

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ
НА БАЗІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Ковальчин М.В.
(прізвище та ініціали)

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

Нормоконтроль _____
(підпис) Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Шелестовський Б.Г.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2022

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 67 сторінок, __ аркушів формату А1 (слайдів), 18 ілюстрацій, 4 таблиці та 21 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення теплової енергії у електричну у термоелектричному генераторі

Предмет дослідження – термоелектричний генератор протічного типу.

Метою кваліфікаційної роботи є: на основі аналізу та дослідження процесів у термоелектричних генераторах запропонувати власну конструкцію протічного термоелектричного генератора та провести розрахунок основних його параметрів.

У роботі проаналізовано базові принципи роботи термоелектричного генератора та його будову. Розкрито основні сфери застосування термоелектричних генераторів та можливих джерел скидної теплової енергії. Представлено конструкцію термоелектричного генератора протічного типу. Проведено дослідження процесів у термоелектричному генераторі протічного типу та виконано розрахунок його параметрів в тому числі у ККД. Сформульовано висновки про можливість використання результатів розрахунків.

Ключові слова: ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР, ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ, ККД

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Короткий огляд розвитку термоелектричної техніки	9
1.2 Базові принципи роботи термоелектричного генератора	10
1.3 Будова термоелектричного генератора.....	11
1.4 Коротка характеристика термоелектричних модулів.....	13
1.5 Методи дослідження термоелектричних перетворювачів енергії та пристроїв на їх основі	16
1.6 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Елементи конструкції термоелектричних перетворювачів	19
2.2 Дослідження особливостей та сфер застосування термоелектричних генераторів	24
2.2.1 Космічна сфера.....	24
2.2.2 Прилади електроживлення у віддалених районах.....	24
2.2.3 Природний газ та біомаса.....	26
2.2.4 Людське тіло	27
2.2.5 Утилізація скидного тепла транспортних систем.....	29
2.3 Аналіз принципу роботи термоелектричного генератора проточного типу	30
2.4 Розробка конструкції термоелектричного генератора проточного типу з поздовжніми ребрами	32
2.5 Розробка конструкції термоелектричного генератора проточного типу з поперечними ребрами	34
2.6 Розробка конструкції термоелектричного генератора проточного типу з поперечними ребрами, виконаними сегментарно.....	36
2.7 Висновки до розділу	37

2.4 Висновки до розділу	
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Розрахунок теплообмінника термоелектричного генератора	39
3.1.1 Особливості розрахунку	39
3.1.2 Теплотехнічний розрахунок теплообмінника	39
3.1.3 Гідравлічний розрахунок теплообмінника	46
3.2 Розрахунок генератора електричної енергії	50
3.3 Висновок до розділу	556
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	57
4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	57
4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею.....	58
4.3 Планування заходів цивільного захисту.....	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ВСТУП

Актуальність теми. Для майбутніх поколінь дуже важливо зменшити кількість споживаної енергії у світі, і це може бути досягнуто лише шляхом технологічного розвитку та використання диверсифікованих відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергія, на додаток до джерел енергії, що використовуються зараз [1,2,3,4]. Серед цих різних джерел енергії термоелектрика в даний час стає поширеним і перспективним альтернативним джерелом енергії в майбутньому. Їх використання викликає все більший інтерес, оскільки вони пропонують переваги переробки відпрацьованої енергії. Це означає перетворення тепла від промисловості або автомобільного транспорту в електроенергію, таким чином підвищуючи ефективність системи та зменшуючи експлуатаційні витрати і забруднення навколишнього середовища.

З моменту відкриття термоелектрики в 1821 році Зеєбеком, дослідники намагалися зрозуміти і контролювати це явище. Пельтьє зробив саме це у 1834 році, відкривши протилежний ефект, а лорд Кельвін у 1851 році сформулював закони, які пов'язують ці два явища. У наступному столітті, в 1909 році, Едмунд Альтенкірх вперше правильно розрахував енергетичну ефективність термоелектричного генератора, відому зараз як коефіцієнт корисної дії.

Виробництво електроенергії є важливим питанням для нашого суспільства. Важливою темою є також утилізація відпрацьованого тепла. Саме в цьому контексті термоелектричні генератори (ТЕГ) в даний час набувають все більшого поширення. ТЕГ складаються з набору термоелектричних (ТЕ) модулів, вставлених між двома теплообмінниками. Кожен ТЕ-модуль потім складається з декількох десятків до сотень пар ТЕ-модулів, з'єднаних між собою електрично послідовно і термічно паралельно, які безпосередньо перетворюють частину теплової енергії, що проходить через них, в електричну. Переваги ТЕГ значні:

– це пряме перетворення енергії, на відміну від багатьох теплових двигунів, які спочатку перетворюють теплову енергію в механічну, а потім

перетворюють цю механічну енергію в електричну за допомогою генератора змінного струму;

– відсутність рухомих частин і робочих рідин всередині ТЕГ, а отже, відсутність обслуговування та додаткових витрат; тривалий термін служби, особливо при роботі з постійними джерелами тепла джерелами тепла;

– відсутність ефекту накипу (ТЕГ можна використовувати для мікрогенерації в дуже обмеженому просторі або для виробництва декількох кВт);

– безшумність роботи;

– можливе будь-яке робоче положення, що робить ТЕГ добре придатними для вбудованих систем.

Незважаючи на ці переваги, протягом багатьох років ТЕГ обмежувалися космічним використанням, де їх надзвичайна надійність виправдовувала їх використання для забезпечення електроенергією більшості зондів, відправлених у космос. Низький коефіцієнт корисної дії та висока вартість були бар'єром для їх розвитку для більш поширеного застосування. Тому актуальним є дослідження шляхів підвищення ефективності як самого процесу перетворення теплової енергії у електричну так і процесів теплообміну між джерелом енергії, ТЕ-модулем та охолоджувачем.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: на основі аналізу та дослідження процесів у термоелектричних генераторах запропонувати власну конструкцію протічного термоелектричного генератора та провести розрахунок основних його параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати базові принципи роботи термоелектричного генератора та його будову.
2. Розкрити основні сфери застосування термоелектричних генераторів та можливих джерел скидної теплової енергії.
3. Представити конструкцію термоелектричного генератора протічного типу.

4. Провести дослідження процесів у термоелектричному генераторі проточного типу та виконати розрахунок його параметрів в тому числі у ККД. Зробити висновки про можливість використання результатів розрахунків.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення теплової енергії у електричну у термоелектричному генераторі.

Предмет дослідження – термоелектричний генератор проточного типу.

Наукова новизна отриманих результатів.

Отримало подальший розвиток застосування методики розрахунку рідинних теплообмінних апаратів, в яких протікають холодний і гарячий теплоносії та визначення їх усередненої температури та розрахунок електричних параметрів термоелектричного генератора. Сукупність результатів проведених досліджень дає можливість використовувати їх як наукову основу при створенні нових високоефективних термоелектричних генераторів.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена конструкція термоелектричного генератора проточного типу з поздовжніми та поперечними ребрами радіатора, яка призначена для використання в енергетичному комплексі з метою генерування електроенергії з низькопотенційних джерел теплоти.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 7-8 грудня 2022 року. ТНТУ [1].

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (21 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 67 сторінок, 4 таблиць, 18 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Короткий огляд розвитку термоелектричної техніки

Термоелектричні явища були виявлені та досліджені понад сто років тому Зеєбеком, Пельтьє та Томсоном. Практичне використання напівпровідникових термоелектричних охолоджуючих та нагрівальних пристроїв у промисловості бере свій початок із розробки академіком О.Ф. Іоффе теорії енергетичних застосувань напівпровідникових термоелементів на початку 50-х років нашого сторіччя. Подальший розвиток теорія енергетичного застосування термоелектрики отримала у працях багатьох учених [5].

Нині за термоелектрикою накопичено великий теоретичний та експериментальний матеріал, розроблено та впроваджено величезну кількість різноманітних апаратів, пристроїв та приладів, заснованих на ефекті Пельтьє. Проаналізовано режими роботи термоелектричних пристроїв (ТЕП): з мінімальною температурою холодних спаїв, максимальною холодопродуктивністю, максимальною енергетичною ефективністю, мінімальним струмом та при обмеженні кількості термоелементів [6].

Ряд досліджень присвячений вивченню характеристик термобатарей при роботі в умовах тепло- та масообміну, при використанні їх як інтенсифікатора теплопередачі та утеплювачів. Досліджено питання впливу на роботу та показники термоелектричних пристроїв пульсацій струму, контактних електричних та теплових опорів. Широкі дослідження проведено у сфері впливу теплообміну на енергетичні та інші показники охолоджувачів та нагрівачів, інтенсифікації тепловіддачі. Багато робіт присвячено оптимізації параметрів термоелектричних пристроїв, підвищення ефективності їх використання, раціонального вибору напівпровідникових матеріалів [7]. Великий цикл досліджень проведено з вивчення динамічних характеристик та перехідних процесів у термоелектричних пристроях у нестационарних режимах роботи термоелементів.

Перспективи розвитку, раціональні сфери застосування, нові напрями у використанні термоелектрики знайшли в роботі [8]. Широке практичне застосування та серійне виробництво ТЕП та термобатарей-модулів описано у джерелі [7].

1.2 Базові принципи роботи термоелектричного генератора

Як вже згадувалося, він працює на концепції термоелектричного ефекту Зеєбека. В ефекті Зеєбека між двома кінцями створюється температурний градієнт або різниця температур. Коли створюється температурний градієнт, електрони течуть від одного кінця до іншого. Електрони на високотемпературному кінці будуть на високих енергетичних рівнях. Тому вони починають рухатися до інших кінців [8].

За рахунок руху електронів на двох кінцях створюється різниця потенціалів. Яка і формує вихідну постійну напругу. Для потоку електронів використовується відповідний матеріал, щоб ККД був більшим. Матеріал повинен мати високу електропровідність і низьку теплопровідність. Для цього використовуються металеві сплави, з яких складаються напівпровідникові прилади. Ці металеві сплави, будучи з'єднаними таким чином, утворюють термопару. Деяку кількість з'єднаних разом термопар можна назвати термоелектричним генератором.

Термоелектричний генератор працює за принципом термоелектричного ефекту. Термоелектричний ефект полягає в тому, що з двох сторін генератора створюється градієнт температур (рис. 1.1). Температурний градієнт - це різниця температурних рівнів. Наприклад, якщо ми візьмемо металевий стрижень, і один кінець нагріємо, а інший охолодимо. Між двома кінцями створюється температурний градієнт. Електрони, присутні на гарячому кінці, будуть на більш високому енергетичному рівні в порівнянні з електронами, присутніми на холодному кінці. Це означає, що гарячі електрони будуть намагатися рухатися до холодного кінця через градієнт температури.

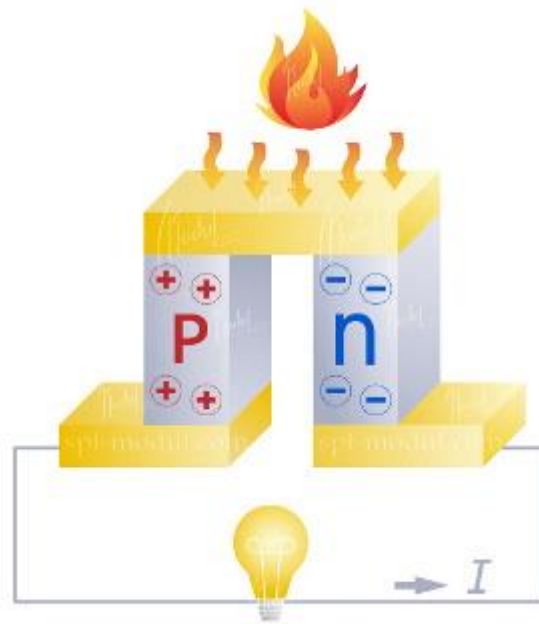


Рисунок 1.1 – Принцип роботи термоелектричного генератора

Завдяки руху електронів, гарячий кінець буде додатно зарядженим, а холодний кінець – від’ємно зарядженим. Оскільки електрони на обох кінцях знаходяться на різних енергетичних рівнях, вони мають тенденцію рухатися в різні боки, відносно з різними швидкостями. Електрони з боку гарячого кінця будуть рухатися швидше і створюватимуть різницю потенціалів між двома кінцями. Створення різниці потенціалів через градієнт температури в двох точках визначається як термоелектричний ефект. Цей же принцип використовується в термоелектричних генераторах.

1.3 Будова термоелектричного генератора

Для створення температурного градієнта гарячі електрони повинні перетікати з одного кінця в інший, без використання будь-якого зовнішнього матеріалу [5]. Так само, як ми не можемо з’єднати два провідники між термоелектричними генераторами, щоб між ними протікав струм. Отже, тепер стало зрозуміло, що матеріал, який використовується для термоелектричного генератора, повинен мати високу електропровідність і низьку теплопровідність.

При підвищенні температури електрони не повинні швидко рухатися. В ідеалі для створення таких термоелектричних генераторів використовують напівпровідники, які мають високу електропровідність і низьку теплопровідність.

Структурна схема термоелектричного генератора показана на рис. 1.2. На вхід генератора подається відпрацьоване тепло, або так звані тепловтрати. Ці тепловтрати також можуть бути отримані від автомобілів або інших джерел генерації енергії. Ці тепловтрати створюють температурний градієнт. При подачі на вхід термоелектричного генератора, на основі ефекту Зеебека, виробляється постійний струм. За допомогою інверторної схеми постійний струм може бути додатково перетворений в змінний.

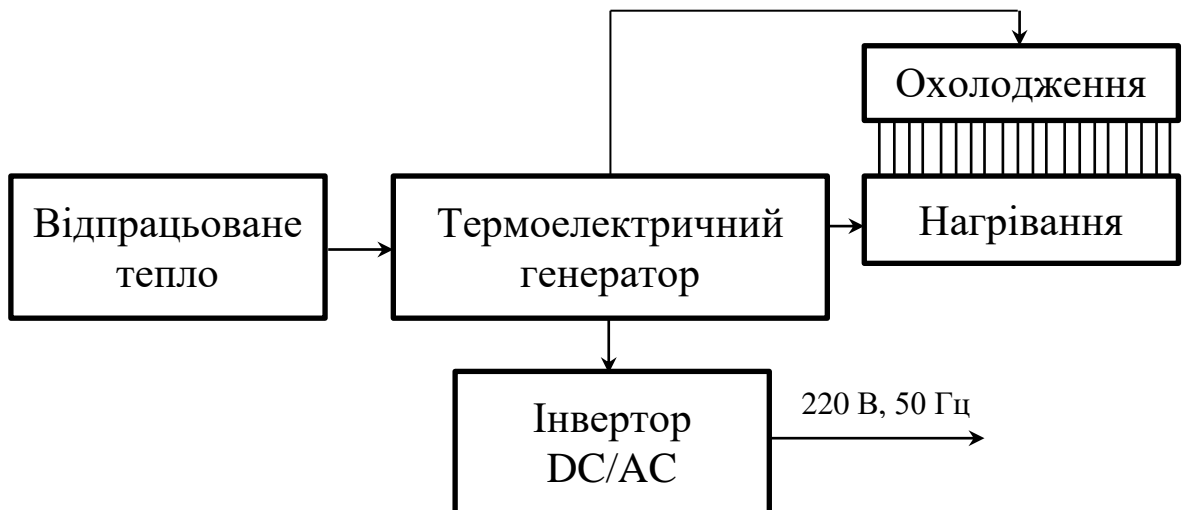


Рисунок 1.2 – Структурна схема термоелектричного генератора

У сучасних гібридних транспортних засобах ця потужність постійного струму перетворюється на змінну потужність постійного струму і подається на інші навантаження, такі як кондиціонер, освітлення тощо. Для цього використовується пристрій перетворення. Для розсіювання тепла на іншій стороні генератора використовується радіатор. Для високопотужних пристроїв також потрібні вентилятори для відводу тепла.

1.4 Коротка характеристика термоелектричних модулів

В даний час розробка різних ТЕГ ведеться з урахуванням вже освоєних і, тих які випускаються, промислово стандартних термоелектричних модулів (ТЕМ).

Учені [5] характеризують ранні тенденції у розвитку термоелектрики – акцент на створення відносно потужних охолоджуючих ТЕМ для масового споживача. Холодопродуктивність цих ТЕМ відносно велика і коливається в межах 12...40 Вт, високоструміві ТЕМ, розміри спаїв 4x4...9x9 мм², висота ТЕ 3...5 мм. Головними причинами, що визначають настільки значні розміри ТЕ та високі значення струмів живлення, були технологічні труднощі, з якими стикалися розробники під час створення ТЕ щодо малих розмірів. Провідні закордонні фірми освоїли та налагодили серійне виробництво ТЕМ, які оформлені як закінчені конструктивні елементи, поміщені у захисні оправки та забезпечені власними струмовими виводам.

У роботі [6] описано технологію складання ТЕМ, що виробляються в США. Відмінною рисою застосовуваної технології є те, що вітки одного типу провідності, що використовуються, розташовуються в одному ряду, а їх послідовне з'єднання здійснюється за допомогою мідних комутаційних пластин, орієнтованих щодо віток ТЕ.

Французькі фірми здійснюють складання ТЕМ з окремих віток ТЕ із припаюванням до їх торців металевих пластин та наступним фрезеруванням або пропилюванням за схемою, що забезпечує послідовне з'єднання віток.

Для ТЕМ розробляється індивідуальна технологія для кожного приладу. У більшості випадків окремі вітки ТЕ з'єднуються між собою комутаційними пластинами за допомогою ручного електропаяльника. Цей спосіб збирання складний, трудомісткий, вимагає високої кваліфікації і може бути виправданий при виготовленні одиничних екземплярів унікальних приладів.

Розроблено технологію створення низки серійних уніфікованих ТЕМ типу «Селен». Параметри цих ТЕМ наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Характеристики термоелектричних модулів типу Селен

Модуль	Площа гарячих і холодних спаїв модуля, мм ²	Робоча напруга, В	Оптимальний струм, А	Холодопровідність, Вт	Число термоелементів	Струмове й переріз віток, мм ²	Товщина модуля, мм	Маса, г
C1-16	56,2x67,0	1,65	86±9,0	16	15	10x10	7	116
C1-7	39,5x39,5	2,0	31±3,0	6,6	18	6x6	7	52
C3-4	32,0x27,5	2,3	14±1,5	4,0	21	4x4	7	27
C4-2	23,0x19,0	1,1	14±1,5	2,0	10	4x4	7	13
C5-1	19,0x14,5	0,65	14±1,5	1,0	6	4x4	7	8
C6	14,5x14,5	0,8			18	2x2	10	

Вирішення прикладних завдань, пов'язаних із застосуванням термоелектричного охолодження у наукових дослідженнях, техніці, біології, медицині та інших галузях народного господарства, в даний час вимагає створення мініатюрних та надмініатюрних ТЕМ.

Американською фірмою «NSJ» розроблено та випускаються мініатюрні ТЕМ, характеристики яких наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Характеристики мікромодулів, які випускають фірма «NSJ» (США)

Мікро модуль	Оптимальний струм, А	Максимальний перепад температур, К	Падіння напруги, В	Потужність, що відводиться від гарячих спаїв, Вт	Площа холодних спаїв, мм ²	Товщина модуля, мм
1AB	1,0	60	1,0	2,5	4,75x6	4,5
1A	2,0	60	1,0	3,5	4x4	3,25
5AB	5,0	60	0,9	8,0	4x4	2,5
5A	5,0	60	1,1	10	7,75x10,7	4,5
5H	5,0	60	5,0	40	18,75x18,75	4,5
5K	7,0	60	5,5	65	17,9x19,25	3,0

В Одеському технологічному інституті холодильної промисловості (ОТХП) розроблено перспективну малоопераційну технологію виготовлення мініатюрних ТЕМ для охолодження та термостабілізації елементів РЕА. ТЕМ містять велику кількість ТЕ з розмірами спаїв 0,47...0,7 мм² та висотою 1,2...2,3

мм. Вітки ТЕМ виготовлені з пресованої або екструдованої напівпровідникової речовини з добротністю $Z=2,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. У таблиці 1.3 та 1.4 наведено дані розроблених мініатюрних ТЕМ.

Таблиця 1.3 - Характеристики термоелектричних мікромодулів, розроблених у ОТІХП

Мікромодуль	Кількість віток у мікромодулі	Оптимальний струм, J, А	Робоча напруга, U, В	Холодопровідність, Q Вт	Струмний переріз віток, мм ²	Товщина мікромодуля, δ мм	Максимальний перепад, ΔT, К
I	64	2	3,88	7,76	0.84x0,84	1,2	61.6
II	64	1	3,62	3,64	0.84x0,84	2,2	61
III	16	0,5	0,708	0,354	0.69x0,69	2 2 - 9	56,2

Таблиця 1.4 - Конструктивні параметри мікроохолоджувачів для елементів напівпровідникової квантової електроніки

Тип мікроохолоджувача	Розміри мікроохолоджувача			Маса, г	Кількість термоелементів	Розміри термоелемента	
	Теплопоглинаюча поверхня	Тепловидільна поверхня	Висота			Січення	Висота
МДС20-0.7-0.06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,8	0,020	20	0,2x0,3	0,72
МДС20-0.6-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,7	0,019	20	0,2x0,3	0,63
МДС20-0.5-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,6	0,018	20	0,2x0,3	0,52
МДС20-0.4-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,5	0,017	20	0,2x0,3	0,43
МДС20-0,3-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,3	0,016	20	0,2x0,3	0,33
МДС20-0,2-0,06	0,8x3,1	0,8x4,0	1,2	0,015	20	0,2x0,3	0,22

1.5 Методи дослідження термоелектричних перетворювачів енергії та пристроїв на їх основі

На даний час для моделювання, розрахунку та дослідження ТЕП різних типів застосовується велика різноманітність методів, що спираються на аналітичні, номографічні, графоаналітичні, а також чисельні способи аналізу.

Одним із ефективних методів розрахунку ТЕП є метод послідовних наближень. Він передбачає, по-перше, проведення термоелектричного розрахунку ТЕП з визначенням розмірів та числа ТЕ, її площі, сили струму та напруги живлення при заданій холодопродуктивності. Термоелектричному передують конструктивне опрацювання ТЕП. По-друге, виконується теплотехнічний розрахунок, якому також передують конструктивне опрацювання, а саме, вибір характеристик теплообмінних поверхонь.

Потім визначаються перепади температур між теплоносіями та спаями ТЕ, внаслідок чого уточнюється значення останніх температур. При розбіжності отриманих значень температури з прийнятими термоелектричному розрахунку вводиться поправка, і обчислення проводяться далі для уточнених температур спаїв. Цей метод є дуже трудомістким для інженерного розрахунку, оскільки потребує багаторазового повторення наближень.

Виключити послідовні наближення для розрахунку ТЕП дозволяють залежності, отримані в [10]. Тут у розрахункових виразах виключені температури спаїв, що досягнуто, однак, на шкоду простоті співвідношень, які представлені складними непараболічними функціями струму живлення. Це ускладнює їхнє аналітичне дослідження на екстремальні режими роботи ТЕП.

Складність аналітичного дослідження точних співвідношень, що описують режими роботи ТЕП як функції температур середовищ, ускладнює їхнє практичне застосування. Отримано залежності для навантажувальних характеристик батарей у квадратичній функції струму живлення. Тут прийнято ряд спрощуючих припущень, що знижують точність отриманих виразів.

При іншому підході до розрахунку термоелектричних перетворювачів враховується зміна температур на теплопоглинаючих та тепловиділяючих

поверхнях. У цьому ТЕП представляється як сукупність ТЕ, які у різних температурних умовах.

У [11] описаний підхід до розрахунку термоелектричних охолоджувачів, заснований на можливості підвищення ефективності роботи ТЕП за рахунок оптимізації роботи кожного окремого її елемента. Оптимізація досягається за рахунок підбору для кожного ТЕ такої щільності струму живлення, яка відповідала б екстремальному режиму. Для досягнення цього за збереження послідовної електричної комутації, ТЕП має бути зібрана з ТЕ різної площі струмового перерізу. Обґрунтованими режимами роботи таких пристроїв є лише екстремальні режими, для забезпечення яких за конкретних умов розраховується сила струму та геометрія елементів.

Залежності для холодопродуктивності, споживаної потужності та холодильного коефіцієнта подібних ТЕП отримані при допущенні нескінченно великих коефіцієнтів теплообміну та сталості температури тепловідвідного середовища.

Основні напрямки досліджень динамічних режимів роботи термоелектричних приладів, що охолоджують, можуть бути охарактеризовані наступним чином:

1. Розрахунок зміни температури у пристрої при включенні та ступінчастому стрибку значення струму живлення.
2. Визначення закону зміни струму живлення, що забезпечує заданий або екстремальний перебіг температури у пристрої.
3. Розрахунок зміни температури в пристрої внаслідок впливу збурюючих факторів.

В даний час найбільш повно досліджено нестационарні режими в ТЕП, що складаються з ТЕ, які працюють в однакових температурних умовах. Для даних пристроїв дослідження роботи ТЕБ можна проводити з прикладу одного ТЕ [8].

1.6 Висновки до розділу

1. Проаналізовано основні тенденції у розробках, дослідженнях та конструюванні термоелектричних генераторів. Виявлено, що змістовні дослідження проводяться у сфері впливу теплообміну на енергетичні та інші показники охолоджувачів та нагрівачів, інтенсифікації тепловіддачі, багато робіт присвячено оптимізації параметрів термоелектричних пристроїв, підвищення ефективності їх використання, раціонального вибору напівпровідникових матеріалів.

2. Проведено аналіз принципу роботи термоелектричних генераторів, їх будови. Виконано огляд термоелектричних генераторів які серійно випускаються промисловістю.

3. На основі виконаного аналізу методів дослідження термоелектричних перетворювачів енергії та пристроїв на їх основі встановлено основні напрямки досліджень динамічних режимів роботи термоелектричних приладів. А саме: розрахунок зміни температури у пристрої при включенні та ступінчастому стрибку значення струму живлення; визначення закону зміни струму живлення, що забезпечує заданий або екстремальний перебіг температури у пристрої, розрахунок зміни температури в пристрої внаслідок впливу збурюючих факторів.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Елементи конструкції термоелектричних перетворювачів

Термоелектричний пристрій складається із трьох основних вузлів: власне термоелектричної батареї; системи тепловідведення від гарячих спаїв термобатареї; системи теплопідведення до холодних спаїв термобатареї [5]. Особливістю подібних пристроїв є безпосередній контакт гарячих та холодних спаїв термобатареї із системами тепловідведення та теплопідведення, що обумовлює тісну взаємозалежність термоелектричних та теплотехнічних характеристик та потребує комплексного знаходження оптимальних конструктивних варіантів.

Основа будь-якого термоелектричного охолоджуючого або нагрівального пристрою - окремі термоелементи, що з'єднуються між собою за послідовною або паралельно-послідовною схемою. Окремий (поодинокий) термоелемент складається з двох напівпровідникових віток, одна з яких має діркову, а інша електронну провідність. З'єднання віток у термоелемент відбувається за допомогою комутаційної пластини [7]. Класифікацію віток термоелементів доцільно проводити формою їх «струмового» перерізу. (Під «струмовим» перерізом мається на увазі переріз, перпендикулярний напрямку руху струму.) Практично форми віток і перерізів можуть бути будь-якими, але в даний час набули поширення вітки з прямокутним, круглим, секторним і кільцевим перерізами площею від 0,05 до 4 см². Найбільш широко застосовуються вітки з прямокутним перерізом, технологія виготовлення яких добре освоєна і не викликає труднощів.

Можливі різні варіанти виконання віток із прямокутним перерізом: плоского типу, у формі паралелепіпеда та куба. Вибір того чи іншого варіанту обумовлений необхідністю забезпечити вимоги, що стосуються компактності, масогабаритних показників, економічності та допустимих величин струму, але дозволяє отримати високу компактність за рахунок мінімально можливих проміжків між вітками.

Застосування віток з круглим перерізом плоского типу або у формі циліндра не дозволяє отримати високих значень коефіцієнта заповнення, що є відношенням площі всіх напівпровідникових віток до загальної площі термобатареї ($\eta_{\text{зап}} = S/S_{\text{ТЕБ}}$). Це викликає додатковий тепловий потік від гарячих спаїв до холодних через ізоляцію в зазорах між вітками та зменшує величину корисної холодопродуктивності термобатареї.

У ряді конструкцій термоелектричних пристроїв знайшли застосування вітки термоелементів з кільцевим або секторним перерізом. Незважаючи на труднощі технологічного та конструктивного порядку застосування кільцевих термокомпонентів для суднових пристроїв слід визнати найбільш перспективним, оскільки вони дозволяють використовувати як теплообмінні поверхні трубчасті компоненти і отримувати компактні малогабаритні пристрої.

Для демпфуючих прокладок застосовують свинцеві пластини завтовшки 0,3-0,7 мм. Технологія підготовки віток до комутації в цьому разі дещо ускладнюється. Вітку термоелемента залуджують спеціальним та легкоплавким припоєм. Тим же легкоплавким припоєм покривають одну зі сторін свинцевої пластини, іншу сторону покривають припоєм, що володіє меншою температурою плавлення. Після цього пластину припаюють до вітки.

Під комутацією зазвичай розуміють з'єднання віток р- і η-типів за допомогою комутаційної пластини в термокомпонент. Вибрана схема комутації та сама комутація повинні забезпечувати:

- незначний перехідний електричний опір від однієї вітки до іншої;
- незначний тепловий опір від спаю до теплообмінної поверхні;
- достатню механічну міцність з'єднання;
- зняття чи зменшення теплових, ударних, вібраційних та інших навантажень на вітки термокомпоненту;
- технологічність збирання.

Як матеріал для комутаційних компонентів в даний час застосовують в основному мідь, яка має високу теплопровідність і низький питомий електричний опір, а комутацію проводять методом безпосередньої пайки

комутаційних компонентів до віток р- і n-типів з використанням легкоплавких припоїв [7].

Конструкція комутаційних компонентів дуже різноманітна. Найбільш проста звичайна мідна пластина, що використовується для комутації віток із прямокутним або круглим перерізом. Попередньо комутаційна пластина залужується тим же легкоплавким припоєм, що й вітки термокомпонентів. Подібна конструкція термокомпонента є жорсткою і не усуває достатнього ступеня механічних напруг, що виникають при роботі. Найчастіше звичайні мідні пластини застосовують зі свинцевими демпфуючими прокладками, які внаслідок своєї еластичності розвантажують вітки від напруг. При невеликих перепадах температур іноді виявляється достатнім застосування розрізних комутаційних пластин, тонка перемичка яких має пружність і невеликий електричний опір завдяки її малій довжині.

У ряді конструкцій знайшли застосування компенсовані комутаційні пластини та пластини з різною довжиною по холодній та гарячій сторонах термокомпоненту.

У термоелектричних пристроях, призначених для охолодження чи нагрівання повітря, теплообмінної поверхні часто надають функції комутаційного компонента.

Розібрані приклади не вичерпують всіх можливих конструктивних з'єднань віток термокомпонентів і типів комутації. Поряд з широко поширеним способом комутації - залуджуванням спеціальними припоями, існує ряд інших методів - дифузійне зрощування, рідка або напіврідка комутація, використання сплавів, що твердіють, галію з міддю, нікелем та іншими металами і метод притискної комутації. У термоелектричних охолоджуючих чи нагрівальних пристроях зазначені типи комутації застосовуються дуже рідко.

Для ізоляції струмопровідних компонентів термобатареї від теплообмінних поверхонь застосовують електроізолюючі прошарки (Електроізолюючі теплопереходи). Назва зумовлена вимогами, яким повинен відповідати прошарок - високі ізоляційні властивості та малий тепловий опір.

Перша вимога забезпечує надійність роботи, а друга - низькі робочі перепади температур і, отже, вище значення холодильного коефіцієнта.

Крім того, електроізолюючий теплоперехід має бути механічно міцним. Конструкція одиничних (застосовуваних для ізоляції одного термокомпонента) прошарків дуже різноманітна. Найбільш простим є теплоперехід, що складається із двох мідних, окисдованих з одного боку пластин, склеєних між собою епоксидним компаундом. В цьому разі мідні пластини виконують функції комутаційних компонентів. Шар оксидної плівки зазвичай не перевищує 0,1-0,2 мкм, та його механічна міцність невелика. Крім того, шар епоксидної смоли порядку 10-15 мкм має досить високий тепловий опір. При величині теплового потоку 1 Вт/см^2 перепад температур перевищує $3,5^\circ$.

Поліпшити механічні та ізоляційні властивості клеєних епоксидним компаундом теплопереходів можна за рахунок застосування кабельного паперу завтовшки 5-10 мкм замість оксидної плівки. Для зменшення теплового опору треба притирати поверхні мідних пластин, що значно ускладнює технологію їх виготовлення, зате перепад температур не перевищує $2,5^\circ$. У ряді пристроїв знайшов застосування теплоперехід аналогічної конструкції, в якому одна з мідних пластин замінена на свинцеву.

Найбільш повно відповідають усім вимогам керамічні теплопереходи, що мають високі електроізоляційні властивості, хорошу теплопровідність і механічну міцність. Як кераміку застосовують найчастіше алунд Al_2O_3 , рідше окис берилію BeO , хоча теплопровідність останнього значно вища. Це пояснюється надзвичайно великою токсичністю окису берилію під час його обробки. Приєднання мідних пластин роблять або шляхом паяння до попередньо металізованої кераміки, або шляхом дифузійного зварювання.

У термоелектричних пристроях використовуються два типи систем теплопідведення та тепловідведення - радіаторна (з примусовою або природною циркуляцією повітря) та рідинна. Теплообмінні поверхні повинні забезпечувати мінімально можливий перепад температур між теплоносієм та спаями термокомпонентів за рахунок інтенсивного теплообміну, розвиненої поверхні та невеликого теплового опору.

Одночасно поверхні повинні бути компактними і не навантажувати значно. Оребрування системи може виконуватися як окремо для кожного термокомпонента, так і для термобатарей в цілому. В останньому випадку потрібне встановлення теплопереходів. Широке поширення в термоелектричних пристроях, призначених для тепло-вологої обробки повітря, отримали пластинчасто-ребристі поверхні з гладкими, хвилястими, перфорованими і стерженьковими ребрами.

Даний тип ребра дозволяє зосередити в одиниці об'єму велику поверхню теплообміну і мати практично будь-яку необхідну геометрію ребер - товщину, висоту, довжину, крок і т.д.

Найбільш прості в конструктивному та технологічному відношенні поверхні з гладкими ребрами, у яких переріз каналів для проходу повітря може бути прямокутним, трикутним або із округленими кутами. Ребра можуть виготовлятися окремо з однієї стрічки і припаюватися до основи. Часто для зменшення теплового опору ребра на основі фрезерують спеціальні канавки, куди встановлюють, а потім припаюють ребра. З метою інтенсифікації теплообміну ребра виготовляють хвилеподібними або перфорують. Дуже високим значенням коефіцієнта тепловіддачі характеризуються пластинчато-стриженькові поверхні, у яких ребра можуть мати шахове або коридорне розташування. До недоліків останнього типу ребра слід віднести значні величини коефіцієнтів аеродинамічного опору.

Пластинчасто-ребристі поверхні застосовуються в основному в термобатареях плоского типу з термокомпонентами прямокутного або круглого перерізу. Теплообмінна поверхня по гарячій стороні в цьому випадку зазвичай виконується у вигляді плити зі просвердленими каналами або фрезерованими для проходу води. Вибір того чи іншого типу поверхні та геометрії ребер повинен проводитись у кожному конкретному випадку з урахуванням багатьох факторів. До них, перш за все, слід віднести допустимі величини втрат напору, вимоги до вагових та габаритних показників, технологічність виготовлення та ін. Прагнення мати розвинену поверхню за рахунок збільшення висоти ребер та малого кроку може призвести до неприпустимих навантажень на

термокомпонент при вібраціях та ударних струсах. З іншого боку, пластинчасто-ребристі поверхні іншої конфігурації знаходять застосування в конструкціях термобатарей неплоского типу. Наприклад, у термоелектричних пристроях з тепловідвідною системою, виконаною у вигляді труби.

У подібних схемах для надання всієї конструкції певної жорсткості та розвантаження термокомпонентів від напруги стали застосовувати ребра з охопленням всіх термокомпонентів по периметру. Така конструкція ребра, хоч і вимагає наявності теплопереходів по холодній стороні, зарекомендувала себе позитивно в ряді пристроїв з досить жорсткими умовами експлуатації. У кільцевих термокомпонентах застосовують звичайні трубчасті (ребристі та гладкі) компоненти.

Короткий розгляд термоелектричних пристроїв, безумовно, не вичерпує всіх можливих варіантів їх конструктивного виконання та використання..

2.2 Дослідження особливостей та сфер застосування термоелектричних генераторів

2.2.1 Космічна сфера

Першим ТЕГ, запущеним у космос Сполученими Штатами Америки, був SNAP 3В у 1961 році з 96 грамами металевого плутонію 238 на борту космічного корабля Navy Transit 4А [12] (рис. 2.1). У 2010 році США здійснили 41 запуск ТЕГ на 26 космічних системах. ТЕГ, що використовувалися в космічній програмі, спочатку включали SiGe ТЕ матеріали, встановлені в GPHS-RTG, пізніше їх замінили сплави телуриду свинцю або TAGS.

2.2.2 Прилади електроживлення у віддалених районах

Одне з перших наземних застосувань ТЕГ було здійснено у 1966 році ВМС США для живлення екологічних приладів на невеликому безлюдному острові Фейрвей-Рок на Алясці (рис. 2.2) На цьому об'єкті ТЕГ використовувалися до 1995 року [12]. Ці системи були розроблені для

електроживлення обладнання, що вимагає стабільного і надійного джерела живлення, протягом декількох років і без технічного обслуговування. Прикладами таких систем можуть бути джерела живлення для систем, розташованих в ізольованому або важкодоступному середовищі, таких як маяки і навігаційні маяки, метеостанції.

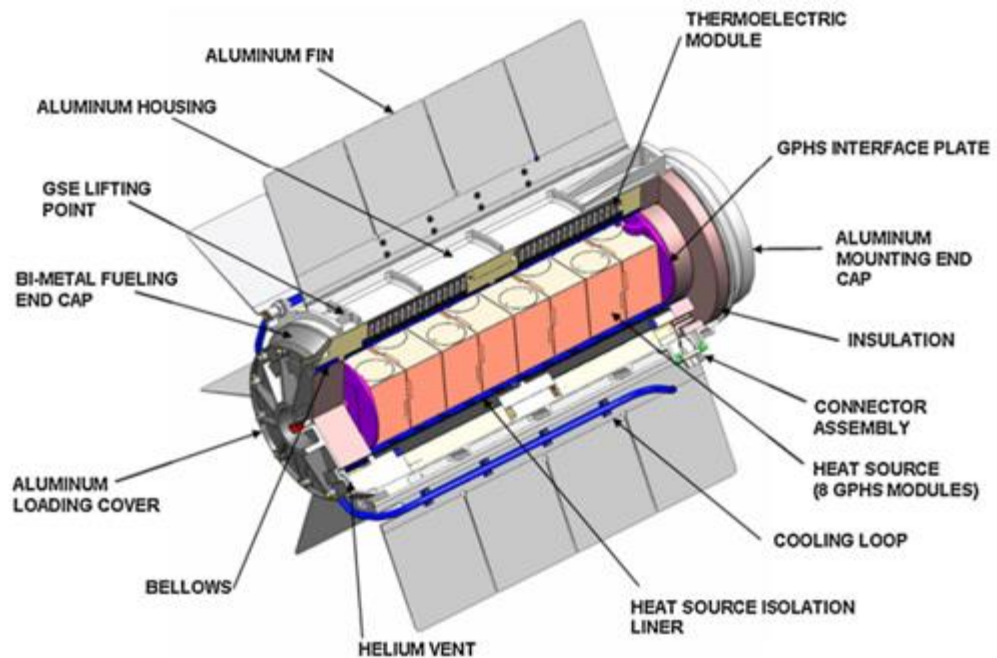


Рисунок 2.1 – Перший космічний корабель Navy Transit 4A із ТЕГ



Рисунок 2.2 – ТЕГ для живлення екологічних приладів на невеликому безлюдному острові Фейрвей-Рок на Алясці

2.2.3 Природний газ та біомаса

На сьогоднішній день термопари або термоелектричні генератори ТЕГ призначені для забезпечення енергією автономних датчиків, встановлених у віддалених місцях з суворими умовами навколишнього середовища, тобто дуже низькою температурою і важкодоступними місцями, де звичайні відновлювані джерела енергії, такі як сонячна і вітрова енергія, не є регулярно доступними. В цих умовах тепло зазвичай генерується безполуменим каталітичним паливом [14]. Кілька виробників термоелектричних генераторів, що працюють на природному газі, встановлені в більш ніж 55 країнах. Наприклад, компанія Gentherm виробляє ТЕГ потужністю від 15 до 550 Вт. Ці генератори в основному використовуються на морських платформах, вздовж трубопроводів, на висоті або біля газових свердловин (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – ТЕГ, що працюють на природному газі

Також на ринку з'явилося кілька пристроїв, призначених для громадського використання. Одним з них було термоелектричне радіо на свічках (1990 р.), яке використовує тепло від свічок для живлення радіо через модуль FeSi₂ TE. Ці прилади застаріли з появою інших більш практичних технологій, але, незважаючи на це, все ще існують деякі специфічні застосування, такі як піч CampStove, показана на рис.2.4. Це обладнання, призначене для кемпінгу в цілому, спалює деревину для отримання 2 Вт потужності 0,4 А і 5 В за допомогою термоелектричного генератора, в якому підключення електричних пристроїв здійснюється через USB-порт [15].



Рисунок 2.3 –ТЕГ громадського використання, що призначене для кемпінгу і спалює деревину для отримання 2 Вт електроенергії

2.2.4 Людське тіло

Перший термоелектричний наручний годинник, що працює за рахунок перетворення тепла тіла в електричну енергію, був випущений на ринок компаніями Seiko та Citizen у 1999 році [16]. Годинник Seiko (рис. 2.5) виробляв 22 мкВт електричної енергії та напругу в розімкненому стані 300 мВ з ККД близько 0,1% [16]. Інший приклад - браслет Dyson TE (2012 р.), показаний на рис. 2.6, який, використовуючи тепло тіла, заряджав інтегровану в нього батарею для зарядки мобільного телефону або будь-якого іншого мобільного пристрою.

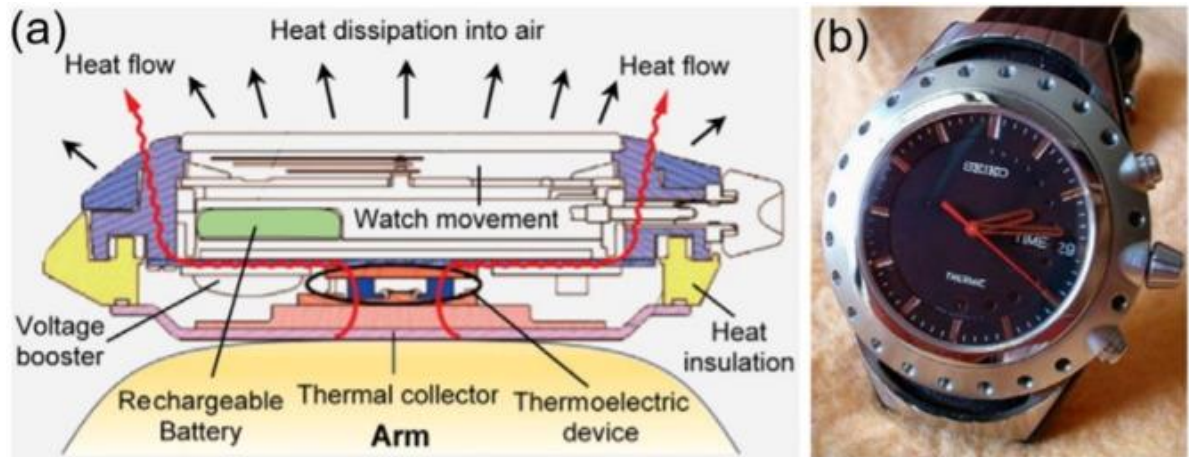


Рисунок 2.5 – Наручний годинник Seiko Thermic

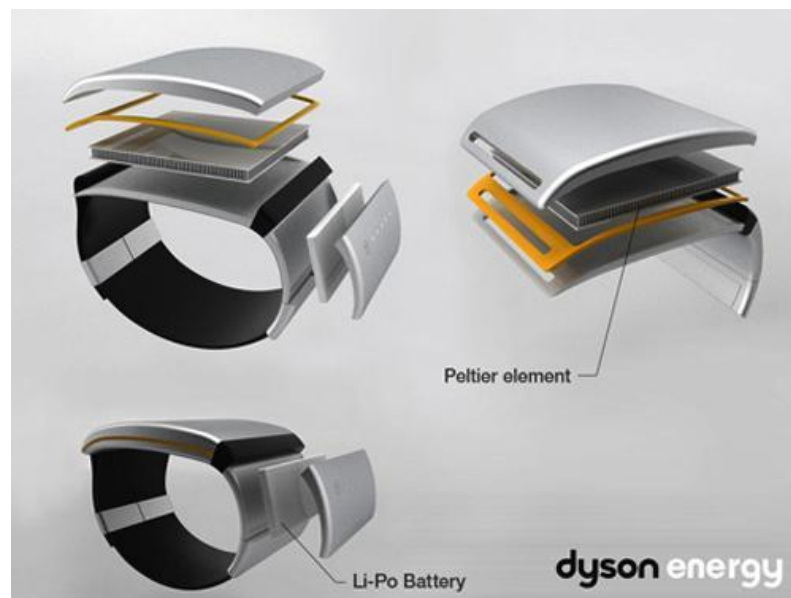


Рисунок 2.6 – Браслет Dyson

Оскільки тепло людського тіла є природним і стабільним, воно може бути використане для генерування певної кількості електроенергії в дуже специфічних застосуваннях, таких як медичні [17]. Людське тіло виділяє близько 100 Вт тепла у стані спокою та 525 Вт під час фізичних навантажень.

2.2.5 Утилізація скидного тепла транспортних систем

Наприкінці 1980-х років Біркхолт [18] у співпраці з Порше запропонував термоелектричний генератор з прямокутним поперечним перерізом, який був здатний виробляти до 58 Вт в пікових умовах з елементами FeSi_2 .

У 1992 році компанія Ni-Z Technology розпочала розробку термоелектричного генератора потужністю 1 кВт для дизельних двигунів вантажівок за фінансування Міністерства енергетики США та Каліфорнійської енергетичної комісії.

Компанія Amerigon (нині Gentherm) розробляє термоелектричні генератори для пасажирських транспортних засобів. Вони були впроваджені на автомобілях BMW X6. (рис.2.7)

У 2013 році компанії Fiat і Chrysler оголосили про виробництво першого легкого комерційного автомобіля, оснащеного ТЕГ [19] з економією палива 4%. В ТЕГ використовувалася перехресно-поточна архітектура, з сегментованими ТЕ елементами TAGS, $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-PTe}$ і Skutterudites.

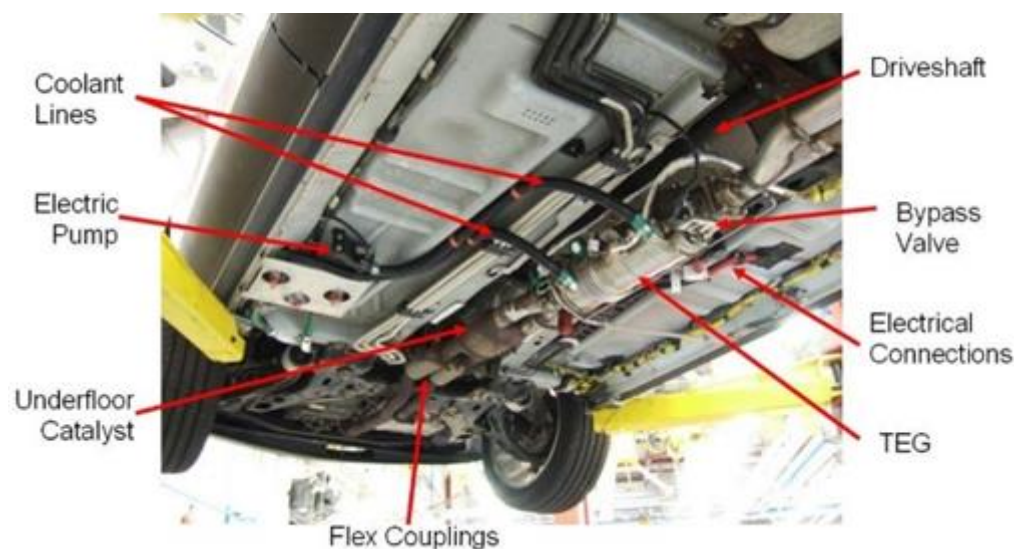


Рисунок 2.7 – Інтеграція ТЕГ у вихлопну систему прототипу автомобіля BMW X6

2.3 Опис принципу роботи термоелектричного генератора проточного типу

ТЕГ проточного типу характеризуються наявністю теплообмінних апаратів з холодними і гарячими теплоносіями, що протікають в них, контактують зі спаями термоелементів. В якості охолоджуючого теплоносія може використовуватися проточна вода при кімнатній температурі, або охолоджена за допомогою будь-яких засобів до нижчого значення, а як нагрівач застосовується теплоносій, нагрітий від різних джерел (газових пальників, ізотопів, сонячним випромінюванням, від термоядерного реактора). Типова конструкція такого ТЕГ зображена на рис.2.8, а зовнішній вигляд на рис.2.9.

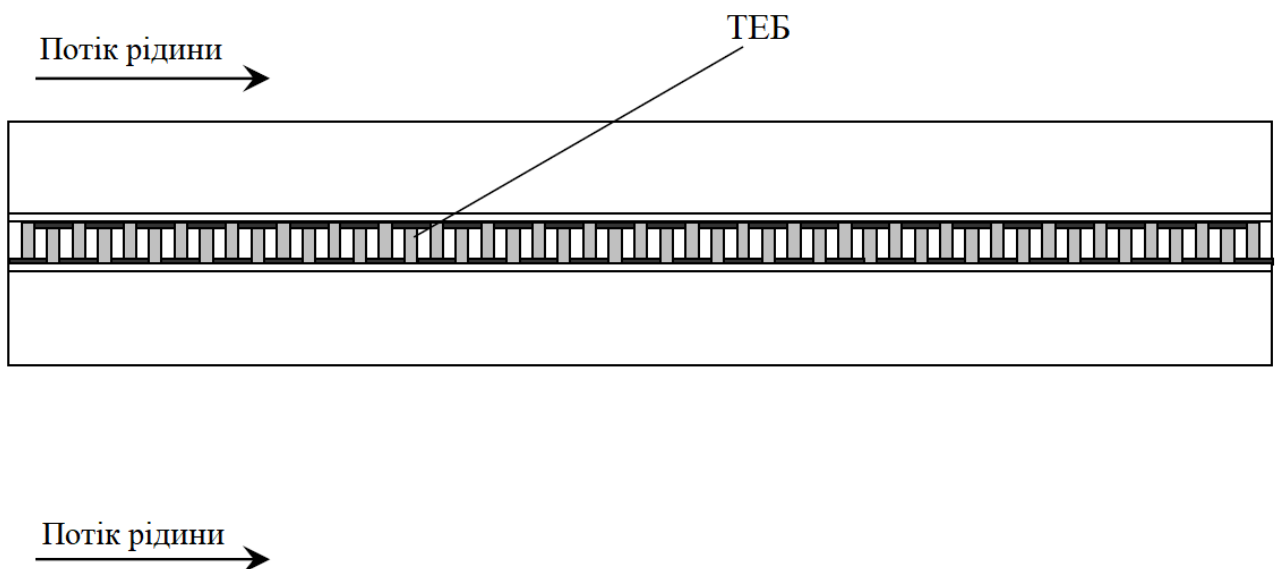


Рисунок 2.8 - Конструкція ТЕГ проточного типу

Переваги даної конструкції - більш високі коефіцієнти теплообміну між спаями термоелементів і охолоджувальними та нагрівальними середовищами, наслідком чого є інтенсивніший приплив і відтік теплоти до спаїв ТЕГ, збільшення перепаду температур між спаями генератора, підвищення ККД приладу.



Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд типового ТЕГ проточного типу

Типова характеристика навантаження ТЕГ даного типу представлена на рис.2.10.

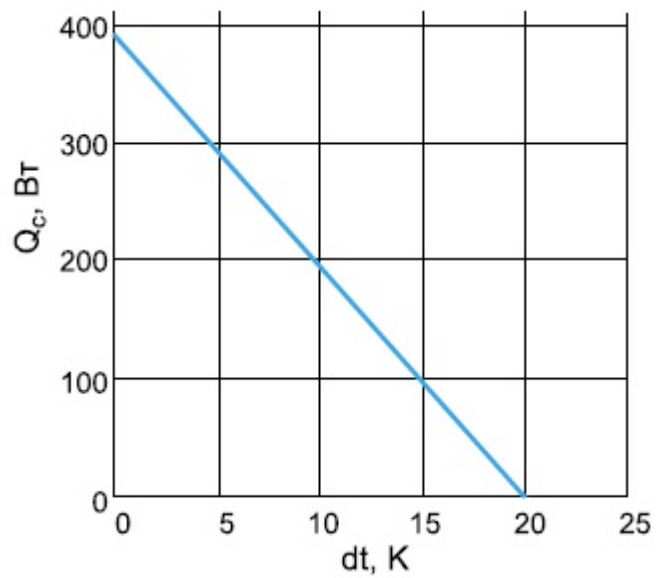


Рисунок 2.10 - Типова характеристика навантаження ТЕГ проточного типу

2.4 Конструкція термоелектричного генератора проточного типу з поздовжніми ребрами

В даний час завдання розробки ефективних генераторів електричної енергії, що відрізняються високою надійністю та значним ресурсом роботи, є все більш необхідним та актуальним. Це пов'язано зі зростаючими вимогами до тактикотехнічних, енергетичних та надійних параметрів теплообмінних апаратів у приладах та комплексах різного призначення.

Серед існуючих в даний час великої різноманітності генераторів електричної енергії, що функціонують на основі різних фізичних ефектів, значні переваги при потужностях в межах 100-300 Вт мають ТЕГ. Генератори на їх основі мають такі переваги:

- практично необмежений ресурс роботи;
- не мають елементів, що зношуються і труться, а значить, безшумні в роботі, характеризується низьким рівнем вібрацій;
- екологічно безпечні;
- висока функціональна гнучкість;
- винятково висока надійність;
- вигідні масогабаритні характеристики тощо.

В даній роботі розглянуто конструкції трубчастих ТЕГ з поздовжніми та поперечними ребрами. Конструктивно такі апарати є трубою багатогранного перерізу, на гранях якої першими спаями змонтовані ТЕБ, до других спаїв якої припаяні ребра. Залежно від типу та способу розміщення ребер на тепловиділяючих спаях ТЕБ ТЕГ виконуються з поздовжніми та поперечними ребрами.

Дані пристрої призначені для застосування в енергетичному комплексі для вироблення електроенергії з використанням низькопотенційних джерел теплоти та інших приладів аналогічного призначення.

Конструкція трубчастого ТЕГ із поздовжніми ребрами зображена на рис.3.7

ТЕГ містить дві виконані з високотеплопровідного матеріалу і коаксіально встановлені труби: зовнішню, з радіальними отворами у вигляді прорізів, і внутрішню, виконану у вигляді багатогранника. Пристрій містить зібрані з ТЕ ТЕБ, електрично з'єднані між собою по секційно - послідовно (рис.3.7). ТЕБ встановлені першими спаями на гранях внутрішньої труби по всій її довжині. Другі спаї ТЕМ, розташовані в радіальних отворах зовнішньої труби на рівні її поверхні, забезпечені поздовжніми ребрами, приєднаними біля основи поверхні зовнішньої труби.

Через торці герметизованого міжтрубного простору виведено електричні клеми та патрубков для відкачування повітря.

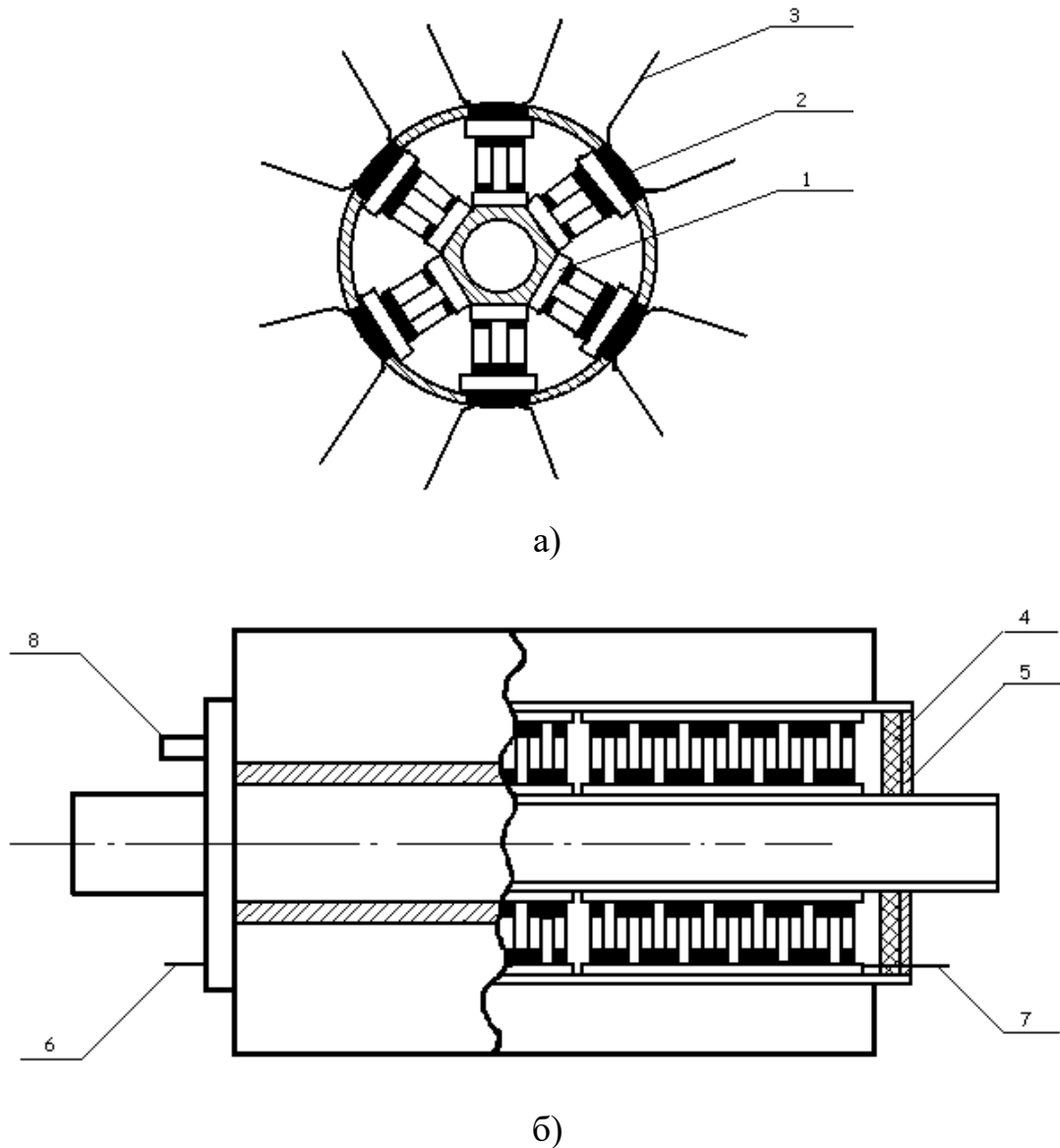


Рисунок 3.7 - Конструкція термоелектричного теплообмінного апарату з поздовжніми ребрами, а) вигляд збоку; б) вигляд спереду у розрізі

ТЕГ складається з шестигранної мідної труби 1 (рис.3.7), на гранях якої по всій довжині встановлені 36 уніфікованих ТБ 2 (кожна батарея складається з 16 ТЕ), з'єднаних електрично між собою посекційно - послідовно. До холодних спаїв батарей, встановлених на кожній з граней, припаяна мідна фольга 3. Після установки цієї конструкції в трубу з отворами 4 фольга 3 розпрямляється і припаюється до зовнішньої поверхні труби 1, а частина фольги, що залишилася, згинається під кутом 90° до поверхні труби. Для герметизації і подальшого вакуумування міжтрубного простору кінці батареї вставлені гумові прокладки 5, зверху залиті епоксидною смолою 6, через які виведені клеми живлення 7 і 8 і патрубков для відкачування повітря 9.

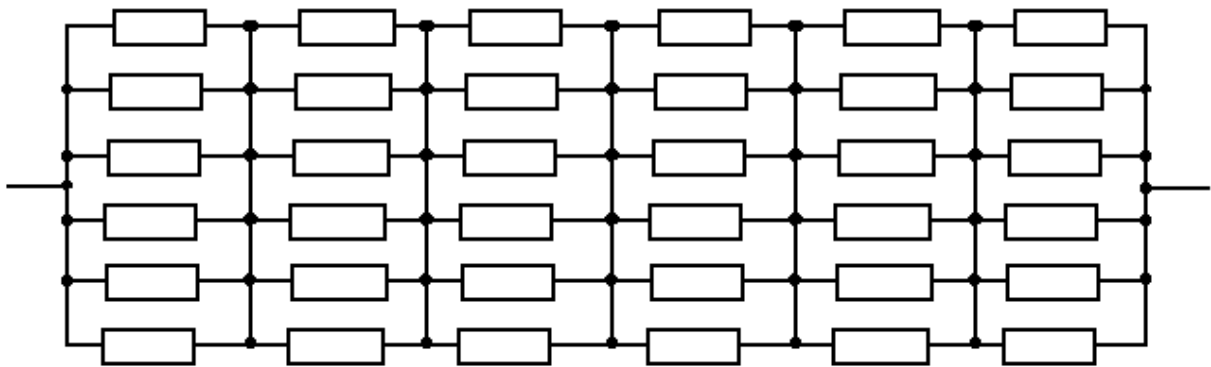


Рисунок 3.8 - Електрична схема послідовно посекційного з'єднання ТЕБ

2.5 Конструкція термоелектричного генератора проточного типу з поперечними ребрами

Модифікацією попередньо розглянутого термоелектричного теплообмінного апарату є термоелектричний теплообмінний апарат проточного типу з поперечними ребрами. Головною відмінною ознакою даного теплообмінного апарату є зміна орієнтації ребер радіатора, що розташовуються на гарячому спаї ТЕБ, у просторі. Якщо у приладі, розглянутому в попередньому пункті, ребра радіатора розташовувалися вздовж довжини ТЕБ, то в даному випадку ребра радіатора виконані у поперечному

напрямку стосовно ТЕБ. Використання радіатора на зовнішньому спаї ТЕБ подібного типу визначає нову сферу застосування ТЕГ. В даному випадку ця область - використання теплообмінного апарату при охолодженні або нагріванні потоків рідини, рух яких відбувається в напрямку перпендикулярному теплообмінному апарату. Якщо розглянутий вище ТЕГ проточного типу з поздовжніми ребрами був ефективніший при охолодженні та нагріванні потоків повітря або рідини, спрямованих лише вздовж його довжини, то даний апарат проточного типу з поперечними ребрами в даному випадку може бути використаний ще й для випадку радіального напрямку потоку рідини або газу стосовно ТЕБ. Ця обставина пояснюється покращенням теплообміну радіатора з повітряним потоком за рахунок збільшення коефіцієнта тепловіддачі з покритою ребрами подібним чином поверхнею, то даний апарат проточного типу з поперечними ребрами в даному випадку може бути використаний ще і для випадку радіального напрямку потоку рідини або газу по відношенню до ТЕБ. Ця обставина пояснюється покращенням теплообміну радіатора з повітряним потоком за рахунок збільшення коефіцієнта тепловіддачі з ребрами подібним подібним чином поверхнею. Конструкція проточного типу з поперечними ребрами наведена на рис.3.9.

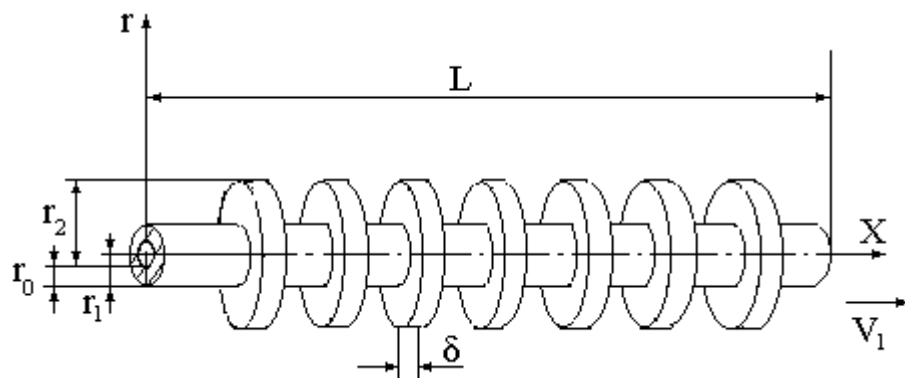


Рисунок 3.9 - Конструкція термоелектричного теплообмінного апарату з поперечними ребрами

У ТЕГ ТЕБ складається з 48 ТЕ заввишки 5 мм і послідовно скомутованих напівпровідникових стовпчиків діаметром 7,8 мм,. Несучим елементом ТЕБ є восьмигранна труба, виконана з матеріалу з високим питомим коефіцієнтом теплопровідності (міді), на гранях якої через електроізолювані теплопереходи

встановлені на легкоплавкому припої ТЕ. До зовнішніх спаїв ТЕБ приєднаний радіатор, виконаний з алюмінію, що має ребра, розташовані в поперечному напрямку. Радіатор виготовлений із цільного алюмінієвого бруска циліндричної форми шляхом проточування його в радіальному напрямку через рівні проміжки по всій довжині. Для захисту від вологи ТЕ та теплопереходи залиті теплоізолюючим матеріалом.

2.6 Розробка конструкції термоелектричного генератора проточного типу з поперечними ребрами, виконаними сегментарно

Для поліпшення енергетичних, масогабаритних та надійних характеристик ТЕГ з поперечними ребрами розроблено його модифіковану конструкцію з ребрами радіатора, виконаними сегментарно (рис.3.10).

ТЕГ проточного типу складається з мідної труби з квадратним перерізом, на кожен грань якої встановлені дванадцять ТЕ, де використані напівпровідникові вітки круглого перерізу діаметром 7,8 мм та висотою 4 мм, з'єднані між собою послідовно. До інших спаїв ТЕ, розташованих на одній грані, припаяний сектор ребер заввишки 15 мм і товщиною 1 мм, виконаних з міді. Ізоляція ТЕ від навколишнього середовища здійснена за допомогою епоксидного компаунду. Підвідні провідники виведені з ТЕГ та підключаються до споживача постійної електричної напруги.

З метою збільшення надійності та технології складання розроблено ТЕГ трубчастої конструкції з поперечними ребрами, виконаними сегментарно, в якому замість окремих ТЕ використані ТЕМ, що складаються з 16 віток. Для зручності регулювання та підвищення надійності всі 24 ТЕМ в ТЕБ, що використовується в теплообміннику, були секціоновані на 4 секції по 6 модулів, розташованих на одній грані.

Відмінною ознакою даного конструктивного виконання ТЕГ проточного типу є можливість використання його для випадків, коли потоки рідини переміщуються як уздовж його довжини, так і в радіальному напрямку. Використання даного варіанту ТЕГ при зміні температури потоків теплоносіїв,

як в поздовжньому, так і в радіальному напрямку, можливе за рахунок спеціальної конструкції радіатора на зовнішньому спаї ТЕБ, виконаним з сегментарними ребрами.

Крім того, конструкція ТЕГ з подібним радіатором відрізняється найкращими масогабаритними та надійними характеристиками.

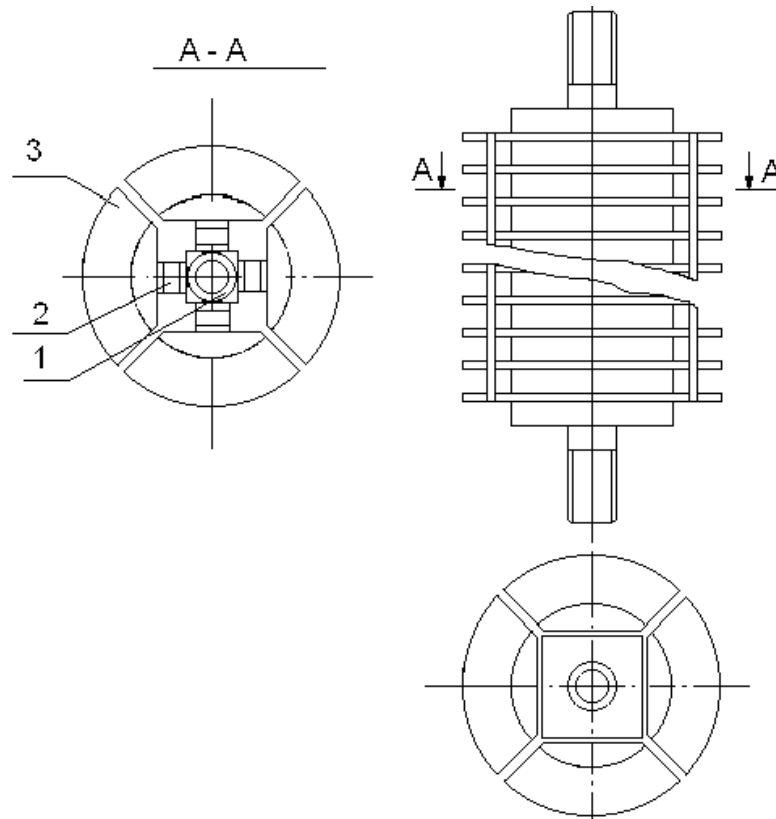


Рисунок 3.10 - Конструкція термоелектричного теплообмінного апарату з поперечними ребрами, виконаними сегментарно

2.7 Висновки до розділу

1. Розглянуто особливості конструкції термоелектричних перетворювачів.

2. Проведено аналіз конструкції термоелектричних генераторів в залежності від їх особливостей використання. А це космічна сфера, живлення віддалених районів, використання природного газу та біомаси в якості палива, використання людського тіла в якості джерела тепла та утилізація скидного тепла транспортних систем.

3. В результаті аналізу особливостей роботи термоелектричного генератора проточного типу, встановлено переваги даної конструкції: більш високі коефіцієнти теплообміну між спаями термоелементів і охолоджувальними та нагріваючими середовищами, наслідком чого є інтенсивніший приплив і відтік теплоти до спаїв ТЕГ, збільшення перепаду температур між спаями генератора, підвищення ККД приладу.

4. Представлено конструкцію термоелектричного генератора проточного типу з поздовжніми та поперечними ребрами радіатора. Дані пристрої призначені для застосування в енергетичному комплексі для вироблення електроенергії з використанням низькопотенційних джерел теплоти.

5. Встановлено, що найбільш ефективні конструкції термоелектричного генератора проточного типу з поперечними ребрами, виконаними сегментарно. Відмінною ознакою є можливість їх використання для випадків, коли потоки рідини переміщуються як уздовж осі, так і в радіальному напрямку. Використання даного варіанту термоелектричного генератора при зміні температури потоків теплоносіїв, як в поздовжньому, так і в радіальному напрямку, можливе за рахунок спеціальної конструкції радіатора на зовнішньому спаї ТЕБ, виконаним з сегментарними ребрами.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розрахунок термоелектричного генератора

3.1.1 Особливості розрахунку

Завдання моделювання ТЕГ полягає у визначенні його вихідних електричних параметрів, зокрема значення ЕРС, що генерується, а також коефіцієнта корисної дії. При цьому основними вихідними даними є термоелектричні властивості напівпровідникового матеріалу, що застосовується, і температурні обмеження, що відносяться до термоелектричного матеріалу або окремих конструктивних деталей ТЕГ. Першим етапом моделювання ТЕГ є розрахунок рідинних теплообмінних апаратів, в яких протікають холодний та гарячий теплоносії та визначення їхньої усередненої температури. Далі проводиться розрахунок електричних параметрів генератора.

При вирішенні даної задачі необхідно виконати конструктивний тепловий та гідродинамічний розрахунок теплообмінного апарату, який полягає у визначенні величини його поверхні теплообміну та потужності, необхідної для переміщення кожного теплоносія у теплообміннику [8].

3.1.2 Теплотехнічний розрахунок теплообмінника

Теплотехнічний розрахунок базується на спільному розв'язанні рівнянь теплового балансу та теплопередачі.

Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q = G_1 \Delta i_1 = G_2 \Delta i_2, \quad (3.1)$$

де Q - теплова потужність теплообмінника (кількість теплоти, що передається в одиницю часу),

G_1 та G_2 - витрати первинного (гарячого) та вторинного (холодного) теплоносіїв,

Δi_1 і Δi_2 - зміна ентальпії первинного та вторинного теплоносіїв.

Рівнянню (3.1) можна надати різної форми залежно від конкретних умов протікання процесу. При теплообміні без фазових перетворень, наприклад, воно може бути записане у вигляді:

$$\Delta i = c_{pm} (T' - T''), \quad (3.2)$$

де T' , T'' - початкова та кінцева температури теплоносія,
 c_{pm} - середня питома теплоємність теплоносія в інтервалі температур (T'' - T').

Рівняння теплопередачі для розрахунку теплообмінників має вигляд:

$$Q = kFAT_{cp}, \quad (3.3)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі,
 F – поверхня теплообміну,
 AT_{cp} – середній температурний напір.

Для теплового розрахунку теплообмінного апарату необхідно визначення температурного напору, коефіцієнта теплопередачі, а також коефіцієнта тепловіддачі від теплоносіїв до стінки теплообмінного апарату.

Вид розрахункової формули визначення середнього температурного напору залежить від напрямку руху теплоносіїв, які можуть рухатися за схемою: прямотоку, протитечії, перехресного струму і змішаного струму. При прямотоці та протитечії середній температурний напір визначається як середній логарифмічний:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{\delta} - \Delta T_{m}}{\ln \frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{m}}}, \quad (3.4)$$

де ΔT_{δ} та ΔT_{m} - більший і менший температурні напори між теплоносіями на вході та виході з теплообмінника.

Якщо товщина стінок труб невелика порівняно з діаметром ($d_2/d_1 < 2$), то для визначення коефіцієнта теплопередачі може бути використана формула для плоскої стінки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.5)$$

де α_1 і α_2 - коефіцієнти тепловіддачі із зовнішньої та внутрішньої сторін стінки,

δ - товщина стінки теплообмінного апарату,

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки.

Забруднення поверхні теплообміну враховується коефіцієнтом використання поверхні теплообміну. У цьому випадку коефіцієнт теплопередачі визначається з урахуванням поправного коефіцієнта ψ :

$$k_1 = k \psi, \text{ де } \psi = 0,74 \div 0,8.$$

Співвідношення визначення коефіцієнтів тепловіддачі залежить від характеру теплообміну теплоносіїв зі стінкою теплообмінного апарату, і навіть його конструктивного виконання. Можливі наступні випадки.

1. Тепловіддача при течії рідини в гладких трубах:

Для ламінарного режиму течії середній коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою [8]:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,33} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25} \cdot \xi_l, \quad (3.6)$$

Для турбулентного режиму течії середній коефіцієнт тепловіддачі визначається за такою формулою:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25} \cdot \xi_l, \quad (3.7)$$

де $Re = \frac{vd}{\nu}$ - критерій Рейнольдса,

$Pr_{жс} = \frac{\nu}{a}$ - критерій Прандтля за середньої температури рідини,

$Pr_{ст.}$ - критерій Прандтля за середньої температури стінки,

$Gr = \frac{g\beta\Delta Td^3}{\nu^2}$ - критерій Грасгофа при середній температурі рідини,

d - визначальний розмір, м,

v - середня швидкість руху рідини,

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини,

a - коефіцієнт теплопровідності рідини,

g - прискорення вільного падіння;

β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення,

$\Delta T = T_{жс} - T_c$ – температурний напір між середньою температурою рідини і середньою температурою стінки,

ξ_l - коефіцієнт, що враховує зміну середнього коефіцієнта тепловіддачі по довжині труби.

2. Тепловіддача при вимушеному поперечному обмиванні труби: - тепловіддача при поперечному обмиванні одиночної круглої труби може бути розрахована за співвідношенням [8]:

$$Nu = 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст.}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 5 < Re < 10^3,$$

$$Nu = 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст.}} \right)^{0,25}, \quad \text{при } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \quad (3.8)$$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,37} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст.}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6.$$

У даних формулах за визначальний лінійний розмір прийнято зовнішній діаметр труби, а за визначальну температуру - середню температуру рідини. Виняток становить $Pr_{ст}$, що вибирається за середньою температурою стінки труби.

Наведені вище співвідношення справедливі, якщо кут ϕ , утворений напрямком потоку і віссю труби, який називають кутом атаки, дорівнює 90° . Якщо кут $\phi < 90^\circ$ тепловіддача зменшується. Для оцінки її зменшення при $\phi = 30\dots 90^\circ$ застосовується залежність:

$$\alpha_\phi = \alpha_{\phi=90} (1 - 0,54 \cdot \cos^2 \phi),$$

де $\alpha_\phi, \alpha_{\phi=90}$ - коефіцієнти тепловіддачі відповідно при $\phi < 90^\circ$ і $\phi = 90^\circ$ - тепловіддача при поперечному обмиванні пучків труб.

Найчастіше зустрічаються два основних типи трубних пучків: шаховий та коридорний. Виділяють три основні режими омивання і тепловіддачі в трубних пучках, що поперечно омиваються: ламінарний, змішаний і турбулентний. З досліджень тепловіддачі зроблено ряд загальних висновків: середня тепловіддача першого ряду різна і визначається початковою турбулентністю потоку; починаючи приблизно з третього ряду, середня тепловіддача стабілізується, так як у глибинних рядах ступінь турбулентності потоку визначається компонуванням пучка, що є системою пристроїв, що турбулізують. Тепловіддача пучків труб залежить від відстані між трубами. Цю відстань прийнято виражати як безрозмірні характеристики S_1/d і S_2/d , які називаються відповідно відносними поперечним і поздовжнім кроками.

При змішаному режимі ($Re \cong 10^3 \dots 10^5$) середній коефіцієнт тепловіддачі певного ряду пучка визначається за такою формулою:

$$Nu = c Re^n Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \xi_i \cdot \xi_s, \quad (3.9)$$

де $c = 0,41$ та $n = 0,6$ - для шахових пучків; $c = 0,26$ та $n = 0,65$ - для коридорних пучків.

Визначальним розміром є зовнішній діаметр трубок пучка. За визначальну температуру приймається середня температура рідини. Швидкість рідини, що входить у критерій Re , підраховується за вузьким поперечним перерізом ряду пучка. Поправочний коефіцієнт ξ_s враховує вплив відносних кроків. Для глибини рядів коридорного пучка $\xi_s = (S_2/d) - 0,15$, для шахового при $S_1/S_2 < 2$ $\xi_s = (S_1/S_2)^{\frac{1}{6}}$, при $S_1/S_2 > 2$ $\xi_s = 1,12$; ξ_i - поправний множник, що враховує зміну тепловіддачі у початкових рядах труб. При $S_2/d \leq 4$ поправку ξ_i можна визначити за діаграмою, наведеною в [8].

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі всього пучка в цілому необхідно провести осереднення середніх значень $\bar{\alpha}$, отриманих для окремих рядів:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (3.10)$$

де α_i - середній коефіцієнт тепловіддачі i -го ряду,

F_i - сумарна поверхня теплообміну трубок i -го ряду, n - число рядів у пучку.

Якщо $F_1=F_2=\dots=F_n$ формула спрощується:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + (n-2)\bar{\alpha}_3}{n}, \quad (3.11)$$

де $\alpha_1 = \varepsilon_1 \alpha_3$, $\alpha_2 = \varepsilon_2 \alpha_3$.

Для чисел $Re = 10 \dots 200$ - для шахових пучків та $Re = 10 \dots 150$ - для коридорних пучків формула має вигляд:

$$Nu = c Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.12)$$

де $c = 1,8$ - для шахового пучка; $c = 1,2$ - для коридорного пучка.

При $Re > 2 \cdot 10^5$ тепловіддача глибинних рядів шахового та коридорного пучків розраховується за формулою:

$$Nu = 0,021 Re^{0,84} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25} \quad (3.13)$$

Для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі при ламінарному режимі течії використовують рівняння:

$$Nu = 0,66 Re^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25} \quad (3.14)$$

При турбулентному режимі течії середній коефіцієнт тепловіддачі визначається за такою формулою:

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{см}} \right)^{0,25} \quad (3.15)$$

Для повітря $Pr=0,71$ і тому розрахункові формули для середньої тепловіддачі спрощуються:

- для ламінарного режиму течії

$$Nu = 0,57 Re^{0,5} \quad (3.16)$$

- для турбулентного режиму течії

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} \quad (3.17)$$

Ці формули використовуються при умові, що температура пластини постійна, тобто не змінюється за довжиною. В якості визначальної температури вибирають температуру потоку, що протікає, а визначального розміру - довжину пластини.

При вирішенні критеріальних рівнянь (3.6) та (3.7) необхідно знати середню температуру стінки. Обчислити температуру стінки можна,

попередньо визначивши величини коефіцієнтів тепловіддачі, які за умов не задані. Тому поставлене завдання вирішують методом послідовних наближень, задаючись значенням температури стінки. Якщо умовні еквіваленти W_1 і W_2 одного порядку, що має місце у випадку водоводяних теплообмінників (де $W=G \cdot c \cdot p$), то може задатися $T_{cm.cp}=(T_1+T_2)/2$ де T_1 і T_2 - середні температури теплоносіїв. Потім знаходять коефіцієнти тепловіддачі за критеріальними рівняннями та за ними температури стінок з боку первинного теплоносія T_{CT1} та з боку вторинного теплоносія T_{CT2} за рівностями:

$$T_{CT1} = T_1 - \frac{q}{\alpha_1} \quad a \quad T_{CT2} = T_{CT1} - q \frac{\delta}{\lambda}, \text{ де } q = k \cdot \Delta T_{cp} = \alpha_1 |T_1 - T_{cp}|$$

Середня температура стінки дорівнює

$$T_{cm.cp} = \frac{T_{CT1} + T_{CT2}}{2}.$$

3.1.3 Гідравлічний розрахунок теплообмінника

Мета цього розрахунку теплообмінника полягає у визначенні витрат механічної енергії на переміщення теплоносіїв в апараті. При гідравлічному розрахунку теплообмінника необхідно враховувати опір тертя, місцеві опори та тепловий опір.

Останній опір обумовлений прискоренням потоку внаслідок зміни об'єму теплоносія при постійному перерізі каналу, що пов'язано зі зміною температури. Для рідин цим опором можна зневажити.

Опір тертя під час руху теплоносія в каналах визначається за формулою:

$$\Delta P_T = \xi \frac{\ell}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.18)$$

де ℓ і d - довжина та гідравлічний діаметр каналу;

ξ - коефіцієнт опору тертя.

При неізотермічній течії рідини величина коефіцієнта залежить не тільки від критерію Re , але і від критеріїв Gr і Pr . Так, за турбулентного режиму течії маємо

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.19)$$

Місцеві опори визначають за такою формулою:

$$\Delta P_m = \xi \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.20)$$

в якій коефіцієнт ξ залежить від виду місцевого опору (раптове звуження, поворот тощо). При поздовжньому омиванні пучків труб вздовж осі опір підраховується за формулами для прямих каналів, де у формули підставляється еквівалентний гідравлічний діаметр $d_{екв} = 4f/u$. При поперечному обмиванні пучків значення коефіцієнта опору визначається формулами:

$$\text{для шахових пучків при } \frac{x_1}{d} < \frac{x_2}{d}, \xi = (4 + 6,6m) Re^{-0,28},$$

$$\text{для шахових пучків при } \frac{x_1}{d} > \frac{x_2}{d}, \xi = (5,4 + 3,4m) Re^{-0,28},$$

$$\text{для коридорних пучків } \xi = (6 + 9m) \left(\frac{x_1}{d} \right)^{-0,23} Re^{-0,26}.$$

У цих формулах швидкість віднесена до найвужчого перерізу пучка, фізичні властивості - до середньої температури потоку; m - число рядів у пучку в напрямку руху.

Тепловий опір можна підрахувати як подвоєну різницю швидкісних напорів наприкінці та на початку каналу:

$$\Delta P_{тепл} = 2 \left(\frac{\rho_2 v_2^2}{2} - \frac{\rho_1 v_1^2}{2} \right), \quad (3.21)$$

де ρ - щільність,

v - середня швидкість течії.

Загальний опір кожного теплоносія визначається як сума всіх видів опору в елементах теплообмінника [8]:

$$\Delta P = \sum \Delta P_m + \sum \Delta P_{\text{м}} + \sum \Delta P_{\text{тепл}} \quad (3.22)$$

Потужність, необхідна для переміщення кожного теплоносія в теплообміннику, визначається за формулою:

$$N = \frac{\Delta P G}{1000 \rho \eta}, \quad (3.23)$$

де G і ρ - масова витрата та середня щільність теплоносія;

η - ККД пристрою (насоса) для переміщення теплоносія ($\eta = 0,4 \dots 0,6$).

У відповідність до розглянутої методики розрахунку рідинних теплообмінних апаратів, що використовуються для прокачування холодного та гарячого теплоносія вздовж спаїв ТЕГ, отримані графіки залежності зміни коефіцієнта теплопередачі між ними та спаями ТЕ при різних швидкостях рідин, а також підводиться до останніх потужності при фіксованому значенні коефіцієнта теплопередачі від різниці температур із навколишнім середовищем (рис.3.1 - 3.2). Передбачалося, що матеріал теплообмінних апаратів - алюміній (рис.3.2), його довжина-ширина: 400 мм - 100 мм.

Згідно з представленими графіками для забезпечення необхідної різниці температур між спаями ТЕГ, можуть бути використані типові теплообмінні теплообмінні апарати. При цьому очевидно, що підвищення швидкості протікання в них теплоносія є вигіднішим з точки зору рівня відведення теплоти. Так, при швидкості течії теплоносія 1,5 м/с при перегріві 30 К значення коефіцієнта тепловіддачі становить 24 Вт/(м²·К), що відповідає 90 Вт потужності, яка відводиться. Цю обставину підтверджує і рис.3.3, на якому представлена залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості руху теплоносія.

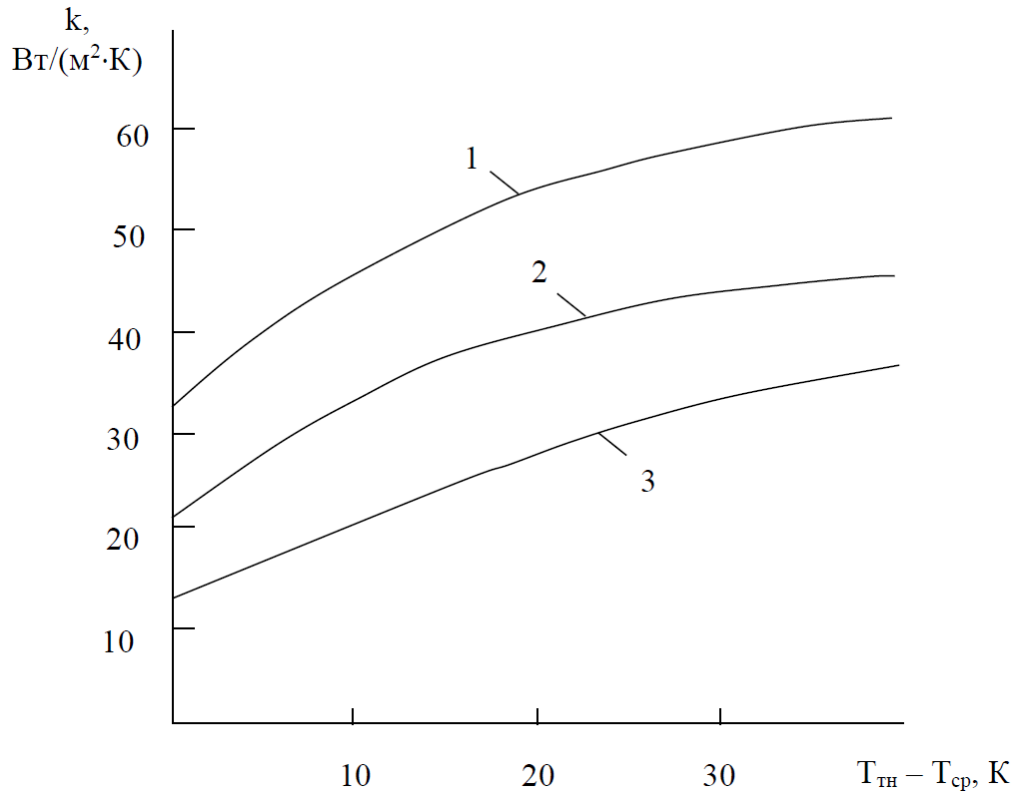


Рисунок 3.1 - Залежність коефіцієнта тепловіддачі від перегріву тракту при різних швидкостях руху води 1-1,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 0,5 м/с

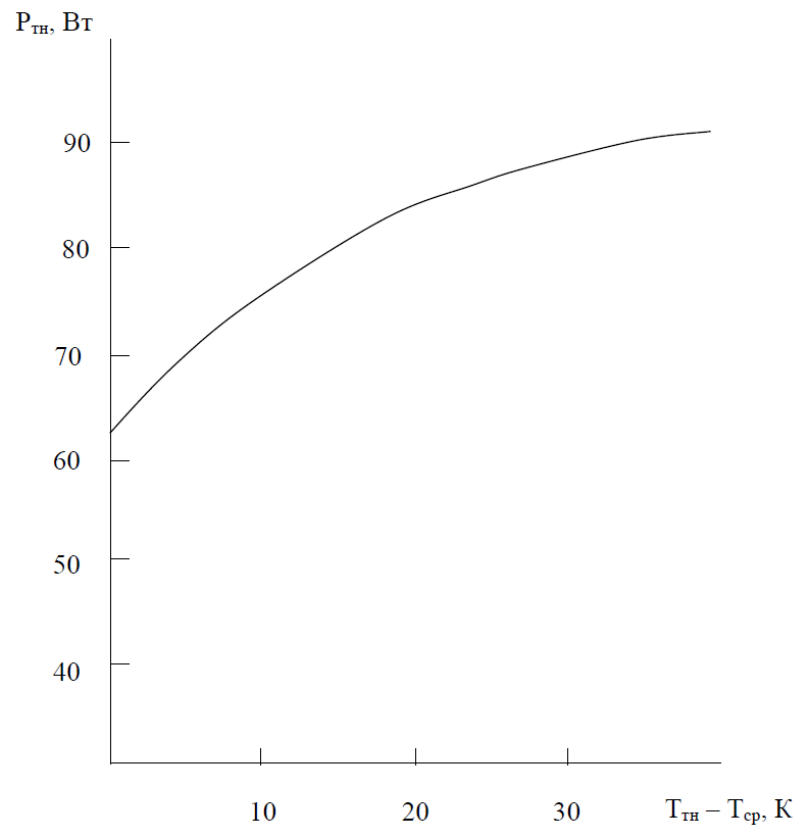


Рисунок 3.2 - Залежність потужності, що розсіюється рідинним тепловідведенням від перегріву тракту при $k = 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

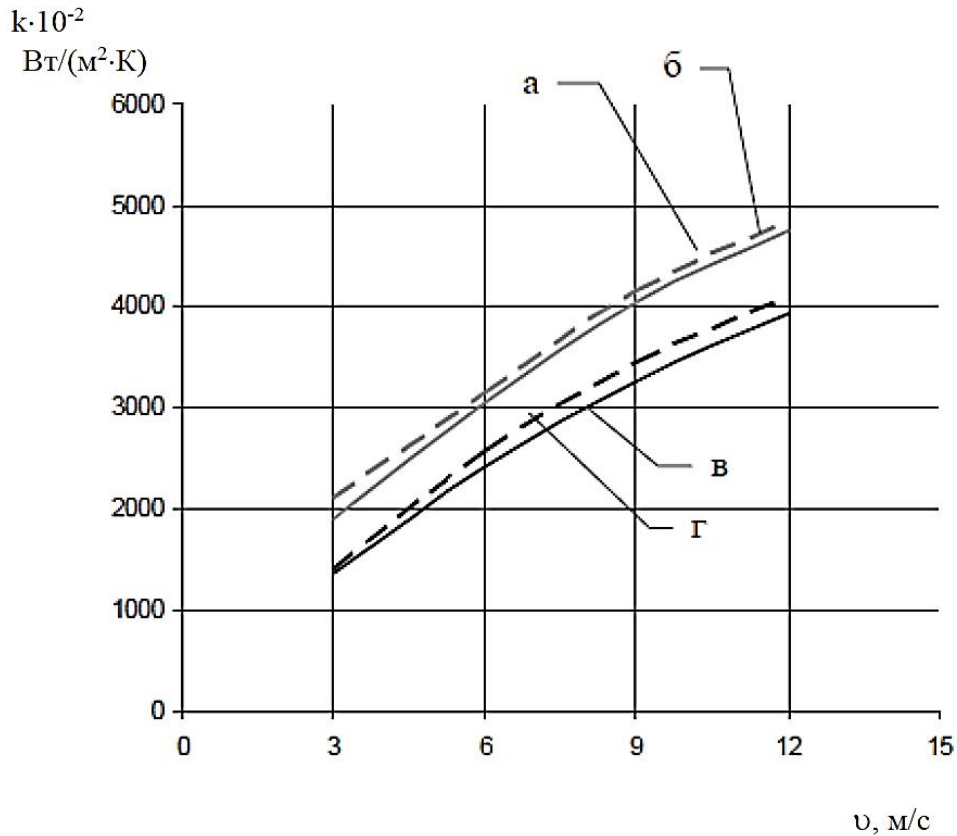


Рисунок 3.3 - Залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості руху теплоносія:

- а – середнє ребро, матеріал радіатора мідь;
- б - крайнє ребро, матеріал радіатора мідь,
- в - крайнє ребро, матеріал радіатора алюміній,
- г - середнє ребро, матеріал радіатора алюміній

3.2 Розрахунок генератора електричної енергії

Розглянемо роботу термоелемента, працюючого як генерації електричної енергії (рис.3.4). Класичний термоелемент складається з двох віток, які електрично за допомогою комутаційних елементів з'єднані послідовно. Вітки виготовляються з напівпровідникового термоелектричного матеріалу: один р-, а інший n-типу провідності. Наявність віток різних типів провідності дозволяє складати їх термо-е.р.с. за допомогою комутаційних елементів, які безпосередньо припаюються до віток термоелемента. До комутаційних елементів на холодному спаї термоелемента приєднується навантаження R .

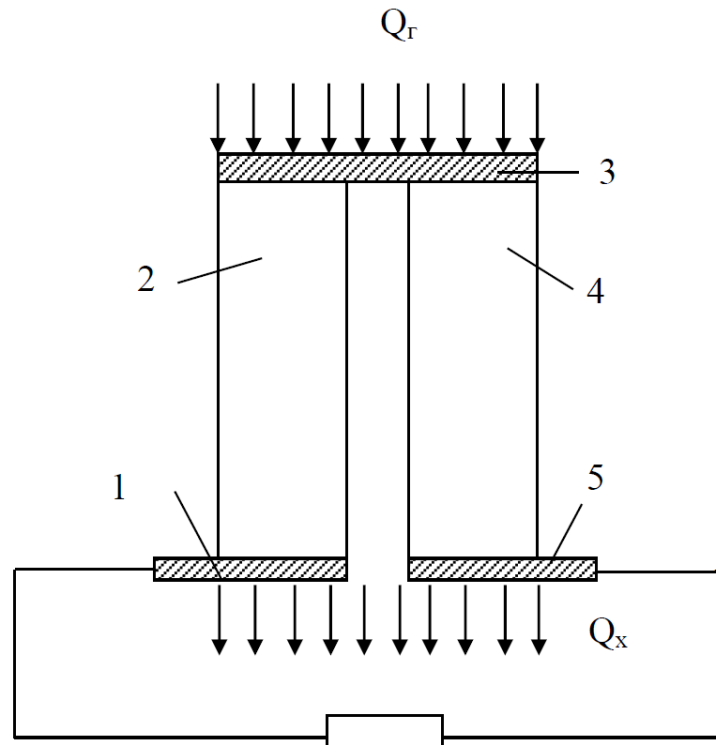


Рисунок 3.4 - Схематичний розріз термоелемента, що працює в режимі ТЕГ

Якщо до гарячого спаю термоелемента підвести деякий потік теплоти Q_r при температурі T_r , а від холодного спаю відвести деякий потік тепла Q_x при температурі T_x , то під дією перепаду температур на спаях термоелемента ΔT , згідно з ефектом Зеебека, виникне термо-е.р.с. E_{TE} . За умови незалежності термоелектричних властивостей від температури

$$E_{TE} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T \quad (3.24)$$

де α_p та α_n - абсолютні величини коефіцієнтів термо-е.р.с. віток р- та n-типів відповідно.

Під дією термо-е.р.с. E замкненого кола термоелемента, що включає корисне навантаження R , потече електричний струм I .

Внутрішній опір термоелемента r_{TE} складається з опорів віток відповідно r_p і r_n і опору комутаційного елемента r_k :

$$\Gamma_{TE} = \Gamma_p + \Gamma_n + \Gamma_k .$$

Подамо опір комутаційного елемента у вигляді відносної величини

$$k = \frac{r_k}{r_p + r_n} ,$$

а величини опорів віток представимо через їх геометричні розміри та питомі опори термоелектричних матеріалів.

Тоді

$$r_{TE} = \left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (l + m) \quad (3.25)$$

де S_p і S_n - площі поперечних перерізів віток відповідно р- та n-типів,
 ρ_p і ρ_n - питомі опори віток термоелемента відповідно р-і n-типів;
 ℓ - довжина віток.

Повний опір термоелектричного кола дорівнює $r_{TE} + R$. Подаємо також корисне навантаження у вигляді відносної величини $K = R/r_{TE}$, яка називається відносним корисним навантаженням. Тоді загальний опір кола дорівнює $r_{TE}(1 + K)$. Таким чином, згідно із законом Ома, струм у колі ТЕБ визначатиметься виразом:

$$I = \frac{E_{TE}}{(1 + K)r_{TE}} , \quad (3.26)$$

а напруга на навантаженні:

$$U = \frac{K}{1 + K} E_{TE} \quad (3.27)$$

Корисна електрична потужність, що виробляється ТЕГ, визначатиметься за формулою

$$W_{TE} = UI = \frac{K}{(l+K)^2} \frac{E_{TE}^2}{r_{TE}} = \frac{K}{(l+K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n}\right)(l+k)} \quad (3.28)$$

Відношення $\frac{E_{TE}^2}{r_{TE}}$ є максимальною електричною потужністю, що виробляється в колі термоелемента, коли опір цього кола мінімальний, тобто при $R = 0$. Зазначений випадок відповідає режиму короткого замикання.

Значення $\frac{K}{(l+K)^2}$ визначає зменшення електричної потужності через незворотні джоулеві втрати на внутрішньому опорі термоелемента. Разом із втратами теплоти за рахунок кінцевої теплопровідності термоелектричних матеріалів джоулеві втрати є основними незворотними процесами в термоелементі.

Енергетичні властивості ТЕГ визначаються його коефіцієнтом корисної дії ξ - відношенням вихідної корисної електричної потужності P до теплової вхідної потужності:

$$\xi = P/Q. \quad (3.29)$$

ККД ТЕГ залежить від:

- властивостей напівпровідникових матеріалів (коефіцієнта теплопровідності, питомого опору та коефіцієнта термо-е.р.с.;
- різниці температур між спаями ТЕБ;
- відносини опору навантаження до внутрішнього опору термоелемента.

Максимальне значення ККД термоелемента визначається за такою формулою:

$$\xi_{\max} = \frac{(T_1 + T_2) \sqrt{1 + ZT_{cp} - 1}}{T_2 \sqrt{1 - ZT_{cp} + (T_1 / T_2)}}, \quad (3.30)$$

де $T_{cp} = (T_1 + T_2) / 2$,

$$Z = (a_1 + a_2)^2 / (\sqrt{\lambda_1 \rho_1} \sqrt{\lambda_2 \rho_2})$$

Сенс параметра Z може бути зрозумілий виходячи з таких міркувань. Термо-е.р.с. при різниці температур ΔT тим більше, чим більший коефіцієнт термо-е.р.с. α , а найбільша потужність на навантаженні пропорційна величині a^2/ρ , що те саме a^2/σ , де σ - питома провідність речовини. Різниця температур ($\Delta T = T_r - T_x$) визначається теплопровідністю віток ТЕБ λ_1 і λ_2 . Чим менше значення λ , тим більше ККД перетворювача.

Наведені вище формули дають можливість обчислити всі електричні параметри ТЕГ, а також його ККД, якщо відомі його розміри, властивості матеріалів, а також кількість теплоти, що підводиться до його спаїв.

Е, В

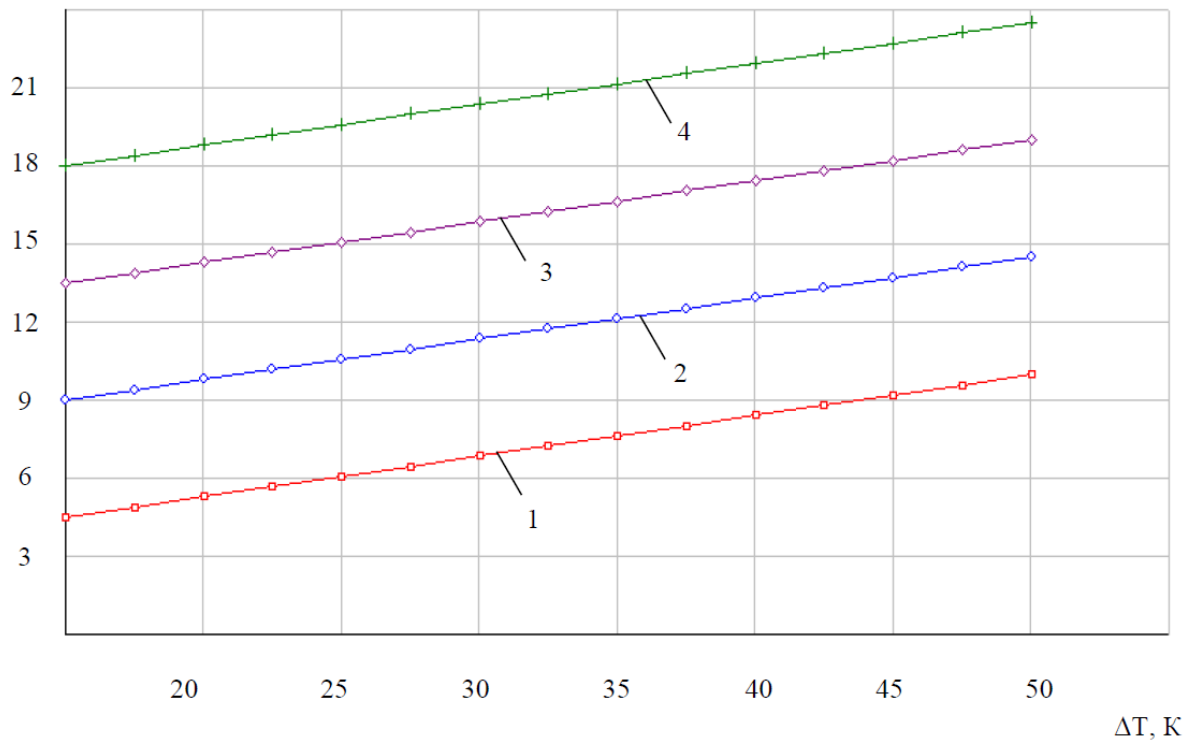


Рисунок 3.5 - Залежність зміни величини ЕРС від перепаду температур між спаями ТЕГ при різних коефіцієнтах теплообміну з навколишнім

середовищем:

$$1 - \alpha_{\text{ср}} = 1,5 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К},$$

$$2 - \alpha_{\text{ср}} = 2,5 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К},$$

$$3 - \alpha_{\text{ср}} = 3,5 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К},$$

$$4 - \alpha_{\text{ср}} = 4,5 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К},$$

Грунтуючись на знайденому раніше значенні потужності, що підводиться і відводиться до спаїв термоелектричного генератора, а також припускаючи наступні параметри термоелектричного матеріалу: теплопровідність - $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, питомий електричний опір - $10,65 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, теплоємність - $123 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, коефіцієнт термо-е.р.с. - $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$, та розміри віток термоелементів - $2\text{-}2\text{-}2 \text{ мм}$ - на рис 3.5 - 3.6 наведено основні характеристики досліджуваного приладу.

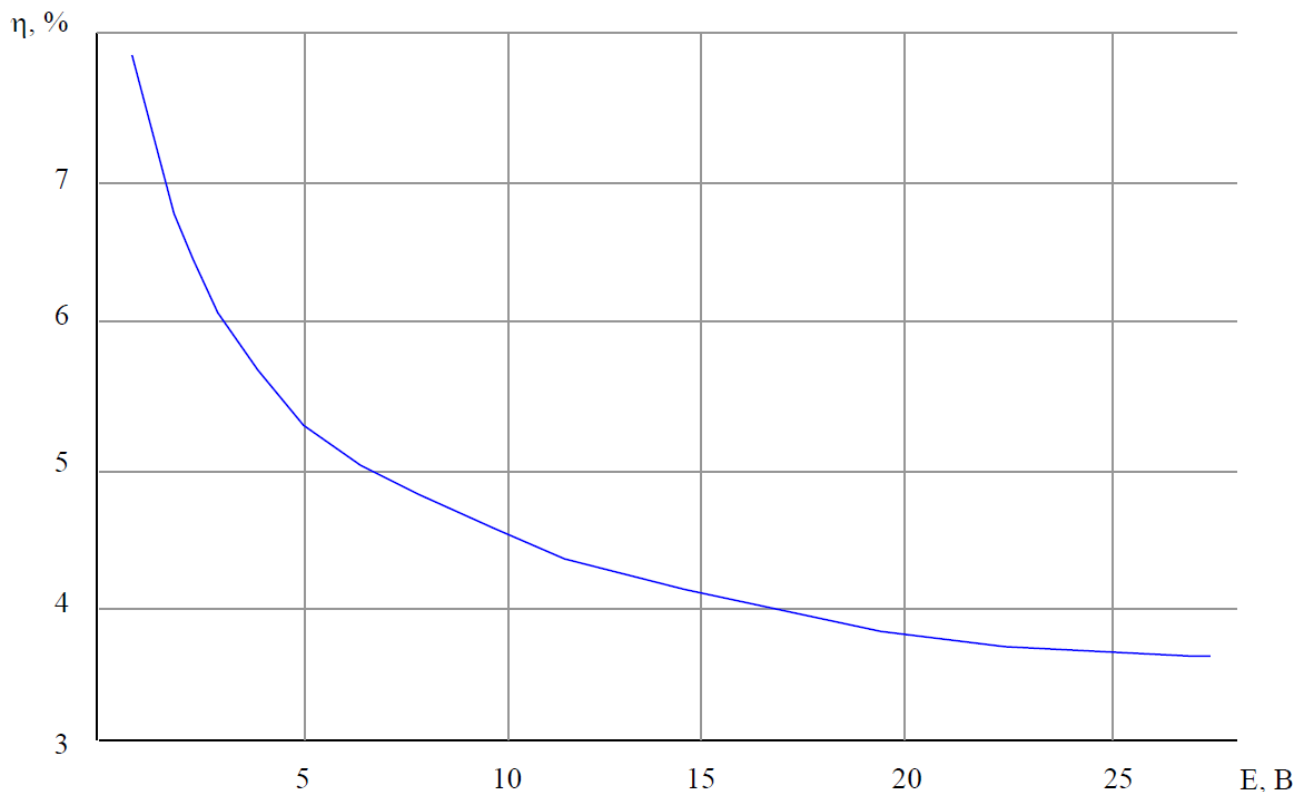


Рисунок 3.6 - Залежність зміни ККД ТЕРГ від термо-ЕРС

3.3 Висновок до розділу

1. При моделюванні ТЕРГ визначено його вихідні електричні параметри, зокрема значення ЕРС, що генерується, а також коефіцієнт корисної дії. Моделювання генератора зроблено у два етапи. Першим етапом став розрахунок рідинних теплообмінних апаратів, в яких протікають холодний і гарячий теплоносії та визначення їх усередненої температури. Далі проводився розрахунок електричних параметрів ТЕРГ.

2. Відповідно до отриманих результатів моделювання коефіцієнта тепловіддачі та розсіяної потужності радіатором для забезпечення необхідної різниці температур між спаями ТЕГ, можуть бути використані типові теплообмінні апарати. При цьому підвищення швидкості протікання в них теплоносія є вигіднішим з точки зору рівня відведення теплоти. Так, при швидкості руху теплоносія 1,5 м/с при перегріві 30 К значення коефіцієнта тепловіддачі становить $24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, що відповідає 90 Вт потужності, яка відводиться.

3. Обчислено електричні параметри ТЕГ. Знайдено залежності зміни величини ЕРС від перепаду температур між спаями ТЕГ при різних коефіцієнтах теплообміну з навколишнім середовищем та залежність зміни ККД ТЕГ від термо-ЕРС.

4. Сукупність результатів проведених досліджень дає можливість використовувати їх як наукову основу надалі при створенні нових високоефективних ТЕГ.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.

Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва тощо.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному - біля 15-20 %. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80 % електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пац тою понад 1 кВ, - до 20-30 %.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань

електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групи з електробезпеки [20].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

- електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

- розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

4.2 Можливість виникнення статичної електрики та заходи боротьби з нею

Наслідки спричинені електризацією, свідчать про необхідність здійснення заходів щодо попередження небезпечної і шкідливої дії статичної електрики на організм людини [20].

Статична електрика - це процес утворення і розділення зарядів у просторі при контакті двох матеріалів, якщо хоча б один з них є діелектриком. Підвищений рівень статичної електрики відноситься до групи фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Суть електризації заключається в тому, що діелектрики за певних умов стають електрично зарядженими. При цьому заряди не виникають і не зникають, а переходять з одного електризованого тіла на інше, накопичуються на поверхнях їх стикання чи переміщуються в межах одного й того ж тіла. Статична електрика може з'являтися на тілах і через індукцію, тобто через взаємодію на відстані. В основному виробництві харчової промисловості це можуть бути процеси помелу зерна, просіювання, транспортування трубопроводах борошна, процеси, пов'язані з приготуванням цукрової пудри, перевезенням чи транспортуванням по трубопроводах спирту, сухих дріжджів, розміщенням і фільтруванням рідин; технологічні процеси, пов'язані із застосуванням плоскопасових передач, транспортерів і т.д.

Статична електрика при розділенні контактів двох тіл особливо добре проявляється в пасових передачах (транспортерах). Електричні заряди протилежних знаків з'являються на пасі і шківі при порушенні поверхні контакту в місці збігання пасу зі шківа. і йому в деяких випадках різниця потенціалів може досягати 80 кВ.

Якщо напруженість електричного поля перевищує електричну міцність середовища (повітря), то відбувається розряд статичної електрики. Основною причиною, що характеризує здатність різних матеріалів проводити струм, а також визначає їх здатність до електризації, є питомий електричний опір. Умовно прийнято, що при питомому електричному опорі речовин і матеріалів порядку менше 10 Ом•м заряди не накопичують і безпеки не являють. Якщо ж опір високий і велика швидкість відриву поверхні, то заряди зберігаються. Величина зарядів визначається природою матеріалу і швидкістю розділення поверхонь, тобто інтенсивністю технологічного процесу.

Розряди статичної електрики являються одними з можливих імпульсів спалахування і вибухів в харчовій промисловості, що зв'язано, в першу чергу, із застосуванням сильно електризуючих речовин і матеріалів (горючі рідини, пил органічного походження). Електризація рідин приводить до спалахування і вибухів втричі частіше, ніж електризація дрібнодисперсних матеріалів, оскільки мінімальна енергія запалювання пилово-вітряних сумішей з 10...100 раз менше.

При протіканні рідин величина заряду залежить від діелектричної сталої, її забрудненості, шорсткості стінок, швидкості протікання і діаметра труб.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів повинен здійснюватись в двох напрямках: усунення електричних зарядів або зменшення їх до безпечних величин.

У харчовій промисловості статична електрика усувається заміною горючих середовищ негорючими. Для промивання ємкостей, трубопроводів, наприклад замість бензину, гасу слід використовувати пожежобезпечні розчинники (їдкий натр або калі, компоненти із рідкого скла, контакт Петрова, ОП-7 або ОП-10); підтриманням концентрації горючих речовин за межами вибуховості. Проводиться з урахуванням вимог і можливостей технологічного процесу; нанесенням на діелектричне устаткування електропровідних покриттів; відведенням зарядів від людей у виробництвах, де існує небезпека спалаху горючих сумішей розрядом з людини; зволоженням навколишнього середовища, якщо це допускається за умовами технологічного процесу. Якщо це неможливо, то може застосовуватись місцеве зволоження, шляхом направлення розпилюючого струменя на поверхні, з яких необхідно відвести статичні заряди; забезпеченням проявів заряду в тих місцях, де немає горючого і вибухонебезпечного середовища; збільшенням, об'ємної і поверхневої провідності діелектриків, які використовують для транспортування і зберігання рідин; іонізацією повітря індукційними, високовольтними, радіоактивними і комбінованими нейтралізаторами. Вибір кожного типу нейтралізатора проводиться з урахуванням середовища і характеристик іонізаторів; змінням технологічного процесу з метою усунення причин, що сприяють появі електризації; заземлення обладнання. Заземлення обладнання - один з важливих і обов'язкових заходів до захисту від статичної електрики.

Апарати, машини, пристрої, які можуть стати джерелами виникнення зарядів статичної електрики, повинні бути заземлені не менше ніж у двох місцях незалежно від заземлення усього технологічного кола.

Звичайні заземлюючі пристрої для захисту від розрядів статичної електрики об'єднують із заземлюючими пристроями для електрообладнання.

Заземлення повинно бути здійснене тільки паралельним приєднанням захисного обладнання. Допустимий опір заземленого пристрою для захисту від статичної електроенергії у вигляді малих струмів витрат допускається не більше 100 Ом.

Гнучкі трубопроводи для перекачування рідин, які здатні генерувати заряди (спирт, бензин, гас тощо), повинні мати металеве заземлене оплетення, а вихідні штуцери мають бути виконані із кольорових металів і з'єднані із заземленим металевим оплетенням.

Серед інших заходів, направлених на заземлення небезпечних проявів розрядів статичної електрики, слід відмітити такі, як заміна плоских пасів текстурними (клиновими); недопущення розприскування рідин при їх розливанні в ємності шляхом опущення завантажувальних труб на відстань не більше 0,2 м від днища приймальної посудини; зміна швидкості переміщення твердих і рідких матеріалів та ін.

4.3 Планування заходів цивільного захисту

Відповідно до [21]: «Планування цивільного захисту об'єкта — це розроблення сукупності документів, у яких визначені сили і засоби, порядок і послідовність дій з метою забезпечення захисту населення, виробництва, а також виконання завдань вищих органів, пов'язаних із поданням допомоги населенню інших об'єктів і міст. Ці документи, розроблені з урахуванням реальних можливостей і умов об'єкта, є настановою для організованих дій як з метою підготовки об'єкта до захисту в надзвичайних умовах, так із метою ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (стихійних лих, виробничих аварій і вогнищ воєнних конфліктів). На об'єкті мають бути розроблені два плани: на воєнний та мирний час. План цивільного захисту на воєнний час — це документи, які визначають організацію і порядок переведення об'єкта з мирного на воєнний час і ведення цивільного захисту в початковий період війни. План цивільного захисту на мирний час — це документи, які визначають організацію і порядок виконання заходів цивільного захисту з метою запобігання або

зменшення можливих втрат від важких виробничих аварій, катастроф, і стихійних лих, а також ведення рятувальних та інших невідкладних робіт при їх виникненні»

Як вихідні документи, що будуть використані при розробці документів плану цивільного захисту об'єкта, необхідні: директивні документи Президента, Верховної Ради, Уряду України та МНС; витяг із рішення керівника цивільного захисту району про організацію і ведення цивільного захисту на території району, дані про кількість формувань, їх особовий склад, які потрібно створити на даному об'єкті; витяг із плану прийому і розміщення евакуйованого населення; витяг із наряду райвійськкомату на постачання техніки у збройні сили у зв'язку з мобілізацією; окремі розпорядження керівника цивільного захисту району (наряд для виконання спеціальних завдань та ін.); документи, які характеризують господарство і населений пункт.

Об'єкт, що знаходиться на території одного або кількох населених пунктів, є основним об'єктом, який складає єдиний план разом з адміністрацією населеного пункту.

Розробка плану відбувається у три етапи в певній послідовності. Перший етап — підготовчий, протягом якого визначається склад виконавців і затвердження їх, підготовка виконавців до роботи, доведення до них директив, рекомендацій та інших документів, узагальнення й аналіз вихідних даних, необхідних для розробки плану ЦЗ, визначення обсягу робіт і розподіл обов'язків між виконавцями та закріплення відповідальних за розділами плану. Планування евакуації має передбачати виникнення найбільш несприятливих ситуацій під час підготовки і проведення евакуації: відсутність відповідних керівників, транспорту, електрозабезпечення, погані погодні умови, аварія на дорозі, паніка серед людей та ін. Другий етап — практична розробка, оформлення документів. Заходи, які плануються в документах плану, мають бути спрямовані на виконання завдань ЦЗ в надзвичайних ситуаціях. [13]

У документах плану визначають заходи, які потрібно виконати в мирний час, при загрозі виникнення надзвичайних ситуацій, несподіваному нападі противника, стихійних лихах, виробничих аваріях, катастрофах і при ліквідації

наслідків надзвичайних ситуацій, проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт, а також характер і порядок дій формувань, зміст і обсяг робіт, строки виконання заходів з урахуванням конкретних умов і можливостей даного об'єкта.

Оскільки заходи потребують матеріальних затрат, вони повинні здійснюватися у комплексі з іншими економічними заходами, через що їх необхідно включити в поточний і перспективний план об'єкта, де вони будуть забезпечені коштами.

Третій етап — узгодження розроблених планів із відділом ЦЗ району, з районним агропромисловим управлінням, адміністрацією населеного пункту, службами ЦЗ району, після цього затвердження документів плану ЦЗ. Документи плану ЦЗ підписує керівник — ЦЗ об'єкта, деякі (план евакуації, прийому і розміщення евакуйованого) підписує і начальник ЦЗ голова адміністрації населеного пункту. Зміст плану ЦЗ об'єкту узгоджується з вимогами плану ЦЗ району, що підтверджує начальник відділу з питань цивільного захисту населення району, після чого план ЦЗ затверджує керівник ЦЗ об'єкта.

Після затвердження плану об'єкта організовується вивчення документів усім керівним складом об'єкта.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У роботі, на основі критичного огляду літературних джерел, розглянуто прикладні аспекти термоелектричного перетворення енергії, вказано переваги існуючих ТЕГ. Розглянуто основні тенденції розвитку термоелектричного приладобудування, рівень промислового виробництва термоелектричних перетворювачів енергії та приладів на їх основі, проблеми, що обмежують практичне використання термоелектричної техніки.

2. Розглянуто безпосередньо конструкції термоелектричних перетворювачів та ТЕГ. Особливу увагу приділено можливостям підвищення енергетичної ефективності ТЕГ. Вивчено їх конструктивні варіанти та застосування у техніці.

3. Запропонована конструкція ТЕГ проточного типу, що характеризується наявністю теплообмінних апаратів з холодними і гарячими теплоносіями, які протікають в них, що контактують зі спаями термоелементів.

4. При моделюванні ТЕГ визначено його вихідні електричні параметри, зокрема значення ЕРС, що генерується, а також коефіцієнт корисної дії. Моделювання генератора зроблено у два етапи. Першим етапом став розрахунок рідинних теплообмінних апаратів, в яких протікають холодний і гарячий теплоносії та визначення їх усередненої температури. Далі проводився розрахунок електричних параметрів ТЕГ.

5. Сукупність результатів проведених досліджень дає можливість використовувати їх як наукову основу надалі при створенні нових високоефективних ТЕГ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ковальчин М.В. Галузі застосування термоелектричних генераторів // М.В. Ковальчин, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2022. – С
2. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2015. - № 3. - С. 2-10.
3. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern. : TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.
4. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204.
5. Saini A., Kumar R., Kumar R. Introduction and brief history of thermoelectric materials //Thermoelectricity and Advanced Thermoelectric Materials. – Woodhead Publishing, 2021. – С. 1-19.
6. Toshima N. Recent progress of organic and hybrid thermoelectric materials //Synthetic Metals. – 2017. – Т. 225. – С. 3-21.
7. Kumar R., Singh R. (ed.). Thermoelectricity and Advanced Thermoelectric Materials. – Woodhead Publishing, 2021..
8. Adalid V. A Review on Thermoelectric Devices //Journal of Undergraduate Research. – 2016. – Т. 9. – С. 57-60.
9. Ismail B. I., Ahmed W. H. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology //Recent Patents on Electrical &

Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering). – 2009. – T. 2. – №. 1. – C. 27-39.

10. Cheng F. Calculation methods for thermoelectric generator performance // *Thermoelectrics for Power Generation-A Look at Trends in the Technology*. – 2016. – C. 481-506.

11. Seifert W., Ueltzen M., Müller E. One-dimensional modelling of thermoelectric cooling // *physica status solidi (a)*. – 2002. – T. 194. – №. 1. – C. 277-290.

12. Cataldo, R. Spacecraft Power System Considerations for the Far Reaches of the Solar System. In *Outer Solar System*; Springer Science and Business Media LLC: Cham, Switzerland, 2018; pp. 767–790.

13. Arctic Submarine Lab History.: <https://web.archive.org/web/20130218182628/http://www.csp.navy.mil/asl/Timeline.htm>

14. Bonin, R.; Boero, D.; Chiaberge, M.; Tonoli, A. Design and characterization of small thermoelectric generators for environmental monitoring devices. *Energy Convers. Manag.* 2013, 73, 340–349.

15. BioLite-ROW, BioLite Outdoor & Off-Grid Energy|Rest-Of-World, BioLite-ROW. <https://row.bioliteenergy.com/>

16. Kishi, M.; Nemoto, H.; Hamao, T.; Yamamoto, M.; Sudou, S.; Mandai, M.; Yamamoto, S. Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source. In *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407)*, Baltimore, MD, USA, 29 August–2 September 1999; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2003; pp. 301–307/

17. Bhatnagar, V.; Owende, P. Energy harvesting for assistive and mobile applications. *Energy Sci. Eng.* 2015, 3, 153–173/

18. Birkholt, U. Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobiles Using FeSi₂ Thermoelements. In *Proceedings of the 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, Arlington, TX, USA, 16–18 March 1988

19. Magnetto, D. HeatReCar: First light commercial vehicle equipped with a TEG. In *Proceedings of the 3rd International Conference Thermal Management for EV/HEV*, Darmstadt, Germany, 23–26 June 2013

20. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.

21. Березуцький В.В. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник / В.В. Березуцький, Л.А.Васьковець Л.А., Н.П.Вершиніна та ін.; За ред. проф. В. В. Березуцько-го. –Х.: Факт, 2005. – 384 с.