна нехтувати.

2. Оскільки розподіл температури внутрішнього середовища корпусу буде таким, як розподіл температури всіх елементів конструкції, то втрати тепла від кожного з них будуть дорівнювати нулю.

3. Головні втрати тепла у модулі:

– втрати Q_5 внаслідок перетікання тепла по металевому корпусу – 6 Вт,

– втрати тепла в навколишнє середовище з поверхні металевого корпусу – 2,3 Вт,

– втрати внаслідок теплопередачі у ксеноні – 0,5 Вт.

Конструкція герметизованого модуля для ТЕГ наведена на рис. 3.5.

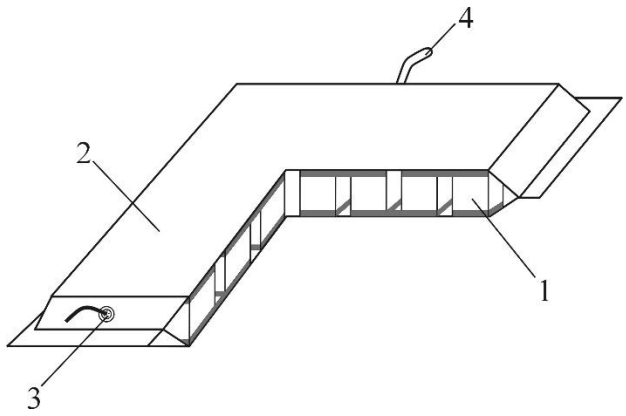


Рис. 3.5 - Конструкція герметизованого термоелектричного модуля:

1-термоелектричні елементи; 2-герметичний корпус; 3- електричний вивід; 4- трубка для відкачування повітря

Термоелектричний модуль 1 розташований у тонкостінному корпусі 2, який складається з двох частин, виготовлених методом штампування. На холодній частині корпусу розміщені герметичні електричні виводи 3 і штенгель 4 для відкачування повітря та заповнення корпусу інертним газом. Дві частини герметичного корпусу, між якими встановлено модуль, поміщуються в спеціальну оснастку і зварюються по периметру методом безприсадочного мікроплазменного зварювання за режимами наведеними у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Режими зварювання герметичних корпусів термоелектричних модулів

Матеріал корпусу	Товщина металу, мм	I, А	Тривалість імпульсу, с	Швидкість зварювання, мм/с	Витрата аргону, л/хв	
					V для плазми	V для захисту
10Х18Н10Т	0,1	2,78	0,02	3,0	0,2	2,2
	0,18	3,63	0,02	2,5	0,2	2,5
34 НК	0,09	2,50	0,02	3,0	0,18	2,0

Заповнення об’єму герметичного корпусу інертним газом проведено з врахуванням робочої температури модуля та об’ємного розширення інертного газу. Тобто, враховано, що коефіцієнт дифузії термоелектричного матеріалу у газ обернено пропорційний тиску. При цьому підвищений тиск інертного газового середовища не призводить до виникнення додаткових теплових втрат, оскільки теплопровідність газу не залежить від тиску (за виключенням дуже високих тисків ~ 2000 атм і дуже малих тисків ~0,03 атм). Залежність величини залишкового тиску інертного газу у геметизованому корпусі від робочої температури гарячої сторони модуля наведена на рис. 3.6.

Базові модулі мають розмір 40х40. На основі базових модулів 40х40 створено ряд модулів потужністю від ~5 Вт. Базові та створені на їх основі інші варіанти модулів використано для створення термоелектричних батарей генераторів різної потужності.

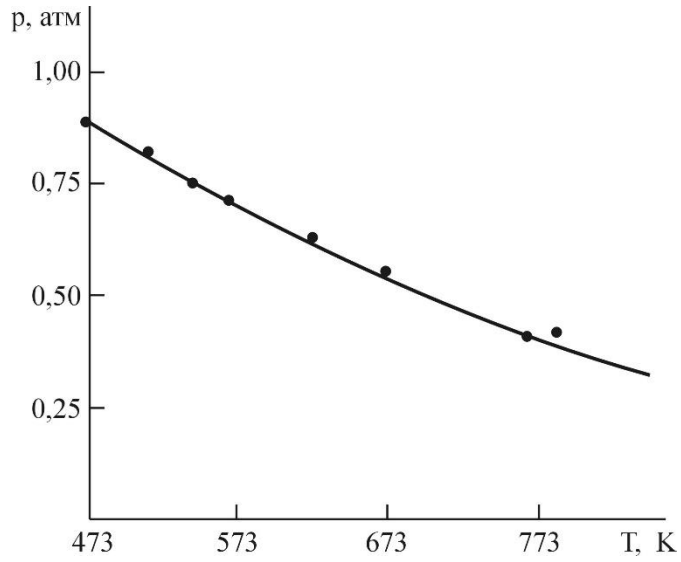


Рис. 3.6 - Залежність величини залишкового тиску інертного газу у герметичному корпусі від температури гарячої сторони модуля

Отже, використанням наведених вище методів (сповільнення процесів окиснення та випаровування термоелектричного матеріалу, мінімізація внутрішніх напруг дифузійних та комутаційних шарів, резервування у модулях) суттєво збільшено ресурсну та циклічну стійкість модулів на основі Bi_2Te_3, їх надійність за умови довготривалої роботи.

Підвищення надійності термоелектричного модуля може здійснюватися двома шляхами: внаслідок підвищення надійності їх конструктивних елементів-складових частин (віток термоелементів, теплопереходів, контактних з'єднань і т. ін.), а також використанням резервування найменш надійних елементів.

3.1.2 Основні параметри термоелектричних модулів на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3

В таблиці 3.2 наведені основні параметри генераторних модулів, що знайшли найбільше застосування в промисловості. Параметри приведені для максимально допустимої робочої температури гарячої сторони 200 °С і температури холодної сторони 100 °С - температури кипіння води, яка часто застосовується для стабілізації температури холодного спаю.

Таблиця 3.2 - Основні параметри термоелектричних модулів

Тип	Геометричні розміри, мм			R, Ом	R 22°C, Ом	R_t К/Вт	U, В	I, А	P, Вт	
	A	B	H							
Тхол.спаю = 50 °С, Тгар.спаю = 150 °С										
ТГМ-127-1,0-0,8	30	30	3,1	2,41	1,18	1,4	1,83	0,76	1,38	2,3
ТГМ-127-1,0-1,3	30	30	3,6	3,92	1,92	2,27	2,18	0,56	1,21	2,7
ТГМ-127-1,0-2,5	30	30	4,3	7,53	3,69	4,36	2,55	0,34	0,86	3,2
ТГМ-127-1,4-1,5	40	40	3,9	2,46	1,21	1,43	2,25	0,91	2,05	2,8
ТГМ-127-1,4-2,5	40	40	4,8	3,84	1,88	2,23	2,5	0,65	1,63	3,2
ТГМ-199-1,4-0,8	40	40	3,2	1,93	0,94	0,45	2,19	1,14	2,49	1,8
ТГМ-199-1,4-1,2	40	40	3,6	2,89	1,42	0,68	2,69	0,93	2,5	2,2
ТГМ-199-1,4-1,5	40	40	3,9	3,85	1,89	0,91	3,03	0,79	2,39	2,4
ТГМ-287-1,0-1,3	40	40	3,6	8,85	3,84	1,00	4,54	0,51	2,33	2,5
ТГМ-287-1,0-1,5	40	40	3,8	10,2	4,72	1,16	4,77	0,47	2,23	2,7
ТГМ-287-1,0-2,5	40	40	4,8	17	7,38	1,93	5,49	0,32	1,77	3,1

Продовження таблиці 3.2

Тхол.спаю = 100 °С, Тгар.спаю = 200 °С										
ТГМ-127-1,0-0,8	30	30	3,1	2,51	1,18	1,36	1,73	0,69	1,19	2
ТГМ-127-1,0-1,3	30	30	3,6	4,07	1,92	2,21	2,07	0,51	1,05	2,4
ТГМ-127-1,0-2,5	30	30	4,3	7,84	3,69	4,26	2,43	0,31	0,75	2,8
ТГМ-127-1,4-1,5	40	40	3,9	2,56	1,21	1,39	2,13	0,83	1,78	2,4
ТГМ-127-1,4-2,5	40	40	4,8	4	1,88	2,17	2,38	0,6	1,42	2,7
ТГМ-199-1,4-0,8	40	40	3,2	2	0,94	0,44	2,07	1,03	2,14	1,5
ТГМ-199-1,4-1,2	40	40	3,6	3,01	1,42	0,67	2,55	0,85	2,16	1,9
ТГМ-199-1,4-1,5	40	40	3,9	4,01	1,89	0,89	2,88	0,72	2,06	2,1
ТГМ-287-1,0-1,3	40	40	3,6	9,21	3,84	0,98	4,3	0,47	2,01	2,2
ТГМ-287-1,0-1,5	40	40	3,8	10,6	4,72	1,13	4,52	0,43	1,93	2,3
ТГМ-287-1,0-2,5	40	40	4,8	17,7	7,38	1,88	5,22	0,29	1,54	2,6

3.2 Експериментальні дослідження характеристик термоелектричних модулів

Для проведення експериментального дослідження були використані два термоелектричні модулі з максимальною робочою температурою до 150 °С типу TEC-12706 і TEC-12709 і номінальною потужністю 72 і 108 Вт відповідно. TEC означає англійською Thermoelectric Cooler – термоелектричний охолоджувач.

Для випробувань був створений стенд, який складається з алюмінієвої пластини з двома нагрівачами і охолоджуючого комп'ютерного кулера. Між ними встановлюється ТЕГ підключений до активного навантаження. Активне навантаження - це резистор з обмеженим струмом незалежно від прикладеної напруги.

Повністю зібраний стенд для експериментальних досліджень наведено на рис.3.7.

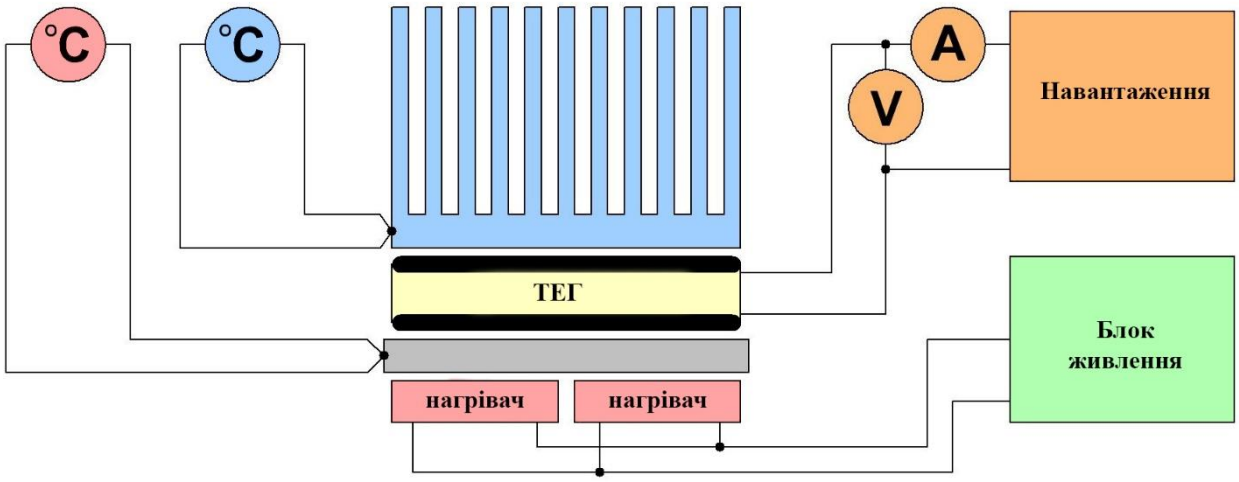


Рис. 3.7 - Схема експериментального стенду для дослідження характеристик термоелектричного модуля.

Результати експериментальних досліджень термоелементів TEC1-12706 і TEC1-12709 зведено у таблиці 3.3 і 3.4.

Таблиця 3.3 - Результати дослідження ТЕГ типу TEC1-12706

Потужність нагріву, Вт	Струм на ТЕГ, А	Напруга на ТЕГ, В	Потужність ТЕГ, Вт	ККД,%	ΔТ, ° С
45,2	0,134	1,94	0,26	0,567	60
	0,253	1,57	0,397	0,879	62
	0,501	0,67	0,336	0,744	63
	0,603	0,26	0,157	0,348	62
63,8	0,135	2,61	0,352	0,551	78
	0,253	2,41	0,61	0,956	83
	0,503	1,55	0,78	1,222	85
	0,798	0,35	0,279	0,437	85
99,9	0,134	3,88	0,52	0,521	108
	0,254	3,48	0,884	0,885	121
	0,499	2,45	1,223	1,224	126
	0,907	0,4	0,363	0,363	126

За допомогою вольтметра і амперметра можна виміряти параметри електричного струму, що виробляється ТЕГ, в тому числі і потужність. Температуру вимірювали за допомогою термопар, підключених до мультиметра. Для цього в основі радіатора і в нагреваючій пластині були просвердлені по одному поздовжньому отвору, діаметром 2 мм і глибиною близько 10 ... 15 мм. Отвори заповнювалися термопастою КПТ-8, в яких

встановлювались термопари. В процесі проведення досліду ми подавали напругу на нагрівачі, вмикаючи при цьому активне навантаження, вольтметр, амперметр і термометри. Регулюючи напругу блоку живлення, виставляли певну потужність нагріву гарячої сторони ТЕГ.

Джерелом тепла служили два нагрівальних елемента ЕО-04. Блок живлення, що живить ці нагрівачі має амперметр і вольтметр.

Таблиця 3.4 - Результати дослідження ТЕГ типу TEC1-12709

Потужність нагріву, Вт	Струм на ТЕГ, А	Напруга на ТЕГ, В	Потужність ТЕГ, Вт	ККД,%	ΔТ, ° С
61,9	0,135	2,05	0,277	0,448	58
	0,25	1,76	0,44	0,711	56
	0,5	1,1	0,55	0,889	50
	0,904	0,47	0,425	0,687	53
80,9	0,136	2,7	0,367	0,454	76
	0,254	2,39	0,607	0,751	73
	0,495	1,78	0,881	1,09	70
	1,076	0,55	0,592	0,732	66
99,0	0,134	3,26	0,437	0,441	92
	0,259	2,94	0,761	0,769	89
	0,516	2,2	1,135	1,147	83
	1,243	0,73	0,907	0,916	82

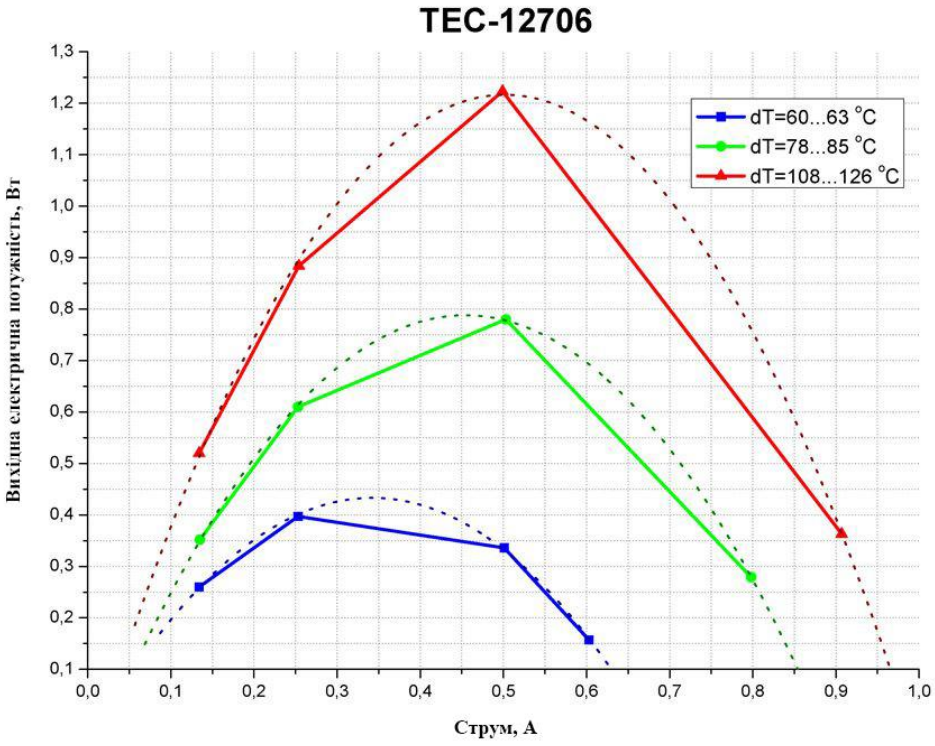


Рис. 3.8 - Графік залежності потужності від струму для TEC-12706

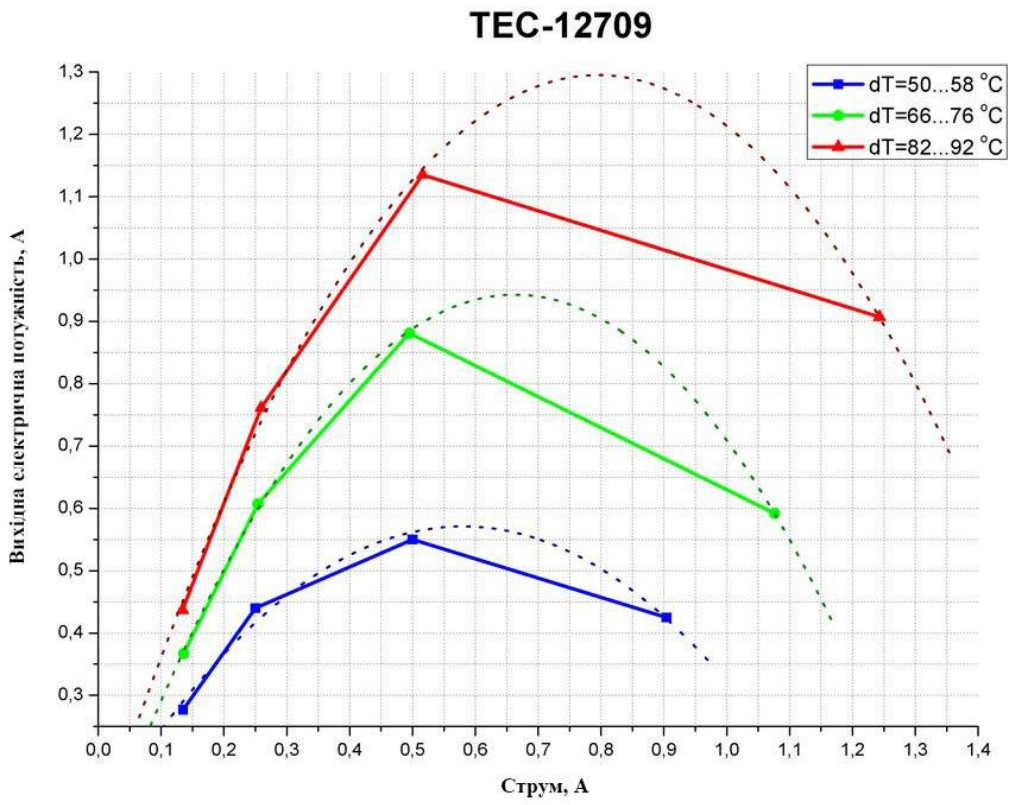


Рис. 3.9 - Графік залежності потужності від струму для TEC-12709

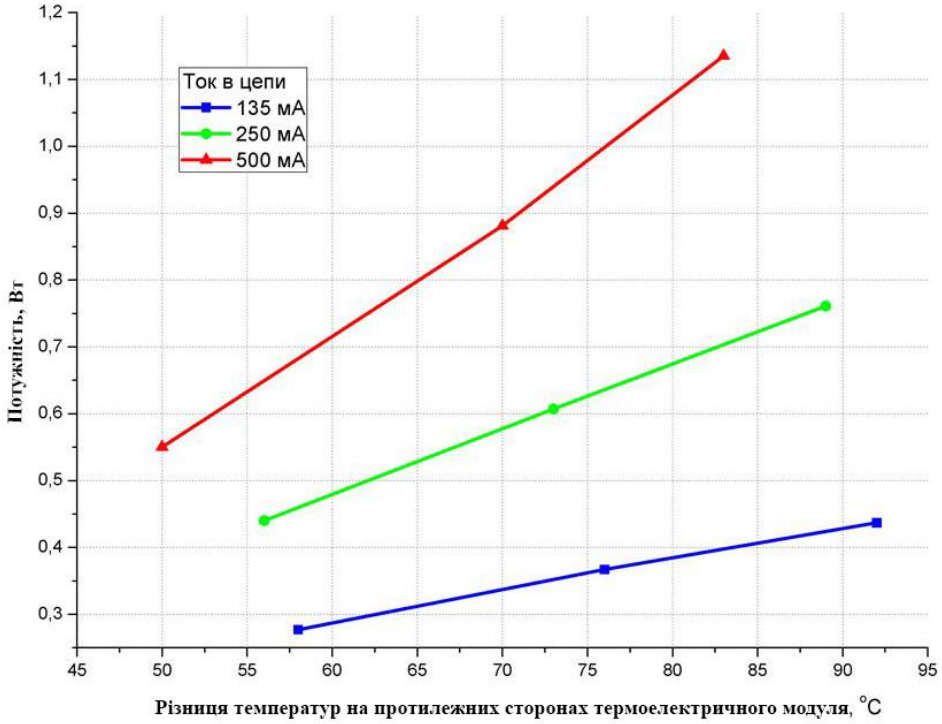


Рис. 3.10 - Графік залежності потужності ТЕГ від різниці температур його сторін та струму в колі

Із графіка 3.10 залежність потужності ТЕГ від різниці температур видно, що із збільшенням різниці температур від 50 до 93 °С потужність буде зростати до 1,1 Вт.

Як вже згадувалось раніше вентилятор та радіатор всередині блоку живлення становлять холодну сторону отже використання активного охолодження забезпечить вище значення різниці температур тим самим підвищить ККД ТЕГ.

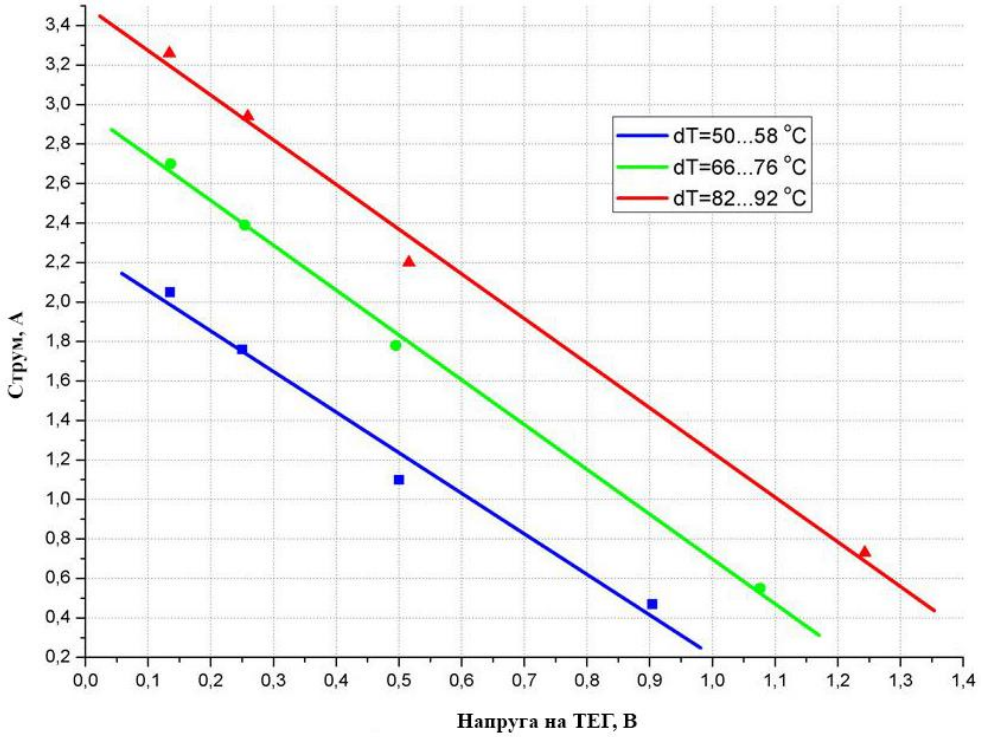


Рис. 3.11 - Воль-амперна характеристика TEC-12709

3.3 Ефективні схеми застосування термоелектричних модулів

3.3.1 Будова та принцип роботи генератора тепла та електрики

У літературі практично відсутні публікації робіт, у яких комплексно досліджувались би термоелектричні системи теплової і електричної енергії з врахуванням раціональних конструктивних рішень, функціонального призначення, у тому числі за умов автономного використання. Разом з цим,

когенераційні технології мають широке практичне використання. Комбіноване виробництво теплової і електричної енергії збільшує коефіцієнт корисного використання теплотворної здатності палива до 90 %, собівартість виробництва електроенергії понижується при цьому у 2-2,5 рази [284].

У зв'язку з цим перспективний варіант термоелектричного генератора з водяним охолодженням. Такий генератор має меншу вартість, істотно менші габарити і вагу порівняно з генераторами відомих компаній (TES, Біапос, Global Thermoelectric).

Тепло, відведене від генератора охолоджуючою водою, може використовуватися для обігрівання у зимовий час різних житлових або побутових приміщень, а електрична енергія для живлення пристроїв побутового призначення, радіо- і телеапаратури, освітлення дач, котеджів, теплиць, ангарів і т.д.

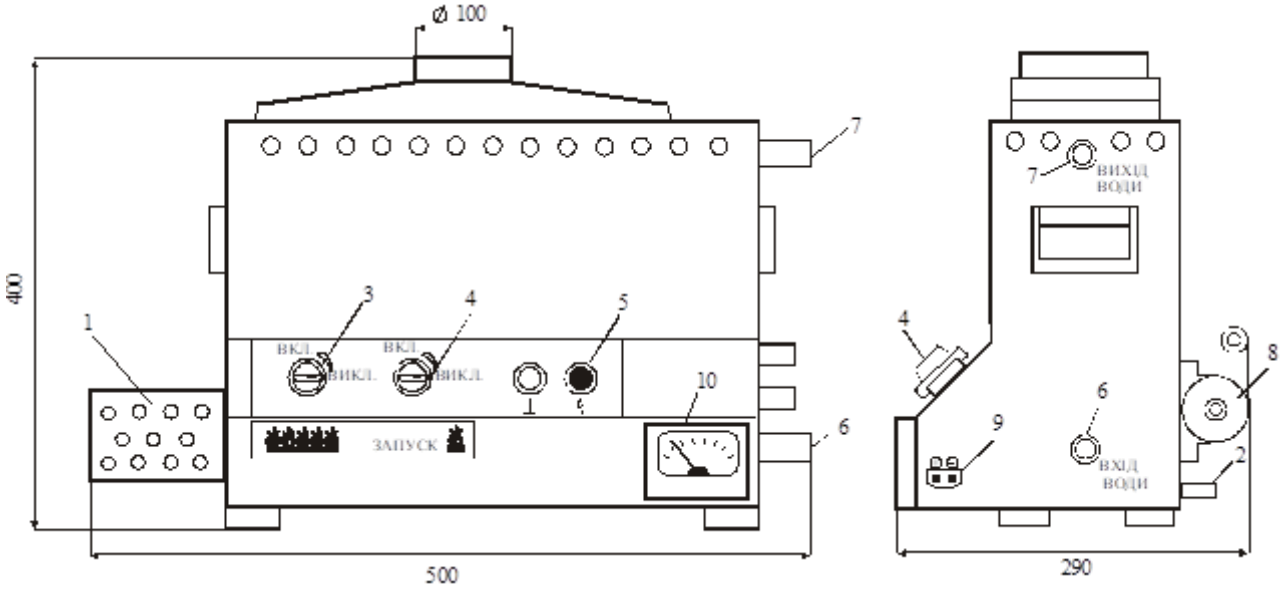


Рис. 3.12. Схема термоелектричного генератора Алтек-8030:

1 – джерело тепла; 2 – штуцер для приєднання газу; 3 – вентиль головного джерела тепла; 4 – вентиль пускового джерела тепла;

Генератор Алтек-8030 (рис.3.12) містить кілька основних частин: джерело тепла, термоелектричну батарею, колектор тепла гарячої сторони і систему відведення тепла. Термоелектрична батарея містить 24 стандартних модулі Altec-1061, з'єднаних послідовно-паралельно для отримання вихідної напруги у межах 13-14 В. Для мінімізації впливу навколишнього середовища і зниження

втрат тепла термоелектричні модулі поміщені у герметичні контейнери з нержавіючої сталі. Об’єм контейнера заповнений інертним газом.

За джерело тепла використано полум'яний пальник 1 інжекторного типу. Подача газу до пальника здійснюється за допомогою штуцера 2 і вентиля 3, яким можна також регулювати витрату газового палива. Вентиль 4 призначений для подачі газу до пускового пальника невеликої потужності, який запалюється п’єзозапалом 5.

Система відведення тепла містить індивідуальні для кожного модуля водяні теплообмінники, об'єднані в один гідравлічний контур, який має вхідний і вихідний патрубки для подачі води. Теплообмінники мають канали для протікання води, геометричні розміри і конфігурація яких забезпечують необхідний ступінь турбулізації рідини для досягнення оптимальних значень теплопередачі.

Система відведення тепла містить також панель, що розсіює тепло (у даному випадку стандартні водяні радіатори типу ROUND), вхід і вихід якої приєднаний до гідравлічного контуру термогенератора. Циркуляція води у системі панель – водяний контур генератора здійснюється за допомогою електричного циркуляційного насоса 8, який живиться від генератора.

Зовнішній вигляд термогенератора з радіаторами опалення наведено на рис. 3.13.

Дослідження характеристик генератора теплової та електричної енергії показали задовільну кореляцію розрахункових та експериментальних результатів. Результати експериментального дослідження характеристик ТЕГ наведені на рис.3.14.

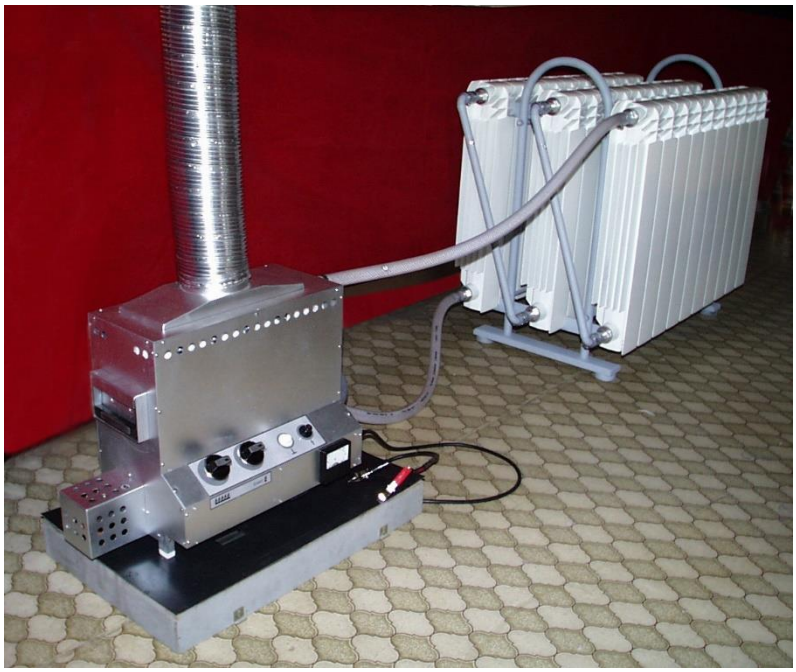


Рис. 3.13 - Зовнішній вигляд генератора теплової та електричної енергії Алтек-8030

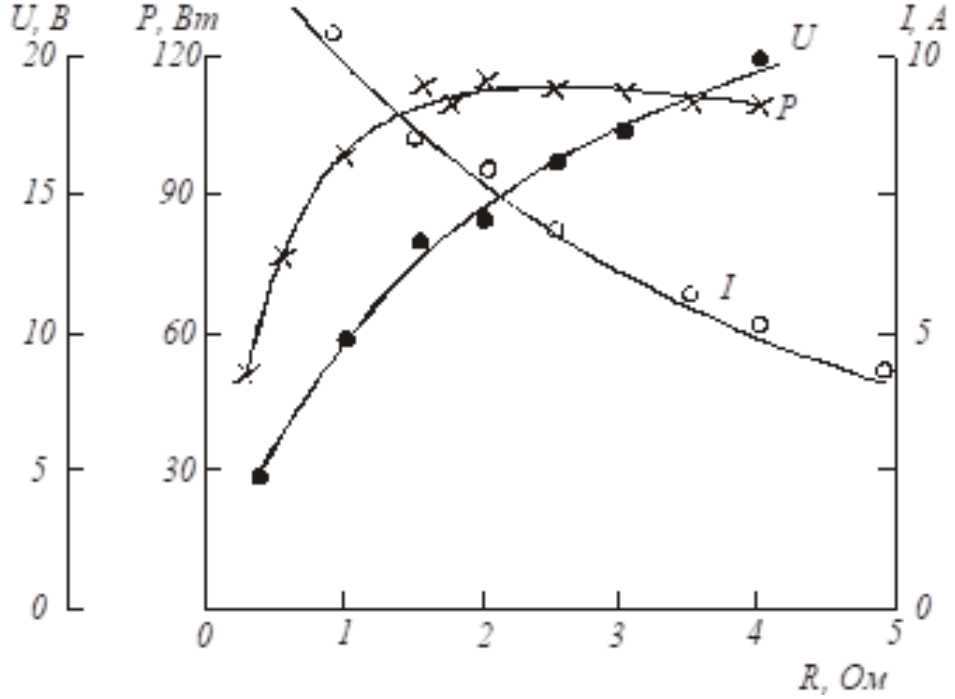


Рис. 3.14 - Електрична потужність (P), напруга (U) і сила струму (I) термогенератора залежно від опору зовнішнього навантаження $T_Г$ = 548 К; T_X = 335 К.

Максимальна вихідна електрична потужність генератора тепла та електрики – 105 Вт, напруга – 13,6 В. Середня температура води у радіаторах опалення 335

К, витрата пропан-бутану – 273 г/год. На основі отриманих результатів визначені питомі характеристики термогенератора, які наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Порівняльні характеристики термоелектричних генераторів різних компаній світу

Модель (розроблювач)	Електрична потужність, Вт	Вартість ТЕГ, $	Питома вартість, $/Вт	Питома електрична потужність, Вт/кг
TELAN-90 (TES)	90	–	–	1,04
1120 5120 (Global Thermoelectric)	100 108	9190 6229	91,9 57,6	0,78 1,77
КАТЕГ-90/24 (НПП «Біапос»)	90	4000	44,4	1,2
ГТГ-150Н (ТОВ «ПОЗІТ», «Термосол-Рус»)	150	–	–	1,15
Алтек -8030 (ІТЕ НАНУ)	100	1860	18,6	2,2*

*Параметр приведений з врахуванням масових характеристик панелі, що розсіює тепло.

Отже, реалізація розглянутої конструкції показала задовільну кореляцію розрахункових та експериментальних результатів. У порівнянні з відомими термоелектричними генераторами характеристики створеного генератора суттєво покращені: питома електрична потужність термогенератора збільшена у середньому у 2 рази, а питома вартість зменшена у 2,5 рази.

3.3.2 Будова та принцип роботи портативної печі з термоелектричним модулем

Можливість вироблення електричної енергії портативними пристроями може серйозно покращити якість життя у віддалених від електромережі регіонах, а також стати рятівним джерелом енергії під час катаклізмів і стихійних лих. На сьогоднішній день відомо багато різних варіантів, які успішно використовують вітер, сонце і воду для живлення портативної електроніки. Однак є й інший спосіб вироблення електрики – термоелектричний генератор, що збирає теплову енергію, яка зазвичай просто викидається в повітря.

На рисунку 3.15 показаний зовнішній вигляд портативної печі.

Рис. 3.15 - Портативна піч з термоелектричним модулем

1 - блок живлення з вбудованою акумуляторною батареєю та вентилятором; 2 - LED індикатори; 3 - порт USB; 4 - камера згорання з точною системою повітряного потоку; 5 - алюмінієві ніжки; 6 - тепловий екран із сітки; 7 - комфорка

Портативна піч, яка показана на рис.3.16, має три основні елементи: камеру згорання, точну систему повітряного потоку та термоелектричний генератор і здатна використовувати частину тепла, що виділяється при приготуванні їжі щоб отримувати додаткову електричну енергію для підзарядки гаджетів, освітлення та ін.

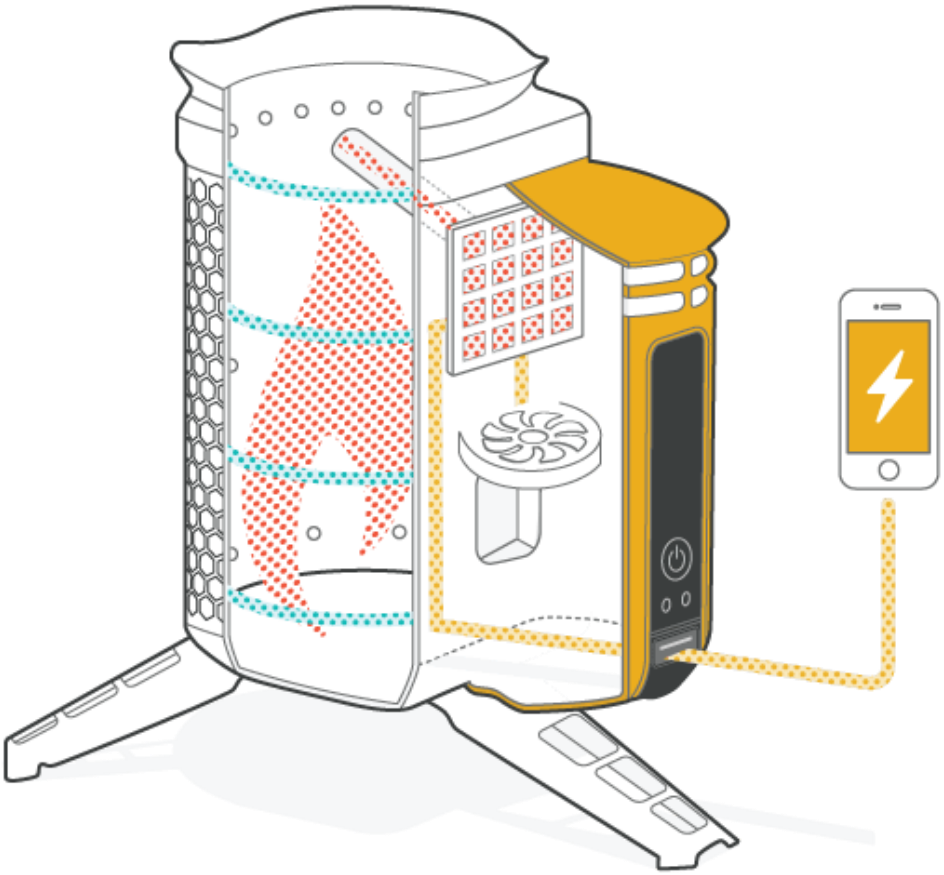


Рис. 3.16 - Застосування портативної печі з ТЕГ для підзарядки гаджетів

В камеру згорання можна закинути різноманітну біомасу таку як сухі дерев’яні гілки, пелети або соснові шишки. В печі заборонено використовувати рідке паливо. Для нормального горіння в камеру згорання потрібно завантажувати невелику кількість твердого палива, щоб не блокувати повітряні потоки в середині камери, я показано на рис.3.17.

Коли піч достатньо розігрілась, вмикається система подачі повітря, яка через 51 отвір, розташованих всередині камери, затягує в неї необхідну кількість кисню, що забезпечує повне згорання палива. Система подачі повітря складається з вентилятора рис.3.18 і автоматичної системи регулювання обертами вентилятора.

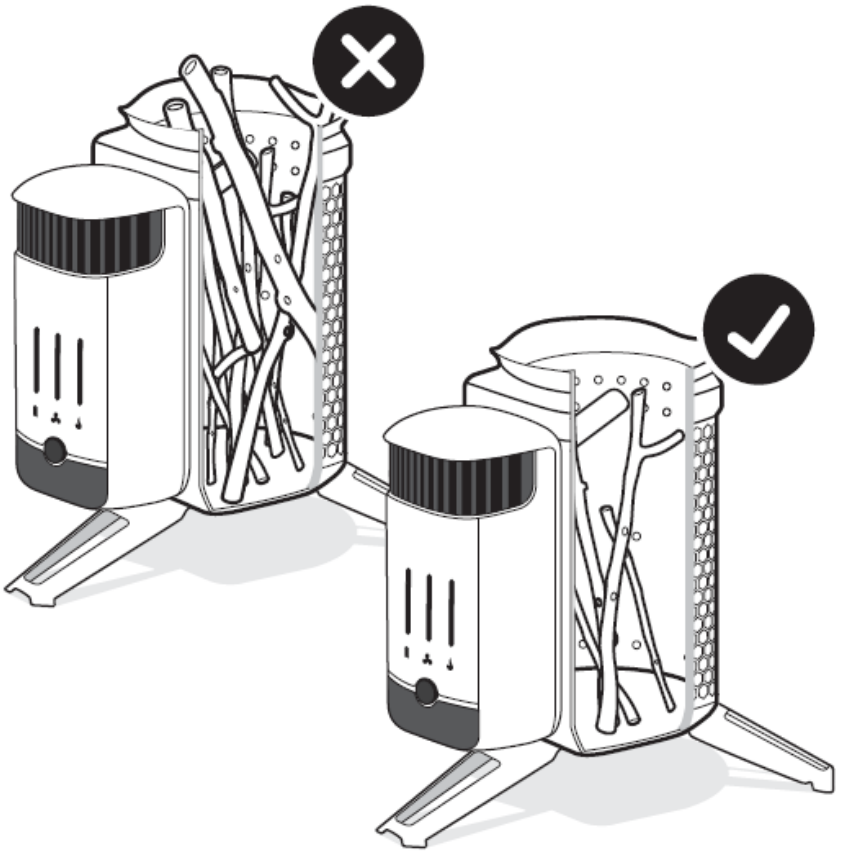


Рис. 3.17 - Кількість твердого палива в камері згорання

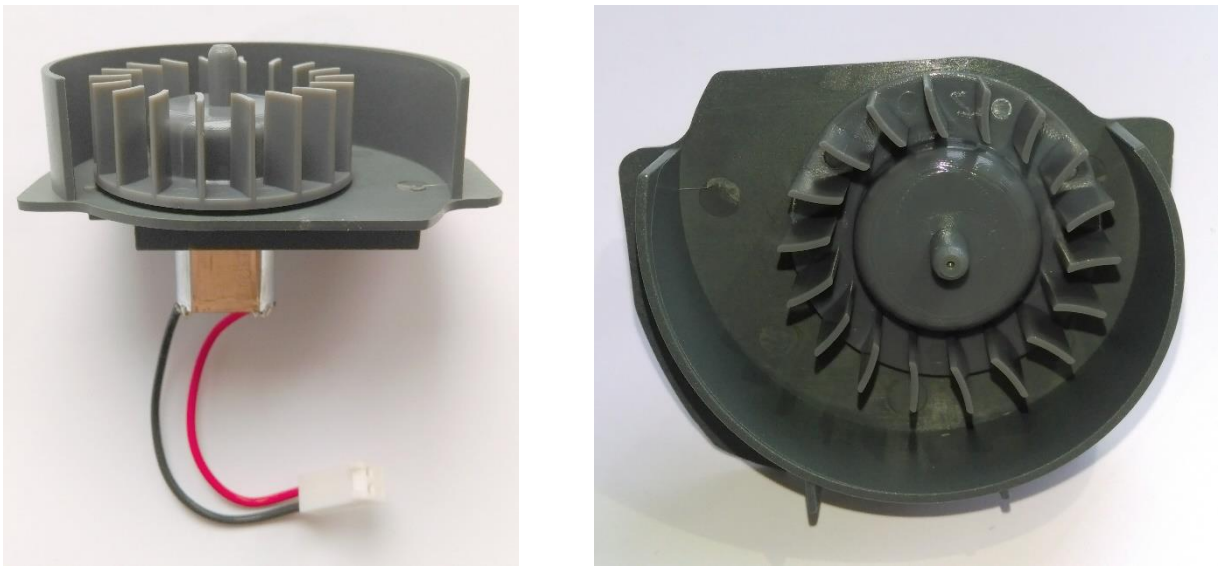


Рис. 3.18 - Вентилятор системи подачі повітря в камеру згорання

Принцип роботи печі грунтується на допалюванні, незгорівших через нестачу кисню, часток твердого палива. Таких в диму міститься до 95%. Введення в димову масу додаткового об'єму кисню, за рахунок нагнітання

повітря вентилятором, викликає їх повне згорання. Таким чином ККД електронаддувом печі збільшується і складає до 80%.

Повітря через блок нагнітання (вентилятор) потрапляє в отвір в нижній частині зовнішньої стінки печі, рис.3.19. Під дією вентилятора одна частина повітря нагнітається в отвори дна камери згорання, а друга спрямовується вгору, де прогріваючись виходить через спеціальні отвори і потрапляє у верхню частину камери згорання печі. Насичення повітрям верхньої частини печі і викликає догорання не згорілих часток палива.

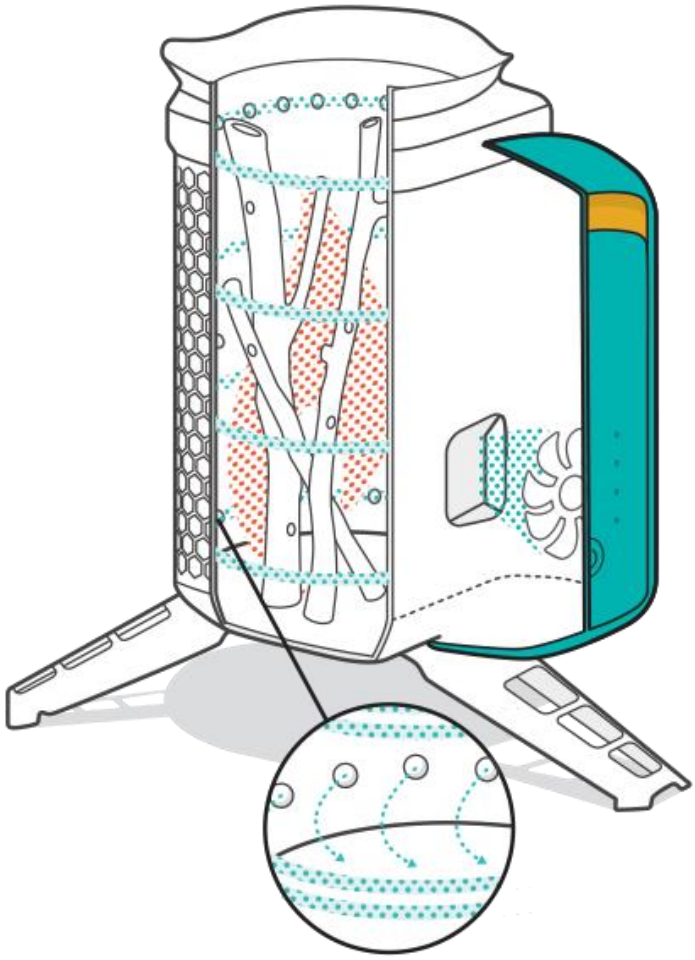


Рис. 3.19 - Нагнітання повітря в камеру згорання

Чим більше повітря затягується вентилятором, тим сильніше буде горіти вогонь, тим вищою буде вихідна потужність, рис.3.20.

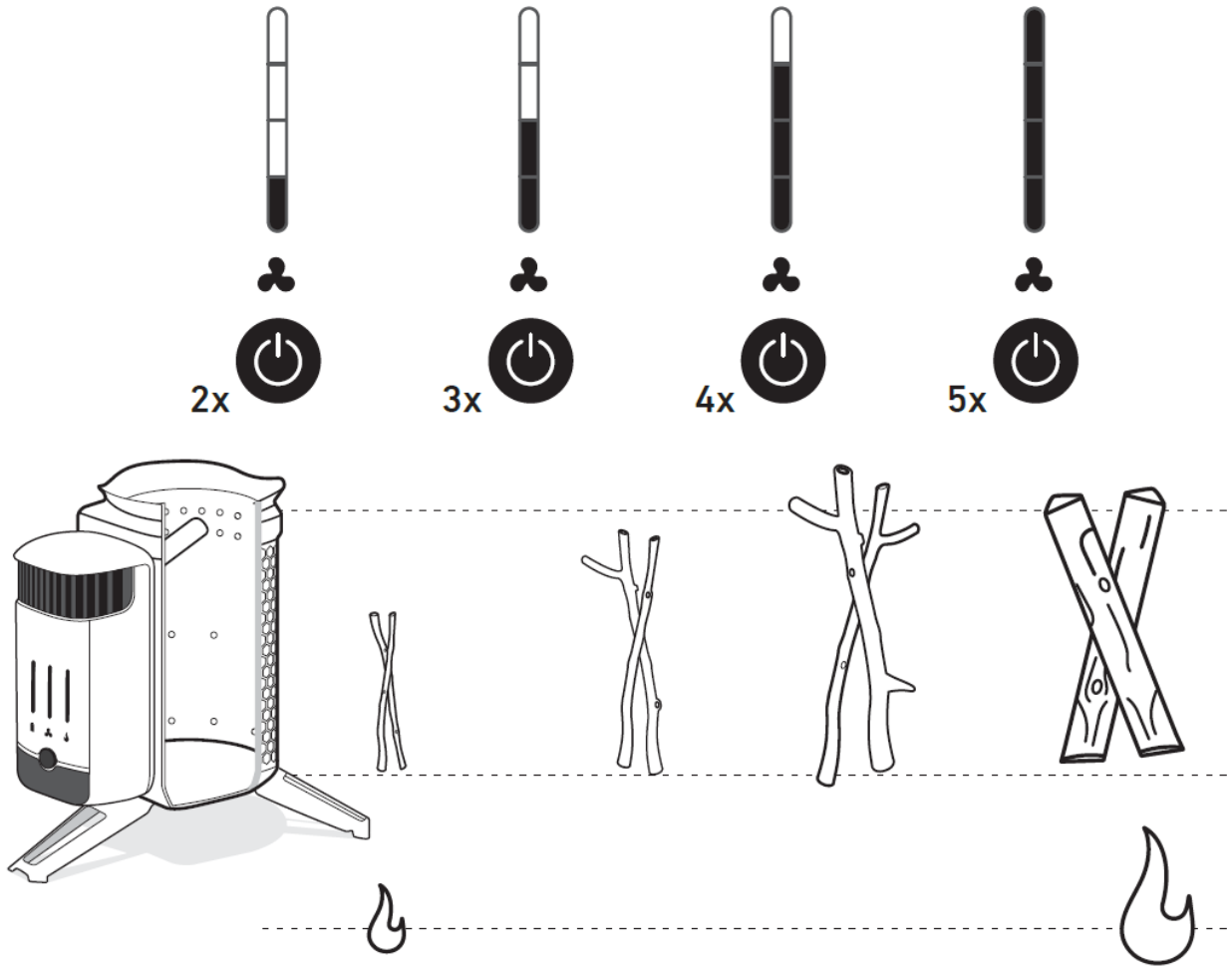


Рис. 3.20 - Схема інтенсивності горіння полум’я в камері згорання в залежності від швидкості обертання вентилятора та кількості палива

Робота ТЕГ грунтується на ефекті Зеєбека. Ефект ґрунтується на різниці температур, що означає, що термогенератор потребує як гарячої, так і холодної сторони.

Алюмінієвий зонд, що розміщений всередині камери згорання є гарячою стороною ТЕГ, рис.3.21.

Вентилятор та радіатор всередині блоку живлення становлять холодну сторону. Чим сильніше горить вогонь і чим тепліша гаряча сторона ТЕГ, тим більше електрики генерується.

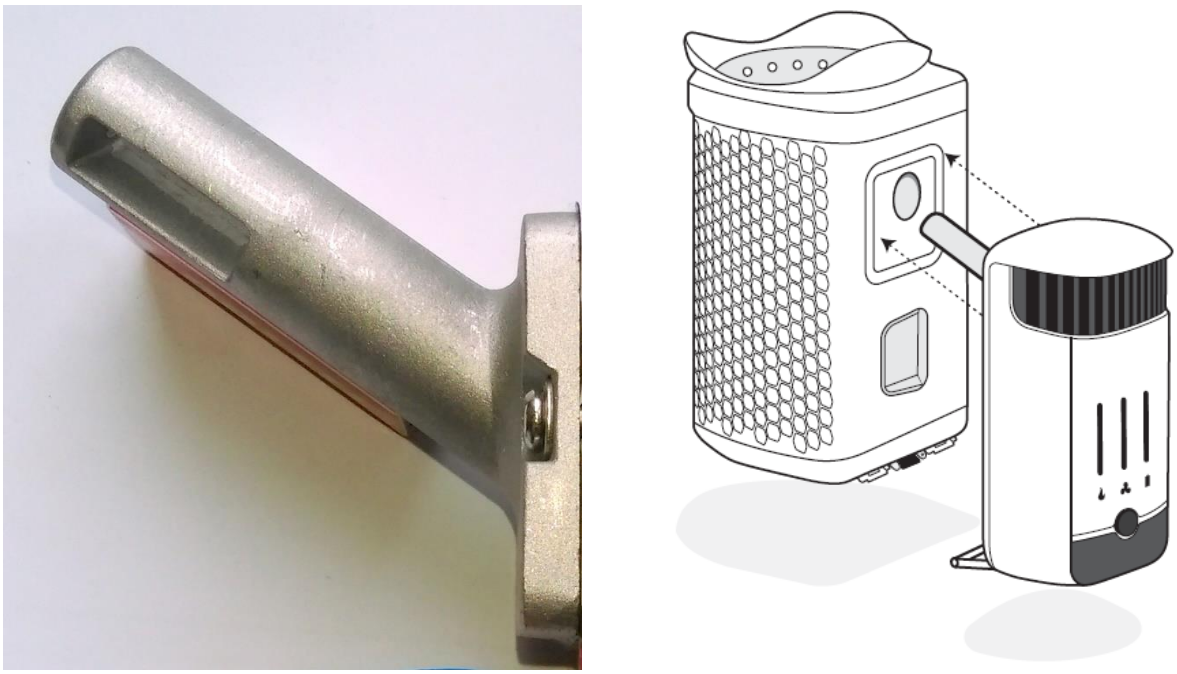


Рис. 3.21 - Гаряча сторона ТЕГ (алюмінієвий зонд який вставляють в всередину камери згорання)

Вся система разом працює наступним чином: згенерована електрика живить систему подачі повітря, вона запускає вентилятор - який забезпечує циркуляцію потоку повітря в самій камері і дозволяє використати енергію полум’я в максимальній мірі.

Завдяки вогню піч виробляє 3 Вт потужності, достатньої для зарядки телефонів, освітлювальних приладів, камер тощо.

Надлишок електроенергії зберігається в акумуляторній батареї. Ми можете заряджати пристрої через USB в режимі реального часу, коли потрібно, навіть коли вогонь не горить рис. 3.22.

Як ми вже знаємо в середині камери згорання відбувається багато процесів - тому всю необхідну інформацію про роботу системи відображає світлодіодна індикаторна панель рис. 3.23.

Помаранчеві діоди відображають силу вогню. Енергія, доступна для зарядки, представлена зеленими світлодіодами.

Рис. 3.22 - Вихід USB розташований внизу блоку живлення

Рис. 3.23 - Загальний вигляд світлодіодної індикаторної панелі розташованої на блоці живлення

Вентилятор має чотири швидкості, які відображаються чотирма синіми діодами посередині.

Чим більше повітря затягується вентилятором, тим сильніший вогонь, тим вища вихідна потужність.

Підвищений потік повітря, поліпшений процес горіння та термоелектричний генератор - ось завдяки чому перетворюється вогонь на енергію, яку ми можемо застосувати для приготувати їжі і зарядки свого електрообладнання.

Для того щоб була певна стабільна напруга і пристрої заряджалися безпечно, потрібен підвищуючий стабілізатор рис. 3.24.

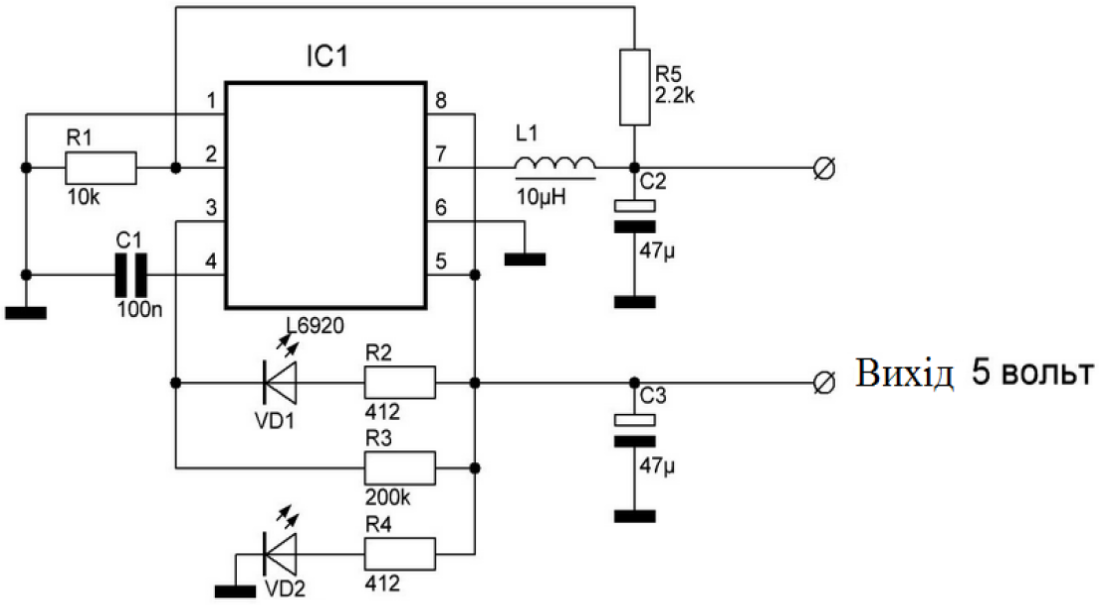


Рис. 3.24 - Принципова схема підвищуючого стабілізатора.

На виході підвищуючого стабілізатора буде стабільна напруга в 5 вольт, що дасть можливість заряджати всі мобільні та інші пристрої через USB вихід. оскільки він є універсальним, або з допомогою перехідника. На виході USB порта в залежності від інтенсивності горіння полум'я ми отримаємо (0,36 – 0,43) А при сталій напрузі 4,8 В. Також в процесі горіння при підключеному телефоні з акумуляторною батареєю 1560 мА·год, за 30 хвилин відбувається зарядка на (10 – 14) %.

3.4 Висновки до розділу 3

1. На основі графіків проведених досліджень встановлено, що максимальне значення потужності модуля TEC1-12709 становить 1,15 Вт при силі струму 0,55 А для різниці температур 90°С, а для модуля TEC1-12706 при такій же різниці температур становить 0,78 Вт і силі струму 0,5 А. Отже при використанні модуля TEC 1-12709 ефективність термоелектричного генератора збільшиться в 1,5 рази у порівнянні TEC1-12706.

2. Розглянуто конструкцію термоелектричного генератора з водяним охолодженням. Такий генератор у порівнянні з відомими термоелектричними генераторами суттєво покращені характеристики: питома електрична потужність термогенератора збільшена у середньому у 2 рази, а питома вартість зменшена у 2,5 рази.

3. Розглянуто конструкцію термоелектричного генератора для живлення портативних переносних пристроїв. Застосування ТЕГ в таких пристроях дає змогу ефективно використовувати теплову енергію портативної печі, перетворюючи її безпосередньо в електроенергію. Так, для термоелектричних модулів TEC1-12709 можна отримати близько 3 Вт електричної енергії, яку можна використати для зарядки різноманітних пристроїв.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Правила техніки безпеки при експлуатації обладнання, що проектується

Робота щодо забезпечення безпечної експлуатації ЕУ здійснюється згідно з обов'язковими, для всіх споживачів електроенергії, незалежно від їх відомчої приналежності, правилами технічної експлуатації ЕУ споживачів та правилами техніки безпеки при експлуатації ЕУ споживачів. Обслуговування діючих ЕУ, проведення в них оперативних переключень, організація та виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і випробувань здійснюються спеціально підготовленим електротехнічним персоналом.

Роботи в діючих ЕУ з врахуванням заходів безпеки поділяються на виконувані: зі зняттям напруги, без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них, без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою. До робіт, виконуваних зі зняттям напруги, відносяться роботи, котрі виконуються в ЕУ, в котрій зі всіх струмоведучих частин знята напруга. До робіт, виконуваних без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них, відносяться роботи, котрі проводяться безпосередньо на цих частинах.

Роботою без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, вважається робота, при котрій виключається випадкове наближення працюючих людей та використовуваного ними ремонтного обладнання і інструменту до струмоведучих частин на віддаль менше встановленої і не вимагається вживання технічних або організаційних заходів (безперервного нагляду) для запобігання такому наближенню. При виконанні робіт зі зняттям напруги та без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них повинні виконуватись організаційні та технічні заходи.

До організаційних заходів відносяться:

1) оформлення роботи по наряду-допуску, розпорядженню або за переліком робіт, виконуваних в порядку поточної експлуатації;

2) допуск до роботи;

3) нагляд під час роботи;

4) оформлення перерви під час роботи;

5) переводи на інше робоче місце.

Наряд-допуск - це завдання на безпечне виконання роботи, оформлене на спеціальному бланку встановленої форми. Він визначає зміст, місце виконання роботи, час її початку та закінчення, умови її безпечного виконання, склад бригади та осіб, відповідальних за безпечне виконання роботи. Відповідальними за безпечне виконання робіт є: особа, що видала наряд; котра дає розпорядження; особа, що допускає до роботи; керівник роботи; виконавець роботи; спостережник; член бригади.

Всі роботи, котрі виконуються в ЕУ без наряду, виконуються:

1) за розпорядженням осіб, уповноважених на це, з оформленням в оперативному журналі;

2) в порядку поточної експлуатації з подальшим записом в оперативному журналі.

Розпорядження - це завдання на виконання роботи, що визначає її зміст, місце, час, заходи безпеки. Воно має разовий характер, видається на один вид роботи і діє протягом однієї зміни.

За розпорядженням можуть виконуватись:

а) позапланові роботи, викликані виробничою необхідністю, тривалістю до 1 год.;

б) роботи без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою, тривалістю не більше однієї зміни;

в) роботи зі зняттям напруги з електроустановок напругою до 1000 В тривалістю не більше однієї зміни.

Поточна експлуатація - це проведення оперативним персоналом самостійно на закріпленій за ним ділянці протягом однієї зміни робіт за спеціальним переліком.

До організаційних заходів в цьому випадку відноситься складання,

відповідальним за електрогосподарство, переліку робіт стосовно конкретних умов.

До технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт, виконуваних зі зняттям напруги, відносяться:

1) необхідні вимкнення та вжиття заходів, котрі запобігають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового або довільного ввімкнення комутаційної апаратури;

2) вивішування на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комунікаційної апаратури (автомати, рубильники, вимикачі) забороняючих плакатів;

3) перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах;

4) накладання заземлення;

5) вивішування попереджувальних та припису вальних плакатів, огородження, при необхідності, робочих місць та струмоведучих частин, які залишились під напругою.

При експлуатації системи дорожньої сигналізації основною небезпекою є ураження електричним струмом. Для створення умов безпеки потрібно виконувати викладені вище правила техніки безпеки.

4.2 Електробезпека

Протікання струму через тіло людини супроводжуєтсья термічним, електролітичним та біологічним ефектами.

Термічна дія струму – полягає в нагріванні тканини, випаровуванні вологи, що викликає опіки, обвуглювання тканин та їх розриви парою. Тяжкість термічної дії струму залежить від величини струму, опору проходження струму та часу проходження. При короткочасній дії струму термічна складова може бути визначаль¬ною в характері і тяжкості ураження.

Електролітична дія – струму проявляється в розкладі органічної сечовини (її електролізі), в тому числі і крові, що призводить до зміни їх фізико-хімічних і

біохімічних властивостей. Останнє, в свою чергу, призводить до порушення біохімічних процесів в тканинах і органах, які є основою забезпечення життєдіяльності організму.

Біологічна дія струму – проявляється у подразненні і збуренні живих тканин організму, в тому числі і на клітинному рівні. При цьому порушуються внутрішні біоелектричні процеси, що протікають в нормально функціонуючому організмі і пов'язані з його життєвими функціями. Збурення, спричинене подразнюючою дією струму, може проявлятися у вигляді мимовільного непередбачуваного скорочення м'язів. Це так звана пряма або безпосередня збурююча дія струму на тканини, по яких він протікає. Разом із цим, збурююча дія струму на тканини може бути і не прямою, а рефлекторною — через центральну нервову систему. Механізм такої дії полягає в тому, що збурення рецепторів (периферійних органів центральної нервової системи) під дією електричного струму передається центральній нервовій системі, яка перероблює цю інформацію і видає команди щодо нормалізації процесів життєдіяльності у відповідних тканинах і органах. При перевантаженні інформацією (збуренням клітин і рецепторів) центральна нервова система може видавати недоцільну, неадекватну інформації виконавчу команду.

Останнє може призвести до серйозних порушень діяльності життєво важливих органів, у тому числі серця та легенів, навіть коли ці органи не лежать на шляху струму.

Крім зазначеного, протікання струму через організм негативно впливає на поле біопотенціалів в організмі. Зовнішній струм, взаємодіючи з біострумами, може порушити нормальний характер дії біострумів на тканини і органи людини, подавити біоструми і тим самим викликати специфічні розлади в організмі.

4.3 Фактори, що впливають на протипожежну стійкість об’єкту

Важливим питанням забезпечення стійкості роботи під час надзвичайних ситуацій є стійкість до світлового випромінювання. Внаслідок дії енергії

світлового імпульсу на підприємстві може виникнути складна пожежна обстановка, оскільки на зберіганні знаходиться значна кількість горючих речовин і обладнання.

Світлове випромінювання ядерного вибуху є електромагнітним випромінюванням в ультрафіолетовій, видимій і інфрачервоній областях спектру.

Джерелом світлового випромінювання є область що світиться (вогняна куля), що складається з розжарених продуктів вибуху і повітря. З цієї області випромінюється величезна кількість променистої енергії в надзвичайно короткий проміжок часу, унаслідок чого відбувається швидкий нагрів опромінюваних предметів, обвуглювання або запалювання горючих матеріалів і опік живих тканин.

На частку світлового випромінювання припадає 30...40 % всієї енергії атомного або термоядерного вибуху. На відкритій місцевості світлове випромінювання має великий радіус дії в порівнянні з ударною хвилею.

Основним параметром, що характеризує вражаючу дію світлового випромінювання, є світловий імпульс ИСВ. Світловий імпульс – це кількість світлової енергії, випадаючої на 1 м2 освітлюваної поверхні, що перпендикулярна до напряму розповсюдження випромінювання, за весь час

дії вибуху (вогняної кулі).

Світловий імпульс в даній точці пропорційний потужності ядерного вибуху і обернено пропорційний квадрату відстані до центру вибуху. На світловий імпульс також впливають вид ядерного вибуху, стан (прозорість) атмосфери і інші чинники.

При наземних вибухах світловий імпульс на поверхні землі при тих же відстанях буде приблизно на 40 % меншим ніж при повітряних вибухах такої ж потужності. Пояснюється це тим, що в горизонтальному напрямі випромінюється не вся поверхня сфери вогняної кулі, а лише половина сфери, хоча і більшого радіусу.

Якщо земна поверхня добре відбиває світло (сніговий покрив, асфальт, бетон і ін.), то сумарний світловий імпульс (прямий і відбитий) при повітряному вибуху може бути більше прямого в 1,5...2 рази.

В атмосфері завжди відбувається ослаблення променистої енергії через розсіювання і поглинання світла частинками пилу, диму, краплями вологи (туман, дощ, сніг). Ступінь прозорості атмосфери прийнято оцінювати коефіцієнтом К, що характеризує ступінь ослаблення світлового потоку. Вважається, що в великих промислових містах ступінь прозорості атмосфери можна характеризувати видимістю в 10...20 км; в приміських районах - 30...40 км, а в районах сільської місцевості, де ступінь забруднення повітря найменший, видимість досягає 60...80 км.

Світлове випромінювання, падаючи на об'єкт, частково поглинається, частково відбивається, а якщо об'єкт пропускає випромінювання, то частково проходить крізь нього. Скло, наприклад, пропускає більше 90 % енергії світлового випромінювання.

Ступінь ураження будь-якого матеріалу під дією світлового випромінювання при одному і тому ж світловому імпульсі залежить від коефіцієнта поглинання, фізичних властивостей (густини, теплоємності, теплопровідності), товщини матеріалу і інших чинників. Матеріали темного кольору більше поглинають світлове випромінювання, ніж світлі, а тому ушкоджуються швидше. Предмети, забарвлені чорною фарбою, поглинають близько 96 % світлового випромінювання, а білою -18 %.

Чим більша потужність ядерного вибуху, тим більший світловий імпульс потрібен для запалювання одного і того ж матеріалу. Це пояснюється тим, що при великій потужності вибуху опромінювання світлом матеріалу триває довше. За цей час частина тепла втрачається за рахунок проникнення з поверхні в глибину матеріалу в результаті його теплопровідності.

Дія світлового випромінювання ядерного вибуху на будівлі і споруди об'єктів народного господарства виявляється у виникненні загорянь і пожеж, що

викликають руйнування і знищення матеріальних цінностей, у ряді випадків перевершуючі по масштабах руйнування від ударної хвилі.

За оцінкою фахівців пожежної служби мінімальним розрахунковим світловим імпульсом, що викликає загоряння і пожежі, може бути імпульс в 100... 150 кДж/м2, при якому відбувається запалювання горючих матеріалів (сіна, соломи, стружки, обривків газетного паперу, сухого сміття і інших легкозаймистих речовин). Тому скупчення займистого сміття поблизу будівель – реальна загроза виникнення пожежі.

На промислових підприємствах можуть утворюватися окремі або суцільні пожежі. Окрема пожежа виникає в окремій будівлі або споруді. Суцільна пожежа характеризується тим, що всі або більшість будівель і споруд підприємства, що займають значну площу, охоплені вогнем.

Середня кількість спалахів від світлового імпульсу, що припадає на одиницю площі забудови, за інших однакових умов залежить від протипожежної готовності об’єкту. При добрій протипожежній підготовці об'єкту кількість пожеж може бути значно понижена, а для деяких виробництв зведена до нуля. Ця задача може бути успішно вирішена при обліку конкретних умов і основних чинників, що впливають на виникнення і розповсюдження пожеж на об’єкті.

На виникнення і розповсюдження пожеж впливають, головним чином, такі чинники: вогнестійкість будівель і споруд; пожежна небезпека виробництва; густина забудови; метеорологічні умови і ін.

Вогнестійкість будівель і споруд визначається займистістю їх елементів і межами вогнестійкості основних конструкцій (частин) будівель і споруд.

Займистість того або іншого елемента будівлі визначається займистістю будівельних матеріалів, з яких він виконаний. Всі будівельні матеріали по займистості діляться на три групи: не згораючі, важкоспалимі, згораючі.

Межа вогнестійкості будівельної конструкції – це період часу в годинах від початку дії вогню на конструкцію до утворення в ній наскрізних тріщин або до досягнення температури 200 °С на поверхні, протилежній дії вогню, або до втрати конструкцією несучої здатності (обвалення).

ВИСНОВКИ

1. Аналіз основних шляхів підвищення ефективності термоелектричних модулі дозволив виявити основні напрямки їх подальшого розвитку, серед яких першочерговим є підвищення ККД.

2. На основі графіків проведених досліджень встановлено, що максимальне значення потужності модуля TEC1-12709 становить 1,15 Вт при силі струму 0,55 А для різниці температур 90°С, а для модуля TEC1-12706 при такій же різниці температур становить 0,78 Вт і силі струму 0,5 А. Отже при використанні модуля TEC 1-12709 ефективність термоелектричного генератора збільшиться в 1,5 рази у порівнянні TEC1-12706.

3. Розглянуто конструкцію термоелектричного генератора з водяним охолодженням. Такий генератор у порівнянні з відомими термоелектричними генераторами суттєво покращені характеристики: питома електрична потужність термогенератора збільшена у середньому у 2 рази, а питома вартість зменшена у 2,5 рази.

4. Розглянуто конструкцію термоелектричного генератора для живлення портативних переносних пристроїв. Застосування ТЕГ в таких пристроях дає змогу ефективно використовувати теплову енергію портативної печі, перетворюючи її безпосередньо в електроенергію. Так, для термоелектричних модулів TEC1-12709 можна отримати близько 3 Вт електричної енергії, яку можна використати для зарядки різноманітних пристроїв.

5. Розрахунок ефективності використання термоелектричних модулів показав, що термін окупності термогенератора типу TEC1-12709 в порівнянні з еквівалентним блоком акумуляторних батарей становить 1,71 року (1 рік 8 місяців).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Марченко, О. В. Методы расчета термоэлектрических генераторов / О. В. Марченко, А. П. Кашин, В. И. Лозбин, М. З. Максимов. Новосибирск : Наука, 1995. 222 с.

2. Шевельков, А. В. Химические аспекты создания термоэлектрических материалов / А. В. Шевельков // Успехи химии. 2008. Т. 77, № 1. С. 3-21.

3. Иоффе, А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы / А. Ф. Иоффе. М. : Изд-во АН СССР, 1956. 158 с.

4 . Дмитриев, А. В. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов / А. В. Дмитриев, И. П. Звягин // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 8. С. 821-837.

5. Бурштейн, А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств / А. И. Бурштейн. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 135 с.

6. Коробейников, И. В. Термоэлектрические свойства твердых растворов при высоком давлении / И. В. Коробейников, Л. Н. Лукьянова, Г. В. Воронцов [и др.] // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, № 2. С. 263-269.

7 . Поздняков, Б. С. Термоэлектрическая энергетика / Б. С. Поздняков, Е. А. Коптелов. М. : Атомиздат, 1974. 263 с.

8. Охотин, А. С. Термоэлектрические генераторы / А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин, А. С. Пушкарский. М. : Атомиздат, 1971. 288 с.

9. Анатычук, Л. И. Термоэлектрические генераторы на жидком и газообразном топливе. Современное состояние и перспективы / Л. И. Анатычук, В. Я. Михайловский // Термоэлектричество. 2007. № 4. С. 9-25 .

10. Симкин, А. В. Повышение надежности термоэлектрических генераторных батарей собранных с применением коммутации методом плазменно-дугового напыления / А. В. Симкин, А. В. Бирюков, Н. И. Репников, О. Н. Иванов // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 134-138.

11. Гольцман, Б. М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе B12Te3 / Б. М. Гольцман, В. А. Кудинов, И. А. Смирнов. М. : Наука, 1972. 320 с.

12. Симкин, А. В. Испытание на надежность генераторных термоэлектрических батарей, изготовленных с применением метода плазменно-дугового напыления / А. В. Симкин, А. В. Бирюков, Н. И. Репников, О. Н. Иванов // Термоэлектричество. 2013. № 3. С. 93-102.

13. Бирюков, А. В. Преимущества использования электроэрозионной резки и газоплазменного напыления при коммутации термоэлементов на основе экструдированного теллурида висмута / А. В. Бирюков, Н. И. Репников, О. Н. Иванов, А. В. Симкин // Термоэлектричество. 2011. № 3. С. 36-42.

14. Симкин, А. В. Влияние состояния контактной поверхности на адгезионную прочность коммутационных слоев термоэлементов на основе экструдирован-ного теллурида висмута / А. В. Симкин, А. В. Бирюков, Н. И. Репников, О. Н. Иванов // Термоэлектричество. 2012. № 2. С. 13-19.

15. Штерн, Ю. И. Исследование электрофизических свойств и определение механизмов тепло- и электропроводности в термоэлектрических материалах на основе B12Te3 / Ю. И. Штерн // Материалы электрон. техники. 2008. № 2. С. 73-77.

16. Охотин, А. С. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей / А. С. Охотин, А. С. Пушкарский, Р. П. Боровикова, В. А. Симонов. М. : Наука, 1974. 167 с.

17. Лукишер, Э. М. Термоэлектрические охладители / Э. М. Лукишер, А. Л. Вайнер, М. Н. Сомкин, В. Ю. Водолагин. М. : Радио и связь, 1983. 177 с.

18. Прокофьева, Л. В. Оптимальный состав твердого раствора для n-ветви термогенератора / Л. В. Прокофьева, Д. А. Пшенай-Северин, П. П. Константинов, А. А. Шабалдин // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 8. С. 1009-1012.

19. Копыл, А. И. Термоэлектрические свойства легированного свинцом материала с избытком теллура / А. И. Копыл, И. И. Павлович, И. С. Термена // Термоэлектричество. 2007. № 1. С. 38-43.

20. Вихор, Л. Н. Компьютерное проектирование термоэлектрических генераторных модулей / Л. Н. Вихор // Термоэлектричество. 2005. № 2. С. 62-70.

21. Лукьянова, Л. Н. Термоэлектрическая эффективность в твердых растворах p-типа на основе халькогенидов висмута и сурьмы при температурах выше комнатной / Л. Н. Лукьянова, В. А. Кутасов, П. П. Константинов, В.В. Попов. // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 8. С. 1492-1497.

22. Лукьянова, Л. Н. Влияние анизотропии рассеяния носителей заряда на термоэлектрические свойства твердых растворов / Л. Н. Лукьянова, В. А. Кутасов, П. П. Константинов, В. В. Попов // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 4. С. 577-582.

23. Овсянников, С. В. Термоэлектрические свойства твердых растворов под давлением / С. В. Овсянников, Ю. А. Григорьева, Г. В. Воронцов [и др.] // Физика твердого тела. 2012. Т. 54, № 2. С. 246-251.

24. Щенников, В. В. Влияние физических и «геометрических» факторов на свойства термоэлектрических материалов / В. В. Щенников, И. В. Коробейников, Н. В. Морозова // Термоэлектричество. 2013. № 6. С. 41-52.

25. Щенников, В. В. Увеличение фактора мощности термоэлектрического элемента с использованием давления / В. В. Щенников, И. В. Коробейников, Г. В. Воронцов // Термоэлектричество. 2013. № 5. С.32-40.

26. Булат, Л. П. О пределе термоэлектрической добротности в объемных нанокристаллических структурах на основе теллурида висмута / Л. П. Булат, Д. А. Пшенай-Северин, В. В. Каратаев [и др] // Термоэлектрики и их применение : докл. XII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2010. С. 41-46.

27 . Булат, Л. П. Энергетическая фильтрация носителей тока в наноструктурированном материале на основе теллурида висмута / Л. П. Булат,

И. А. Драб-кин, В. В. Каратав [и др.] // Физика твердого тела. 2011. Т. 53, № 1. С. 563-568.

28. Булат, Л. П. Влияние туннелирования на термоэлектрическую эффективность объемных на-ноструктурированных материалов / Л. П. Булат, Д. А. Пшенай-Северин // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 3. С. 452-458.

29. Булат, Л. П. Влияние рассеяния на границах на теплопроводность наноструктурированного полупроводникового материала на основе твердого раствора BiiSb2-iTe3 / Л. П. Булат, И. А. Драбкин, В. В. Каратаев [и др.] // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 9. С. 1712-1716.

30. Кульбачинский, В. А. Термоэлектрические свойства нанокомпозитов теллурида висмута с фуллеренами / В. А. Кульбачинский, В. Т. Кытин, В. Д. Бланк [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 9. С. 1241-1245.

31. Абрютин, В. Применение нанотехнологий для создания высокоэффективных термоэлектрических материалов / В. Абрютин, С. Нестеров, В. Ро-манько, А. Холопкин // Наноматериалы. 2010. № 1. С. 24-26.

32. Бублик, В. Т. Объемный наноструктуриро-ванный термоэлектрический материал на основе (Bi,Sb)2Te3, полученный методом искрового плазменного спекания (SPS) / В. Т. Бублик, И. А. Драбкин, В. В. Каратаев [и др.] // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 70-75.

33. Бублик, В. Т. Структура и термоэлектрические свойства объемного материала на основе (Bi,Sb)2Te3, полученного из смеси нано- и микрокомпонентов методом SPS / В. Т. Бублик, И. А. Драбкин, В. Б. Ос-венский [и др.] // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 76-80.

34. Пивоваров, Г. И. Влияние агрегирования на-нопорошков на свойства консолидированных термоэлектрических материалов / Г. И. Пивоваров, В. Д. Бланк, В. Т. Бублик [и др.] // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 94-99.

35. Булат, Л. П. Исследование возможностей увеличения термоэлектрической эффективности в на-ноструктурированных материалах на основе Bi2Te3-Sb2Te3 / Л. П. Булат, В. Б. Освенский, Ю. Н. Пархоменко,

Д. А. Пшенай-Северин // Физика твердого тела. 2012. Т. 54, № 11. С. 2036-2042.

36. Иванова, Л. Д. Термоэлектрические свойства материалов твердого раствора теллуридов висмута и сурьмы в зависимости от режимов спиннингования расплава / Л. Д. Иванова, Л. И. Петрова, Ю. В. Гра-наткина [и др.] // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 60-64.

37. Лаврентьев, М. Г. Теоретическое и экспериментальное исследование формирования структуры термоэлектрического материала на основе твердых растворов (Bi, Sb)2Te3, полученного методом горячей экструзии / М. Г. Лаврентьев, В. Б. Освенский, М. В. Меженный [и др.] // Термоэлектрики и их применение : докл. XIII Межгос. семинара. СПб. : Петерб. ин-т ядер. физики РАН, 2012. С. 94-99.

38. Булат, Л. П. Влияние распределения зерен по размерам на решеточную теплопроводность наноструk-турированных материалов на основе Bi2Te3-Sb2Te3 / Л. П. Булат, В. Б. Освенский, Д. А. Пшенай-Северин // Физика твердого тела. 2013. Т. 55, № 12. С. 2323-2330.

39. Горский, П. В. К вопросу о механизме увеличения термоэлектрической добротности объемных наноструктурированных материалов / П. В. Горский, В. П. Михальченко // Термоэлектричество. 2013. № 5. С. 5-10.

40. Снарский, А. А. Термоэлектрическая добротность объемных наноструктурированных композитов с распределенными параметрами / А. А. Снарский, А. К. Сарычев, И. В. Безсуднов, А. Н. Лагарьков // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 5. С. 677-683.

41. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Том II. Термоэлектрические преобразователи энергии. - Черновцы: Букрек.- 2003, 276 с.- С. 120-121.

42. Буряк А.А., Карпова Н.Б. Очерки развития термоэлектричества.- Киев: Наукова думка.-1988.-280с.

43. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И.Анатычук.- Киев: Наукова думка, 1979.-768с.

44. Позняков Б.С., Коптелов Е.А. Термоэлектрическая энергетика.- М.: Атомиздат, 1974.-263с.

45. Котирло Г.К., Лобунец Ю.Н. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов - Киев: Наукова думка, 1980.-300с.

46. Иорданишвили Е.К. Термоэлектрические источники питания.- М.: Сов.радио, 1968.-183с.

47. Михайловский В.Я., Струтинская Л.Т., Чайковская Е.В. Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2005.-№4 (58).- С. 27-30.

48. Михайловський В.Я., Струтинська Л.Т.. Чайковська О.В. Особливості теплообміну у ТЕГ на органічному паливі // Термоелектрика.- 2006.-№ 2.- С. 77-86.

49. Федінчук Ю.І., Михайловський В.Я., Струтинська Л.Т. Аналіз розподілу температури по поверхні каталітичного пальника в термогенераторах // Термоелектрика.- 2004.-№ 3.- С. 80-87.

50. Михайловський В.Я., Струтинська Л.Т., Чайковська О.В. Математична модель гетерогенного процесу окиснення вуглеводнів С3, С4 на оксидних каталізаторах // Фізика і хімія твердого тіла. - 2005.- Т. 6, № 4. - С. 604-611.

51. Струтинська Л.Т., Михайловський В.Я. Каталізатор для глибокого окиснення газоподібних вуглеводнів. Деклараційний патент № 12131. МКВ B23B19/00, B01J10/00, Опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1, Заявка №200507776 від 05.08.2005.

52. Котырло Г.К. Температурные поля при охлаждении теплоносителя в пористых и перфорированных стенках. - В кн. Теплофизика и теплотехника.- К.: Наукова думка, 1970, вып. 16.- С.140-143.

53. Котырло Г.К., Щеголев Г.М. Тепловые схемы термоэлектрических устройств. - Киев: Наукова думка, 1973. - С. 106.

54. Котырло Г.К., Новицкая И.Ф. Расчет термоэлектрического генератора на продуктах сгорания при внутреннем охлаждении проницаемых термоэлементов // Теплотехнические проблемы прямого преобразования энергии. -1972.- Вып. 2. - С. 123-129.

55. Лобунец Ю.Н. Расчет характеристик генерирующих термоэлементов в схемах с регенерацией тепла // Теплофизика и теплотехника.- 1979.- Вып. 36.- С. 92-96.

56. Черкез Р.Г. Проникні термоелементи з функціонально-градієнтних матеріалів: Дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.01.-Чернівці, 2004.-126 с.

57. Попова Н.М. Катализаторы очистки выхлопных газов автотранспорта. - Алма-Ата: Наука, 1987. - 224с.

58. Каталитические свойства веществ. Справочник / Под ред. В.А. Ройтера - К.: Наукова думка, 1968.- 1462 с.

59. Саттерфилд Ч.П. Практический курс гетерогенного катализа. - М.: Мир, 1984.- 520с.

60. Алхазов Т.Г., Марголис Л.Я. Глубокое каталитическое окисление органических веществ. - М.: Химия, 1985.- 186 с.

61. Яблонский Г.С., Спивак С.И. Математические модели химической кинетики. -М.: Знание, 1977.- 63с.

62. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики.- М.: Высшая школа, 1974. - 400с.

63. Будак Б.М., Самарський А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. -М:. Наука, 1980.-686с.

64. Лавренчук В.П., Івасишен С.Д., Дронь В.С., Готинчан Т.І. Диференціальні рівняння математичної фізики. - Чернівці: Рута, 2002.- 192с.