

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електропобутова техніка

Розробка термоелектричного охолоджуючого пристрою

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу група ЕТс-22


Підпис

Магальяс Н.Л
Ініціали, прізвище

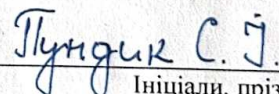
Керівник


Підпис, дата

старший викладач
Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата


Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС

2 . 06 . 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Магальяс Назар Любомирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка термоелектричного охолоджуючого пристрою**

Керівник роботи **Лісевич С.П., старший викладач**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **прототипи пристроїв для охолодження на основі термоелектричного ефекту, технологічні та технічні характеристики пристроїв для охолодження**

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

1 Аналіз термоелектричних явищ і технічних рішень для генерації холоду на основі термоелектричного ефекту

2 Розробка конструкції термоелектричного охолоджуючого пристрою на базі елементів Пельтьє

3 Розробка система тепловідведення та термоізоляції корпусу охолоджуючого пристрою

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Холодильні пристрої з термоелектричним охолодженням. Документ оглядовий (A1). **Аркуш 2.** Технологічні та технічні характеристики термоелектричного охолоджуючого пристрою. Документ технологічний (A1). **Аркуш 3.** Термоелектричний охолоджуючий пристрій. Схема комбінована (A1). **Аркуш 4.** Вентилятор термоелектричного охолоджуючого пристрою. Габаритне креслення (A1). **Аркуш 5.** Термоелектричний охолоджуючий пристрій. Вид загальний (A1). **Аркуш 6.** Термоелектричний охолоджуючий пристрій. Схема електрична (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1 Аналіз термоелектричних явищ і технічних рішень для генерації холоду на основі термоелектричного ефекту	05.05.25 р.	
2 Розробка конструкції термоелектричного охолоджуючого пристрою на базі елементів Пельтьє	20.05.25 р.	
3 Розробка система тепловідведення та термоізоляції корпусу охолоджуючого пристрою	10.06.25 р.	

Студент


Підпис

Магальяс Н.Л.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи



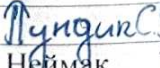

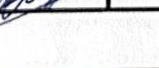

Підпис

Лісевич С.П.
Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз термоелектричних явищ і технічних рішень для генерації холоду на основі термоелектричного ефекту	8
1.1. Теоретичні основи отримання холоду за рахунок термоелектричного ефекту	8
1.2 Огляд літературних та технічних джерел, присвячених термоелектричним холодильним установкам.....	17
2 Розробка конструкції термоелектричного охолоджуючого пристрою на базі елементів Пельтьє	29
2.1 Постановка задачі на розробку термоелектричного охолоджуючого пристрою на базі елементів Пельтьє	29
2.2 Розробка функціональної схеми термоелектричного охолоджувального пристрою.....	30
2.3 Визначення параметрів та розрахунок термоелектричних елементів Пельтьє	32
2.4 Розроблення електричної схеми охолоджуючого пристрою на основі елементів Пельтьє.....	41
3 Розробка система тепловідведення та термоізоляції корпусу охолоджуючого пристрою.....	45
3.1 Розробка системи тепловідведення від термоелектричної батареї.....	45
3.2. Розробка вентиляційної системи тепловідведення від гарячих спаїв....	50
3.2.1 Розрахунок діаметру робочого колеса вентилятора охолодження.....	50
3.2.2 Розрахунок клемового з'єднання вентилятора охолодження	52

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Магальяс			Розробка термоелектричного охолоджуючого пристрою	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Лісевич				y	5	
Н.контр.					ХНУ, гр. ЕТс-22			
Затвер.		Неймак						

3.2.3 Оптимізація конфігурації лопатей вентилятора охолодження.....	53
3.3 Визначення раціональної товщини теплоізоляції корпусу термоелектричного пристрою	61
Висновки.....	66
Перелік джерел посилань.....	68
Додатки.....	70

ВСТУП

Аналіз сучасних пристроїв термоелектричного охолодження показує, що більшість конструкцій базуються на використанні однієї термоелектричної батареї, у якій холодні спаї контактують зі стінками холодильника, а гарячі — охолоджуються за допомогою вентилятора та радіатора. Однак такі системи мають низку суттєвих недоліків.

Зокрема, використання лише однієї термобатареї для охолодження є мало-ефективним, додаткові елементи охолодження не забезпечують помітного приросту продуктивності, теплоізоляція між теплообмінниками є недостатньою, а система відведення тепла від гарячих спаїв працює з низьким ККД. Як наслідок - спостерігається зниження холодопродуктивності, підвищене енергоспоживання і значне зменшення холодильного коефіцієнта агрегату.

Всі ці фактори знижують ефективність термоелектричних холодильників і потребують вдосконалення як конструктивних рішень, так і підходів до теплового моделювання.

Тому метою даної роботи є теоретичне й практичне обґрунтування застосування термоелектричного ефекту для створення холоду, визначення оптимальних режимів роботи термоелектричної батареї, а також розробка конструкції холодильника з удосконаленою системою охолодження.

У межах цієї роботи передбачається:

- розробка термоелектричного охолоджуючого пристрою на основі елементів Пельтьє;
- впровадження ефективної системи вентиляційного охолодження гарячих спаїв для підвищення холодопродуктивності;
- поліпшення теплоізоляції між теплообмінними поверхнями;
- визначення оптимальної товщини термоізоляції корпусу;
- підвищення енергоефективності пристрою за рахунок вдосконаленого тепловідведення.

									Арк.
									7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

1 АНАЛІЗ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ЯВИЩ І ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ХОЛОДУ НА ОСНОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ

1.1. Теоретичні основи отримання холоду за рахунок термоелектричного ефекту

Термоелектричне перетворення енергії є методом прямої трансформації теплової енергії в електричну, що базується на електронних переходах, які виникають у твердотільних матеріалах.

Термоелектричні джерела енергії мають низку унікальних переваг: відсутність рухомих частин, можливість ефективного використання джерел низькопотенційного тепла, екологічна безпечність, а також простота керування процесом. Завдяки цим характеристикам термоелектричні системи охолодження знаходять широке застосування як у промисловості, так і в побутових умовах.

Явище термоелектричного охолодження вперше було відкрито і описано Жаном Пельтьє. Суть ефекту полягає в тому, що при проходженні електричного струму через замкнений ланцюг, утворений двома різнорідними напівпровідниками, в місці їхнього контакту відбувається або поглинання, або виділення тепла. Це означає, що залежно від напрямку струму одне з'єднання охолоджується, а інше нагрівається.

Подальші наукові дослідження розкрили фізичну природу ефекту Пельтьє і довели, що кількість тепла, яке поглинається або виділяється у спаю напівпровідників, є пропорційною до сили струму, тривалості його протікання і коефіцієнта добротності. Останній залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалів, з яких виготовлені напівпровідникові елементи. У термоелектричних холодильних пристроях охолоджувальний ефект забезпечується рухом електронно-діркового газу в структурі напівпровідника.

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

Термоелектричні енергетичні перетворювачі мають низку додаткових переваг, які роблять їх привабливими для застосування в системах охолодження та температурного контролю:

- можливість як охолодження, так і нагрівання залежно від режиму роботи та електричних параметрів;
- висока надійність елементів, відповідальних за генерацію холоду;
- здатність до швидкого охолодження за рахунок використання сучасних високоефективних термоелектричних модулів;
- точне регулювання температури з можливістю термостатування шляхом зміни напрямку або величини електричного струму;
- стабільність робочих характеристик модулів, низька чутливість до механічних навантажень і зовнішніх впливів;
- простота експлуатації, що не потребує складного технічного обслуговування.

У процесі роботи термоелектричного модуля одночасно проявляються три основні фізичні явища: ефект Пельтьє, ефект Зеебека та ефект Томпсона, що спільно формують загальну ефективність термоелектричного перетворення енергії.

Для нашої розробки, ми будемо детально розглядати явище Пельтьє та його застосування у термоелектричних охолоджуючих пристроях.

Суть ефекту Пельтьє полягає в тому, що при рухові постійного електричного струму через термоелектричний елемент, на одному з'єднанні (спаї) відбувається виділення, а на іншому — поглинання тепла. Напрямок теплового потоку залежить від полярності струму: при зміні напрямку струму місця поглинання і виділення тепла міняються місцями.

Зокрема, на холодному спаї термоелемента відбувається поглинання певної кількості теплової енергії, що й забезпечує охолоджуючий ефект пристрою.

$$Q_n = P \cdot I \quad (1.1)$$

де Π - коефіцієнт Пельтьє, I - сила струму, t - час.

Коефіцієнт Пельтьє та коефіцієнти термоЕРС зв'язані співвідношенням:

$$\Pi = \alpha_{1,2} T_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_0, \quad (1.2)$$

де $\alpha_{1,2}$ - коефіцієнти термоЕРС, що залежить від матеріалу термоелементу.

У основі будь-якого термоелектричного охолоджувального пристрою лежить елементарна термобатарея, яка будується з двох напівпровідників (гілок), з'єднаних між собою (рис. 1.1). Одна з гілок має електронний тип провідності (n -тип), а інша — дірковий (p -тип).

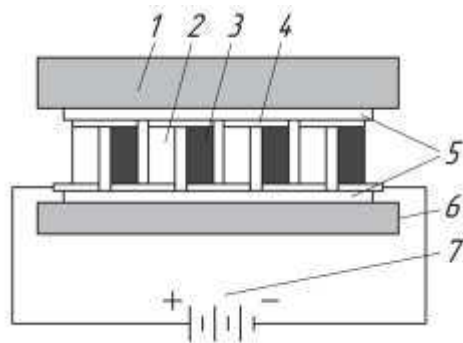
При проходженні постійного електричного струму в заданому напрямку через термоелемент між комутаційними пластинами 1 і 2, які утворюють так звані гарячий і холодний спай термобатареї, виникає температурна різниця. Вона зумовлена ефектом Пельтьє: на одному спайі (наприклад, спай 1) відбувається виділення тепла, а на іншому (спай 2) — його поглинання.

Якщо забезпечити належне відведення тепла з гарячого спаю (спай 1), температура холодного спаю (спай 2) знизиться. Рівень цього охолодження залежить від загального теплового навантаження на холодний спай.

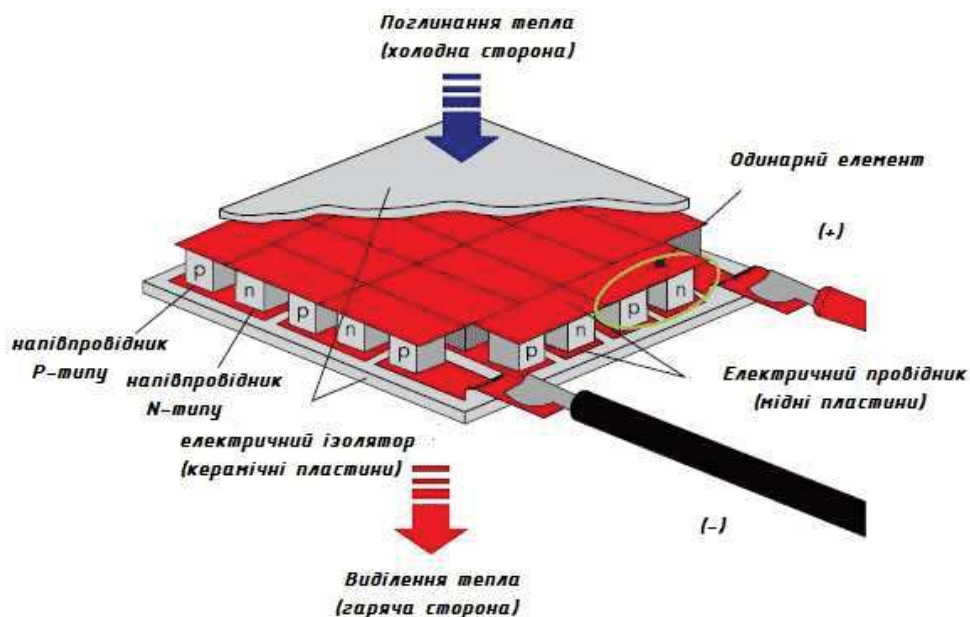
Це навантаження формується із: теплового притоку з навколишнього середовища, яке підлягає охолодженню; зворотного теплотоку від гарячого спаю (спаю 1), що передається через матеріал термоелемента за рахунок теплопровідності; тепловиділення Джоуля, яке виникає у провідниках під час проходження струму.

Усі ці фактори впливають на ефективність охолодження та необхідно враховуються при проектуванні термоелектричних систем (див. рис. 1.1).

								Арк.
								10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				



а



б

а - будова термоелектричного елемента Пельтьє; б - будова типового термоелектромодуля; 1 - об'єкт охолодження; 2, 3 - напівпровідники різного типу; 4 - електропровідники; 5 - електроізолятор; 6 - нагрітий елемент; 7 - джерело живлення

Рисунок 1.1 - Схема елементарного термоелемента

Визначальний вплив на ефективність роботи термоелемента справляє теплота Джоуля. Якщо теплота, що поглинається завдяки ефекту Пельтьє, є пропорційною першому ступеню сили струму, тобто:

$$-Q_{\Pi} = \Pi \cdot I. \quad (1.3)$$

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

То теплота Джоуля, яка виділяється при проходженні струму через термоелемент, залежить від квадрата сили струму і опору матеріалу термоелемента. Вона розраховується за формулою:

$$+Q_{Дж} = I^2 R \quad (1.4)$$

де I - сила струму, А; R -електричний опір термоелемента, Ом.

Ця формула свідчить про те, що приблизно половина тепла Джоуля виділяється на холодному спаї термоелемента, що істотно зменшує охолоджувальний ефект, досяжний за рахунок ефекту Пельтьє.

На рисунку 1.2 показано залежність між теплом, що надходить до холодного спаю внаслідок ефекту Джоуля ($Q_{Дж}$), та теплом, яке відводиться із спаю за рахунок ефекту Пельтьє ($Q_{П}$), від величини струму, що подається на термоелемент.

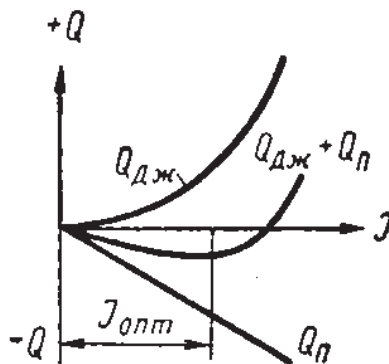


Рисунок 1.2 – Залежність кількості теплоти Джоуля ($Q_{дж}$) і Пельть'є ($Q_{п}$), на холодному спаї термоелемента залежно від струму (I)

Оскільки на холодному спаї термоелемента одночасно проявляються обидва ефекти - Пельтьє та Джоуля, їхня дія підсумовується, утворюючи результуючу теплову криву, яка відображає тепловий баланс термоелемента залежно від величини постійного струму.

Ця результуюча залежність має мінімум, що відповідає оптимальному значенню струму $I_{\text{опт}}$, за якого досягається максимальне зниження температури на холодному спаї. Завдяки тому, що в околі мінімуму крива є пологою, невеликі коливання струму не призводять до значних змін температури, що забезпечує стабільну роботу термоелемента.

Однак у випадку значного перевищення сили струму понад оптимальне значення, теплота Джоуля починає переважати над поглиненою теплотою Пельтьє, що зумовлює перехід процесу охолодження в нагрівання холодного спаю. Таким чином, перевищення $I_{\text{опт}}$ призводить до втрати ефективності охолодження термоелемента.

Для визначення оптимального значення струму подано вираз, що описує холодопродуктивність термоелемента. Цей вираз враховує теплові процеси, які відбуваються на холодному спаї під час проходження електричного струму:

- поглинання тепла завдяки ефекту Пельтьє,
- виділення тепла внаслідок ефекту Джоуля.

Сумарна холодопродуктивність термоелемента визначається як алгебраїчна сума цих складових, що описують тепловий баланс за певний проміжок часу при фіксованій силі струму:

$$Q_0 = \Pi \cdot I - \frac{1}{2} I^2 R \quad (1.5)$$

Продиференціювавши (1.5) за струм та прирівнявши до нуля, можемо визначити оптимальне значення сили струму ($I_{\text{опт}}$).

$$\frac{dQ_0}{dI} = \frac{d}{dI} (\Pi I - 0,5 I^2 R) = \Pi - I_{\text{опт}} R = 0; \cdot I_{\text{опт}} = \frac{\Pi}{R}. \quad (1.6)$$

Підставляючи значення $I_{\text{опт}}$ у формулу (1.6), знайдемо максимальне значення величини холодопродуктивності $Q_{0\text{max}}$.

						Арк.
						13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{0\max} = \Pi \frac{\Pi}{R} - \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R^2} R = \frac{\Pi^2}{R} - \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R} = \frac{1}{2} \frac{\Pi^2}{R} \quad (1.7)$$

де $Q_{0\max}$ - максимальна кількість тепла, що відводиться холодним спаєм від навколишнього середовища, тобто холодопродуктивність термоелемента.

З аналізу формули (1.7) випливає, що чим меншим є електричний опір термоелемента R , тим більша кількість тепла $Q_{0\max}$, може бути поглинута на холодному спаї. Це означає, що зменшення опору сприяє зростанню холодопродуктивності термоелемента. Омічний опір R термоелемента визначається з урахуванням його конструктивних і матеріальних характеристик за формулою:

$$R = l \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right) \quad (1.8)$$

де l - довжина вітки термоелемента; S_1 та S_2 – відповідно площі поперечного перерізу напівпровідникових гілок термоелемента; ρ_1, ρ_2 - питомі електричні опори матеріалів, з яких виготовлені відповідні напівпровідникові гілки.

Омічний опір R термоелемента можна зменшити двома шляхами: шляхом збільшення площі поперечного перерізу гілок S ; або зменшенням довжини гілок l . Однак при цьому спостерігається зворотний ефект: зростає теплопровідність термоелемента, що спричиняє збільшення небажаного теплового потоку від гарячого до холодного спаю. Це, у свою чергу, знижує ефективність охолодження.

Таким чином, геометричні параметри термоелемента S та l мають оптимальні значення, які слід визначати експериментальним або розрахунково-аналітичним шляхом, залежно від умов експлуатації та вимог до продуктивності. Далі визначимо умови, за яких термоелемент забезпечує максимальне зниження температури на холодному спаї.

Кількість теплоти, що поглинається термоелементом на холодному спаї,

						Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дорівнює загальному тепловому навантаженню, яке складається з двох основних компонентів: теплового потоку Q_x , що надходить від гарячого спаю через матеріал напівпровідникових гілок за рахунок теплопровідності; теплового притоку Q_0 з навколишнього середовища, що охолоджується.

Отже, тепловий баланс на спаях можна подати у вигляді:

$$Q = Q_x + Q_0 \quad (1.9)$$

Мінімально можлива температура на холодному спаї термоелемента досягається за умови повної теплоізоляції цього спаю від навколишнього середовища, тобто коли зовнішній теплопритік відсутній і $Q_0 = 0$. З урахуванням цього припущення, тепловий баланс можна записати у вигляді:

$$Q = Q_x = X(T_z - T_x), \quad (1.10)$$

$$T_z - T_x = \frac{Q}{\varepsilon}.$$

де ε - коефіцієнт теплопровідності гілок термоелемента.

$$\varepsilon = \frac{1}{l}(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2), \quad (1.11)$$

де λ_1, λ_2 - питома теплопровідність матеріалів для гілок термоелемента.

Підставивши значення $Q_{0\max}$ з (1.8) у вираз (1.11) знаходимо:

$$(T_z - T_x)_{\max} = \frac{Q_{0\max}}{\varepsilon} = \frac{P^2}{2R\varepsilon} \quad (1.12)$$

Підставляючи у формулу 1.12 значення для питомого опору R та коефіцієнта теплопровідності ε із формул (1.8) та (1.11) та враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє рівний:

						Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$P = (\alpha_1 - \alpha_2)T_0, \quad (1.13)$$

Отримаємо вираз для визначення оптимальної різниці температур для холодного та гарячого спаї термобатарей:

$$(T - T_0)_{\max} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 T_0^2}{2(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right)} = Z \frac{T_0^2}{2} \quad (1.14)$$

Виразимо значення з формули 1.14 як характеристику ефективності термоелементів (добротність термоелементів), та запишемо $Z = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) \left(\frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right)}$.

Вираз (1.14) свідчить, що максимальне зменшення температури на холодній стороні (спаї) модуля залежить від фізичних характеристик матеріалів термоелемента, температури холодного спаю T_x , а також співвідношення площ поперечного перерізу напівпровідникових гілок термоелемента.

Розрахунки показують, що коефіцієнт добротності Z досягає максимального значення за певного оптимального співвідношення площ поперечного перерізу $\frac{S_2}{S_1}$ гілок n - і p -типу. Це співвідношення визначається з урахуванням питомих електричних опорів і теплопровідностей напівпровідникових матеріалів.

$$\frac{S_2}{S_1} = \sqrt{\frac{\lambda_1 \rho_1}{\lambda_2 \rho_2}} \quad (1.15)$$

У попередньому аналізі умов максимального зменшення температури на холодній стороні (спаї) термоелемента передбачалося, що теплове навантаження на спай відсутнє. Проте в реальних умовах між холодною стороною термобата-

реї та навколишнім середовищем обов'язково відбувається теплообмін, величина якого залежить від призначення пристрою та особливостей його конструкції.

У практичній експлуатації термоелектрична батарея повинна відводити певну кількість тепла Q_0 , що надходить на її холодні спаї від охолоджуваного об'єкта. Для оцінки ефективності роботи термоелектричного модуля застосовується холодильний коефіцієнт ε (англ. coefficient of performance, COP), який визначається як відношення кількості тепла Q_0 , що відводиться від холодного спаю за одиницю часу, до витраченої електричної енергії W .

Підставляючи у формулу відповідні вирази для Q_0 та W , отримуємо нову аналітичну залежність, яка дозволяє оцінити COP термоелектричного охолоджувача з урахуванням реальних теплових навантажень.

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)T_x I - \frac{1}{2}I^2 R - \varepsilon(T_c - T_x)}{I^2 R + (\alpha_1 - \alpha_2)(T_c - T_x)I} \quad (1.16)$$

Варто зазначити, що холодильний коефіцієнт термоелектричного елемента залежить від кількох ключових параметрів: різниці температур між гарячим і холодним спаями ($T_c - T_x$); сили струму I , що протікає через елемент; коефіцієнта добротності Z , який характеризує термоелектричні властивості матеріалів. З аналізу виразу (1.16) випливає, що зі зростанням температурного перепаду $T_c - T_x$ холодильний коефіцієнт ε знижується. Це пов'язано з тим, що при великій різниці температур суттєво зростають втрати, зокрема теплопровідні потоки, що знижують загальну ефективність охолодження.

1.2 Огляд літературних та технічних джерел, присвячених термоелектричним холодильним установкам

Існують відомі конструкції термоелектричних холодильників, у яких охолодження робочих камер здійснюється за допомогою термоелектричних блоків, зібраних на основі модулів Пельтьє. Відведення тепла від гарячих спаїв у таких

						Арк.
						17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

пристроях, як правило, реалізується через повітряні вентилятори або рідинні теплообмінники.

Конструктивно пристрій складається з холодильної камери, яка безпосередньо контактує з термоелектричним модулем. Між камерою та зовнішнім середовищем передбачено теплоізоляційний шар, що зменшує втрати холоду. Теплові радіатори, що охолоджують гарячу сторону термоелемента, обдуваються потоком повітря, який створюється електровентиляторами. [1]

Запропонований пристрій являє собою нове конструктивне рішення для побутових термоелектричних холодильників, яке об'єднує зовнішню захисну оболонку, теплоізольовану холодильну камеру та термоелектричний охолоджуючий блок. Особливістю конструкції є застосування радіатора охолодження з вентилятором, який формує повітряний потік, здатний виконувати додаткову функцію очищення або зволоження навколишнього повітря [1].

Виробництво такого пристрою не потребує складних технологій або спеціалізованих матеріалів, тому його виготовлення може бути організоване на базі існуючих підприємств приладобудівної галузі. На рисунках 1.3–1.5 наведено типові конструктивні варіанти побутових термоелектричних холодильників: рис. 1.3 – варіант із вбудованим повітроочисником; рис. 1.4 – модель із функцією зволоження повітря; рис. 1.5 – комбінований пристрій, який поєднує повітроочистку та зволоження в єдиній системі.

Перший варіант конструкції побутового термоелектричного холодильника (рис. 1.3) складається з таких основних елементів: 1 - зовнішній захисний кожух, виготовлений із металу або пластику, що виконує функцію механічного захисту та декоративного оформлення пристрою; 2 - теплоізоляційний шар із пінополіуретану, який забезпечує термоізоляцію внутрішнього простору; 3 - холодильна камера з нержавіючої сталі, що слугує основним об'ємом для охолоджуваних продуктів; 4 - радіатор охолодження, з'єднаний з камерою та частиною термоелектричного блоку 5, побудованого на базі елементів Пельтьє, наприклад з матеріалу Bi-Te-Se-Sb; 6 - тепловідвід, який забирає тепло від гарячої сторони моду-

ля Пельтьє та забезпечує його ефективне відведення; 7 - електровентилятор, що обдуває радіатор 6, забезпечуючи примусове охолодження; 8 - пластикова плас-тина, розміщена в нижній частині охолоджувального блоку, на якій встановлено трубку для збору конденсату; 9 - система повітровідвідних каналів, виконаних у межах теплоізоляційного шару 2 на задній частині корпусу 1, призначених для виведення повітряного потоку, створеного вентилятором; 10 - повітроочисник (електростатичний або гідравлічний), встановлений у зоні дії вентилятора 7 для очищення повітря, що проходить крізь пристрій [1].

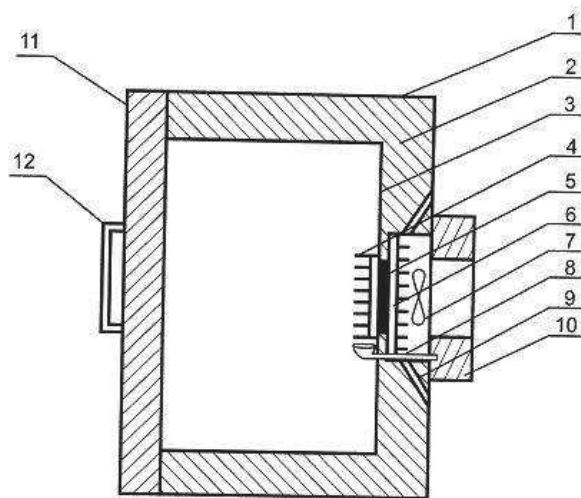


Рисунок 1.3 - Конструкція холодильного агрегату із очищувачем повітря

Другий варіант запропонованої конструкції (рис. 1.5) загалом має подібну будову до попереднього. Пристрій включає: 1 - основний корпус, що виконує функцію механічного захисту й опору; 2 - теплоізоляційний шар із пінополіуретану, який мінімізує теплові втрати; 3 - холодильну камеру, виготовлену з нержавіючої сталі, що забезпечує гігієнічність та корозійну стійкість; 4 - охолоджувальний радіатор, термічно з'єднаний з камерою та частиною модуля Пельтьє; 5 - термоелектричний модуль на основі елементів Пельтьє; 6 - тепловідвід, який забезпечує ефективне відведення тепла з гарячого боку модуля.

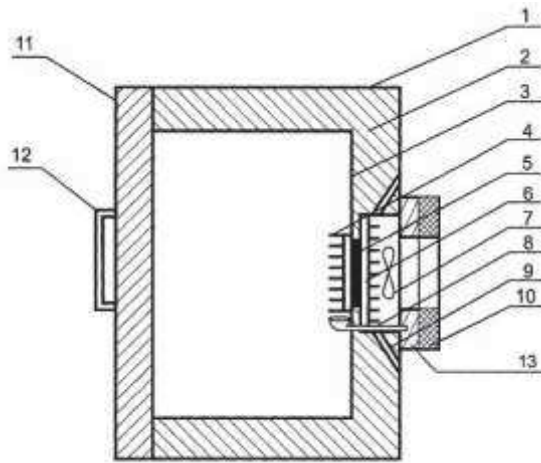


Рисунок 1.4 – Холодильник з очищувачем та зволожувачем

Теплорадіатор (елемент 6) охолоджується за допомогою вентилятора 7. Під радіатором 4, всередині камери 3, розміщується піддон 8 з трубками для збору конденсату. Задня стінка корпусу 1 виконана в межах теплоізоляційного шару 2 та містить систему вихідних каналів 9, через які виводиться повітряний потік, створений вентилятором 7. У зоні дії повітряного потоку вентилятора розміщені два функціональні модулі: очисник повітря 10 та зволожувач 11.

Принцип дії пристрою. Робота пристрою реалізується наступним чином. Після подачі електричного струму на термоелектричний охолоджуючий блок, який включає елементи очищення (рис. 1.3), зволоження (рис. 1.4) або їх комбінацію (рис. 1.5), відбувається охолодження радіатора 4 та холодильної камери. Вентилятор 7 створює повітряний потік, який одночасно: сприяє тепловідведенню від гарячих спаїв термобатареї; проходить через модулі очищення та/або зволоження повітря. Таким чином, повітря, що рухається через відповідні функціональні елементи, очищається або зволожується, забезпечуючи додаткову екологічну функцію пристрою поряд із традиційним охолодженням.

У джерелі [2] описано іншу конструкцію термоелектричного холодильника з принципово новим підходом до охолодження. Основу цієї моделі становить зовнішній корпус з теплоізоляцією та внутрішня термостатована камера, що містить охолоджувальний блок із двома радіаторами та термоелектричним модулем

з вбудованим генераторним елементом. Запропоноване рішення є технологічно простим у виробництві й не потребує спеціалізованих матеріалів. Це робить його придатним для серійного виготовлення на підприємствах, що спеціалізуються на виробництві побутового та лабораторного холодильного обладнання.

На рисунку 1.5 представлено принципову конструкцію одного з можливих варіантів термоелектричного побутового холодильника, розробленого за заявленою моделлю. Пристрій складається з таких основних компонентів: 1 - зовнішній захисний кожух, виготовлений із металу або пластику, що забезпечує механічний захист конструкції; 2 - внутрішній теплоізоляційний шар з матеріалу Ceramisol, який ефективно ізолює холодильну камеру 3, виготовлену з харчової нержавіючої сталі; 3 - ізольована холодна камера, яка контактує з охолоджувальним блоком.

З одного боку камери 3 розташовано тепловий блок, що включає: 6 - термоелектричний модуль (на основі елементів Пельтьє); 4 - внутрішній радіатор охолодження; 7 - зовнішній тепловідвідний радіатор, розміщений на зовнішній робочій поверхні термомодуля; 5 і 8 - вентилятори, які забезпечують примусову вентиляцію обох радіаторів - внутрішнього та зовнішнього відповідно.

Окремим елементом конструкції є конвертер (перетворювач) 9, який кріпиться до бічної стінки холодильника через додатковий шар теплоізоляції 11, також виготовлений на основі Ceramisol із відповідними наповнювачами, що забезпечують механічну стабільність і термозахист. З іншого боку термоелектричного модуля, всередині конвертера, розташований радіатор 10 для відведення тепла у навколишнє середовище. Цей радіатор обдувається вентилятором 8, що підвищує ефективність тепловідведення. Особливістю цієї конструкції є використання в якості джерела живлення ізотопного палива з тривалим періодом напіврозпаду. Його енергетичний потенціал визначає робочу температуру та тривалість безперервної роботи термоелектричного генератора, побудованого на основі модулів Пельтьє.

						Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

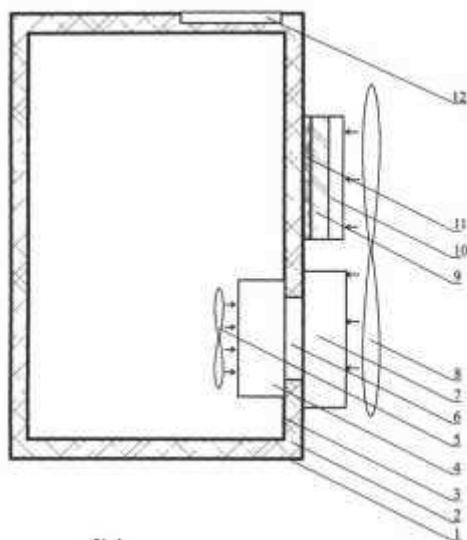


Рисунок 1.5 – Термоелектричний охолоджуючий пристрій

Керування роботою термоелектричного блоку реакторного генератора здійснюється за допомогою пульта управління (позиція 12). Через цей пульт, розташований на зовнішній поверхні корпусу холодильника, виконується вмикання пристрою та встановлення заданого теплового режиму. До пульта підключені електричні клеми реакторного генератора та термоелектричного модуля охолодження. Принцип дії запропонованого агрегата. Після активації через пульт керування 12, струм, що генерується реакторним джерелом живлення на основі перетворювача 9 з радіатором 10, подається на термоелектричні модулі (позиція 6). Це призводить до охолодження внутрішньої камери (позиція 3) термоелектричного блоку, реалізуючи принцип Пельтьє.

Альтернативна модель із новим конструктивним рішенням. У джерелі [3] описано інший варіант термоелектричного холодильника, який виконано у формі приліжкової тумби з висувними шухлядами та полицями. Цей пристрій містить: термоелектричний охолоджувально-нагрівальний блок; зовнішній тепловідвідний радіатор; модуль Пельтьє; термостатовані відсіки для зберігання пляшок; блок живлення з регулятором температури. Таке рішення дозволяє використовувати холодильник не лише для зберігання продуктів, а й як елемент меблів із інтегрованим температурним контролем.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

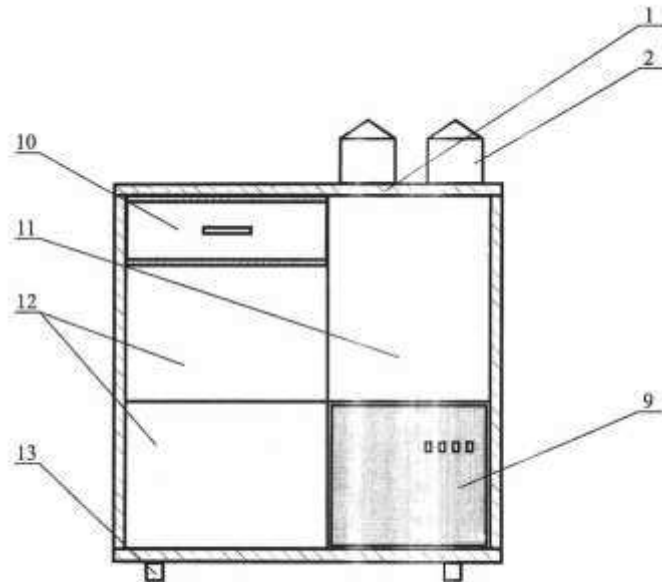


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд термоелектричного холодильника

Пристрій має корпус 1, виконаний у формі тумбочки, наприклад, з дерева або деревоподібних матеріалів. На лицьовій стороні корпусу розміщені дверцята 4, які забезпечують доступ до внутрішніх відсіків. У правому куті верхньої кришки корпусу 1 розташована пластина 3 із двома кришками 2, виготовленими з матеріалу з низькою теплопровідністю, що забезпечує теплоізоляцію зони для зберігання пляшок. Вздовж задньої частини кришки передбачено вентиляційні отвори, призначені для виведення нагрітого повітря, яке надходить від зовнішнього теплообмінного радіатора 5. Внутрішній простір корпусу має поділ на функціональні зони: ліва частина корпусу містить висувний ящик 10 для зберігання дрібних предметів, а також окреме відділення 12; права частина внутрішнього простору обмежена полицею, що розділяє відділення, а нижня частина містить велике відділення 11, призначене для зберігання більш габаритних речей. Ця конструкція поєднує охолоджувальні функції термоелектричного холодильника з практичною функціональністю меблевого елемента, що розширює сферу його застосування — як у побуті, так і в готельному чи офісному середовищі.

Конструкція термоелектричного блоку для термостатичної пляшки. Термоелектричний блок включає: термоелектричний модуль Пельтьє (позиція 6), одна робоча сторона якого перебуває в тепловому контакті з тепловідвідником

(радіатором) 5, а інша - з двома термостатичними металевими корпусами 8, призначеними для розміщення пляшок; теплоізоляційний шар 7, виготовлений із пінополіуретану, що покриває кожен корпус 8 і зменшує тепловтрати; блок живлення з терморегулятором (позиція 9), розташований у правій нижній частині основного корпусу 1; чотири опорні підставки (позиція 13), розміщені на нижній зовнішній частині корпусу, для стабільного встановлення пристрою.

Принцип дії приліжкового термостатованого холодильника. Після увімкнення живлення електричний струм подається на термоелектричні модулі Пельтьє (позиція 6), що ініціює тепловий потік між радіатором 5 та кожним із корпусів 8. Напрямок теплового потоку залежить від полярності струму — таким чином забезпечується або нагрів, або охолодження відповідної ємності. Глибина охолодження або нагріву корпусу 8 контролюється термостатом, який регулює силу струму через модуль. Це дозволяє підтримувати вміст кожної пляшки на заданому рівні температури відповідно до встановлених користувачем налаштувань. Конструктивною особливістю є вертикальне розташування ребер радіатора 5, що забезпечує ефективну тепловіддачу в умовах ламінарного повітряного потоку з навколишнього середовища, підвищуючи ефективність охолодження або нагріву.

Опис конструкції термоелектричної холодильної установки [4]. Існує відома термоелектрична холодильна установка, яка реалізує комбіновану схему з термоелектричним охолодженням та циркуляційним контуром теплоносія. Основними складовими цієї установки є: 1 - охолоджувальна камера, у якій підтримується задана температура; 2 - насос, що забезпечує циркуляцію теплоносія в системі; 3 - зовнішній теплообмінник, оснащений вентилятором 4, розміщується в охолоджуваній камері для покращення тепловідведення; 5 - термоелектричний агрегат, що складається з модулів охолодження, в яких наявні теплопоглинальні спаї (6) та тепловиділяючі спаї (7). Охолоджувальна камера (позиція 1) виконана у вигляді теплопровідної труби 8, всередині якої з невеликим зазором встановлений внутрішній теплопровідний канал (позиція 9), а також вихідна труба (по-

зиція 10), яка дозволяє забезпечити відведення або подачу теплоносія. Ця конструкція поєднує переваги активного термоелектричного охолодження з ефективною циркуляцією рідкого теплоносія, що дозволяє розширити температурний діапазон роботи та підвищити стабільність режиму охолодження.

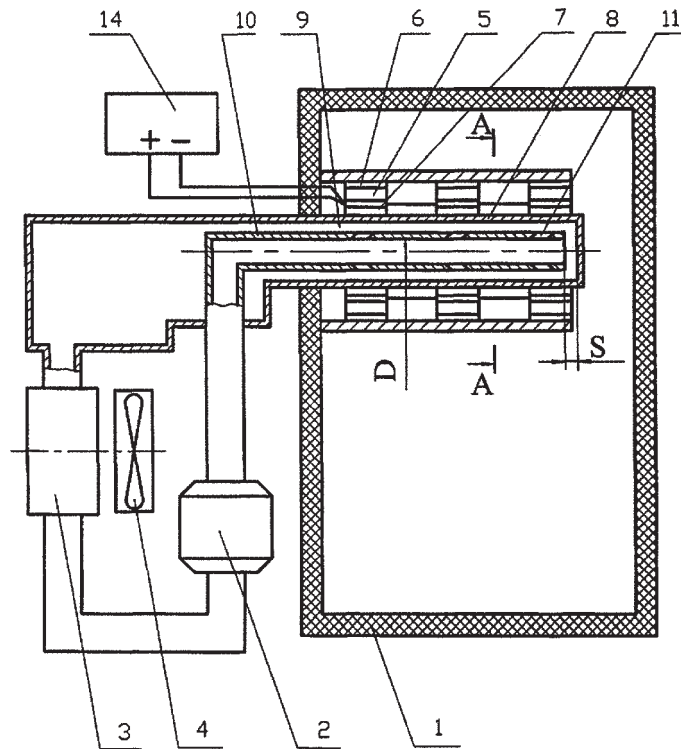


Рисунок 1.7 - Термоелектрична холодильна установка

Конструкція та компонування термоелектричної холодильної установки. Термоелектричні модулі (позиція 5), оснащені тепловідільними спаями (7), рівномірно розміщуються по зовнішній поверхні теплопровідної труби 8. У той же час, теплопоглинаючі спаї (6) знаходяться безпосередньо в охолоджуваному середовищі всередині холодильної камери (1), забезпечуючи відведення тепла з її внутрішнього об'єму. Вихідна труба (10) з'єднана з вхідним патрубком насоса (2), який далі підключений до теплообмінника (3). Вихід теплообмінника, у свою чергу, з'єднується з трубою 8, по якій відводиться тепло. Зовнішня поверхня труби 8 може мати циліндричну або ребристу форму, що підвищує ефективність

тепловіддачі. При цьому площа поперечного перерізу кільцевого тепловідвідного каналу (9) не повинна бути меншою за площу перерізу вихідної труби 10, що забезпечує стабільність гідравлічного режиму. Між вхідним отвором вихідної труби 10 та дном труби 8 має бути витриманий зазор S , не менший за $0,25$ внутрішнього діаметра D труби 10. Такий конструктив гарантує збереження стійкого потоку рідини. У стінці вихідної труби 10, в зоні розташування модулів 5, виконано похилі отвори (11), орієнтовані в напрямку руху теплоносія, що сприяє ефективному відведенню тепла. На теплопоглинаючих спаях 6 додатково встановлюються радіатори голчастого (12) або пластинчастого типу (13), які покращують тепловий контакт із внутрішнім середовищем. Термоелектричні модулі 5 можуть бути реалізовані у вигляді плоских або кільцевих конструкцій, що дає змогу адаптувати систему до різних геометрій корпусу. Живлення модулів здійснюється від зовнішнього джерела електроенергії, яке забезпечує необхідний струм для роботи термоелементів.

Термоелектрична холодильна установка функціонує таким чином. Від зовнішнього джерела живлення 14 подається напруга на термоелектричні охолоджувальні модулі 5. За рахунок ефекту Пельтьє електрична енергія перетворюється на теплову: холодні спаї забезпечують охолодження внутрішнього об'єму камери 1, тоді як тепло від гарячих спаїв передається через теплопровідну трубу 8. Для підвищення ефективності тепловідведення застосовуються радіатори - пластинчастий 13 або голчастий 12 типу. Нагріте гарячими спаями 7 тепло відводиться по трубі 8 за допомогою проміжного циркуляційного контуру. Насос 2 забезпечує рух теплоносія до зовнішнього теплообмінника 3, де останній охолоджується вентилятором 4. Після охолодження теплоносій надходить у кільцевий тепловідвідний канал 9, де поглинає тепло від нагрітої теплопровідної труби 8. Далі теплоносій, що вже поглинув тепло, через вихідну трубу 10 виводиться з системи.

Відомий термоелектричний пристрій для контактного охолодження поверхонь [5], який включає теплоізований корпус 1 з дном 2 та контактним дис-

									Арк.
									26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

ком 3, охолоджувач 4 і теплообмінник 5 (рис. 1.8). Охолоджувач 4 складається з блоків термоелектричних модулів 6 і 7, встановлених на основі температурного концентратора 8. Концентратор 8 має форму металевої усіченої піраміди або конуса, при цьому його вісь збігається з віссю корпусу 1. На нижній основі 9 концентратора 8 за допомогою теплопровідного клею або гвинтів закріплений блок термомодулів 6 холодною стороною, а на верхній основі 10 розміщений блок термомодулів 7, приєднаний гарячою стороною.

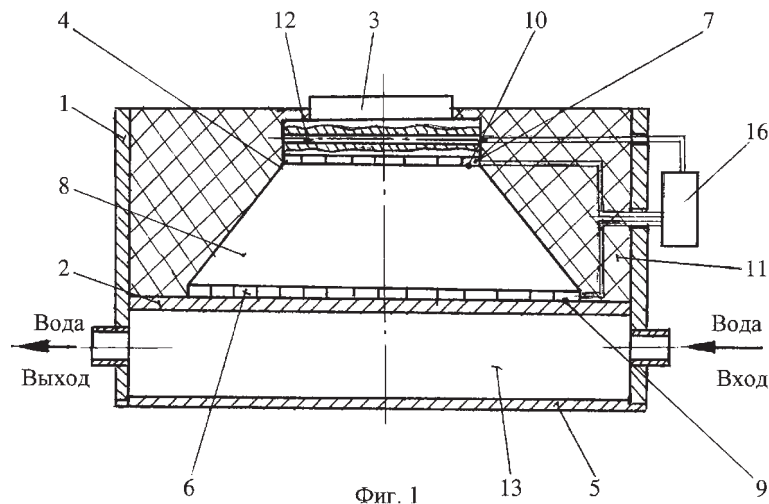


Рисунок 1.8 - Термоелектричний охолоджуючий пристрій для контактного охолодження поверхонь

Концентратор 8 зафіксований усередині корпусу 1 за допомогою спіненого пінополіуретану 11, який одночасно виконує функції теплоізоляції корпусу та герметизації термоелектричних модулів 6 і 7. Для вимірювання температури в контактному диску 3 вмонтовано датчик температури 12.

Теплообмінник 5 може бути реалізований у вигляді водяного радіатора 13, який охолоджується проточною холодною водою і закріплений на дні корпусу 1, або ж як повітряний радіатор 14, який обдувається вентилятором 15. Для живлення термоелектричних модулів у пристрої передбачений блок живлення 16, що перетворює змінну напругу 220 В, 50 Гц на постійну в діапазоні 12...24 В.

Принцип дії термоелектричного пристрою для контактного охолодження полягає в наступному. Пристрій встановлюється контактним диском на плоску охолоджувану поверхню об'єкта. Через блок живлення 16, підключений до електромережі, подається робоча напруга на термоелектричні модулі 6 і 7. У результаті на їхніх холодних сторонах утворюються від'ємні температури, тоді як на гарячих сторонах — позитивні. Тепло з гарячої сторони блока 6 відводиться теплообмінником 5, а тепло з гарячої сторони блока 7 частково компенсується холодом, який передається з блока 6 через концентратор 8 завдяки ефективному теплопереносу.

Особливість конструкції полягає в тому, що концентратор 8 має форму усіченої піраміди або конуса. Це сприяє поступовому зниженню температури при просуванні тепла до верхньої основи, тобто до блока 7, що дозволяє досягти нижчих температур на контактному диску 3 при знижених витратах енергії. Елементи конструкції, такі як концентратор 8, дно 2 і контактний диск 3, виготовлені з теплопровідного матеріалу — переважно міді або алюмінію — що додатково підвищує ефективність теплопередачі та сприяє зменшенню енергоспоживання.

Висновки до розділу

У роботі проведено теоретичний аналіз принципів отримання холоду на основі термоелектричного ефекту, а також здійснено огляд і аналітичне дослідження термоелектричних холодильних установок, які функціонують за цим принципом. В результаті аналізу встановлено, що існуючі конструкції таких агрегатів мають низку недоліків, зокрема в архітектурі термоелектричних модулів, системах тепловідведення та алгоритмах керування при змінних умовах експлуатації термоелементів.

						Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА БАЗІ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕЛЬТЬЄ

2.1 Постановка задачі на розробку термоелектричного охолоджуючого пристрою на базі елементів Пельтьє

Сучасні термоелектричні охолоджувальні пристрої, які базуються на ефекті Пельтьє, мають низку переваг — компактність, відсутність рухомих частин, екологічність та надійність. Проте одним із ключових обмежувальних факторів їх ефективності є недостатнє тепловідведення з гарячих спаїв термоелементів, що призводить до зменшення температурного градієнта і зниження продуктивності охолодження. Крім того, значні тепловтрати через неізольовані ділянки корпусу знижують енергоефективність системи в цілому.

У зв'язку з цим ставиться задача розробити конструкцію термоелектричного охолоджуючого пристрою з підвищеною ефективністю, яка передбачає:

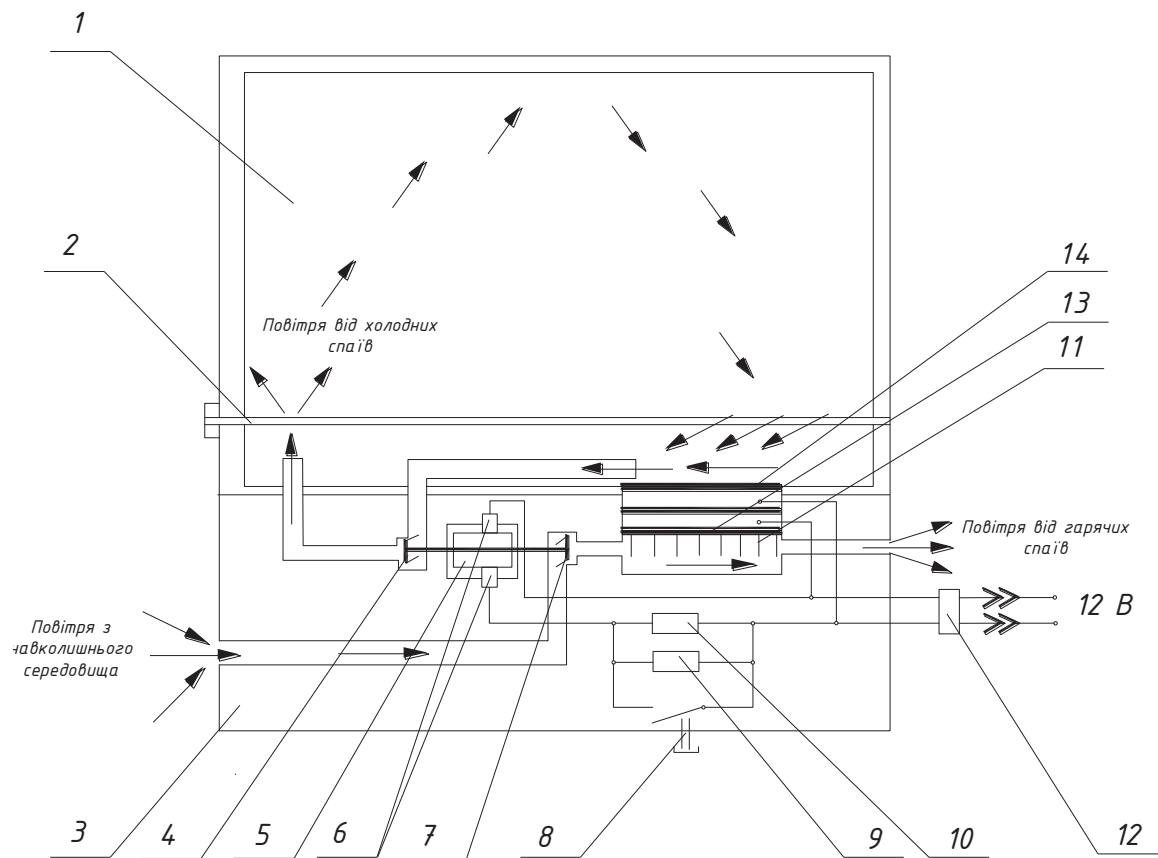
- впровадження вентиляційної системи активного охолодження гарячих спаїв термоелемента;
- оптимізацію схеми розміщення вентилятора та радіатора для забезпечення максимального тепловідведення;
- розробку конструкції корпусу з покращеною термоізоляцією, яка дозволить мінімізувати втрати холоду;
- виконання розрахунків теплового балансу та енергоефективності системи при різних режимах експлуатації;
- забезпечення компактності, ергономіки та технологічності виготовлення пристрою.

Метою роботи є створення прототипу термоелектричного холодильника з удосконаленими параметрами охолодження і зниженим енергоспоживанням за рахунок комбінованого підходу до відведення тепла і збереження холоду.

									Арк.
									29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

2.2 Проектування функціональної схеми термоелектричного охолоджувального пристрою

Розроблений термоелектричний охолоджуючий пристрій складається з трьох ключових конструктивних компонентів: термоелектричної батареї, робочої (холодильної) камери та системи відведення тепла від термобатареї. Під час проектування пристрою було враховано тісну функціональну взаємодію між цими елементами, що забезпечує ефективну роботу всієї системи (рис. 2.1).



- 1 - корпус; 2 – прокладка; 3 – кришка; 4 - крильчатка 1; 5 - ротор колекторного електродвигуна (12 вольт); 6 - щітки електродвигуна; 7 - крильчатка 2;
8 – перемикач; 9 - резистор 1; 10 - резистор 2; 11 – гарячі спаї; 12 - шнур живлення; 13 - термобатарея; 14 – холодні спаї

Рисунок 2.1 - Структурно-функціональна схема термоелектричного холодильника

Розроблений термоелектричний холодильник складається із корпусу 1, у якому розміщена холодильна камера об'ємом 7 літрів, та кришки 3, що щільно її закриває. Основним елементом охолодження є термоелектрична батарея з холодними 14 і гарячими 11 спаями, яка включає 32 термоелементи розмірами 2 мм заввишки та перерізом 3×3 мм. Для інтенсифікації тепловідводу застосовуються охолоджуючий радіатор, крильчатка 4 для направлення холодного повітря від холодних спаїв до камери, а також крильчатка 5 для обдуву гарячих спаїв і виведення теплого повітря за межі корпусу холодильного агрегата. Структурно-функціональна схема пристрою зображена в графічній частині роботи БРМА 25.00.00.000 С3.

До електричної частини схеми входять: колекторний щітковий електродвигун 6, плата з випрямним мостом, випрямний трансформатор з двосекційною первинною обмоткою, два германієві діоди типу Д-305, дроселі, два конденсатори ємністю по 4000 мкФ, перемикач 8, а також резистори 9 і 10 та шнур живлення для підключення холодильника до мережі.

Принцип роботи термоелектричного холодильного агрегату полягає в наступному. Під час проходження постійного електричного струму через термоелемент між комутаційними пластинами, що утворюють спаї 13 і 14, виникає температурна різниця внаслідок ефекту Пельтьє: на спаї 13 виділяється тепло, а на спаї 14 — поглинається. Завдяки цьому температура на холодному спаї 14 знижується.

Рівень зниження температури спаю 14 залежить від теплового навантаження, яке включає: надходження тепла з охолоджуваного середовища, теплопередачу від гарячого спаю (через теплопровідність гілок термоелемента), а також тепло, що виділяється внаслідок проходження струму (ефект Джоуля). Рух охолодженого повітря всередині холодильника — від холодних спаїв — та видалення нагрітого повітря від гарячих спаїв назовні здійснюється за допомогою вентилятора.

									Арк.
									31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

2.3 Визначення параметрів та розрахунок термоелектричних елементів Пельтьє

Вибір стандартизованого термоелектричного модуля для точного застосування базується щонайменше на трьох основних параметрах: температурі гарячої сторони T_g , температурі холодної сторони T_x та тепловому навантаженні Q_0 , яке необхідно відводити з холодної сторони модуля.

Розрахунок температури гарячої сторони термоелектричного модуля

Гарячою стороною модуля вважається та, на якій відбувається виділення тепла під час протікання постійного електричного струму. Саме на цю сторону встановлюється теплообмінник для забезпечення ефективного відведення тепла.

У разі застосування повітряного охолодження (як природного, так і примусового), температура гарячої сторони модуля може бути визначена за такою розрахунковою формулою:

$$T_g = T_{н.с} + R_g Q_g, \quad (2.1)$$

де $T_{н.с}$ – температура навколишнього середовища, °С, R_g – тепловий опір теплообмінника гарячої сторони модуля, °С / Вт; Q_g – теплота, що виділяється гарячих спаях, Вт.

$$Q_g = P + Q_0, \quad (2.2)$$

де P – споживана потужність холодильним агрегатом, Вт.

Через наявність теплового опору теплообмінника температура гарячої сторони термоелектричного модуля перевищує температуру навколишнього середовища на певну величину. Якщо значення теплового опору невідоме, цю різницю можна орієнтовно оцінити залежно від типу теплообміну: природна конвекція: підвищення температури на 20...40 °С; вимушена конвекція: підвищення на 10...15 °С; рідинне охолодження: підвищення на 2...5 °С відносно температури охолоджуючої рідини.

Теплообмінник відіграє ключову роль у конструкції термоелектричного

						Арк.
						32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

холодильного пристрою. Якщо площа теплообміну є недостатньою, досягти бажаного рівня охолодження буде неможливо через обмежену здатність до ефективного відведення тепла.

Розрахунок температури холодного спая термоелектричного модуля

Холодною стороною термоелектричного модуля є поверхня, на якій відбувається поглинання тепла під час проходження постійного струму через термоелектричну батарею. Температура цієї сторони T_x повинна бути нижчою за температуру об'єкта, що охолоджується ($T_{об}$), особливо в разі, коли об'єкт не перебуває в безпосередньому тепловому контакті з термоелементом.

$$T_x = T_{об} - R_x \cdot Q_0. \quad (2.3)$$

Розрахунок потрібної холодопродуктивності.

Визначення теплового навантаження, яке потрібно відвести з холодної сторони термоелектричного модуля для досягнення бажаного зниження температури об'єкта, є досить складним завданням. Це пов'язано з необхідністю врахування всіх джерел теплового надходження. До основних складових теплового навантаження належать:

1) Корисне теплове навантаження — кількість теплоти, яку потрібно відвести безпосередньо від охолоджуваного об'єкта для зниження його температури до заданого рівня.

$$Q = i G \quad (2.4)$$

де G - масова витрата охолоджуваної речовини, кг/с; i - зміна ентальпії (теплотмісту) охолоджуваної речовини, Дж/кг.

2) Теплопритік із гарячої сторони модуля, який виникає внаслідок теплопровідності матеріалів конструкції між спаями.

3) Джоулеве тепло, яке виділяється у провідниках при проходженні струму. Згідно з узагальненим наближенням, половина цього тепла ($I^2 R$) припадає на

холодну сторону модуля, інша половина - на гарячу.

4) Теплопритік через теплоізоляційний шар, що оточує охолоджувану зону — він залежить від якості та товщини ізоляційного матеріалу, а також від перепаду температур.

$$Q_{\text{прит}} = \lambda \Delta T S / \delta, \quad (2.5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К); δ – товщина шару ізоляції, м; ΔT – перепад температур через ізоляційний шар, К; S – площа поверхні теплоізоляції, м².

5) Втрати холоду на охолодження конструктивних елементів, таких як стінки теплообмінника, трубопроводи, кріплення тощо. Ці втрати залежать від теплової інерції матеріалів і часу виходу системи на робочий режим.

Згідно з наведеною методикою розрахунків та на основі заданих вихідних даних для стандартних однокаскадних термоелектричних модулів, визначено основні параметри роботи термоелектричного пристрою при досягненні максимальної холодопродуктивності та найвищого холодильного коефіцієнта в залежності від перепаду температур між гарячою та холодною сторонами модуля.

Для модулів типу Пельтьє MT2-1,13-127S виробництва науково-виробничої фірми «Модуль» (www.spf-modul.com), на рисунках 2.2 та 2.3 [5] подано графіки залежності наступних параметрів: холодопродуктивності від різниці температур між холодним і гарячим спаями; холодопродуктивності від величини електричного струму; напруги на модулі від струму; коефіцієнта ефективності (COP) від струму при фіксованих температурах гарячого спаю: 27 °С і 50 °С.

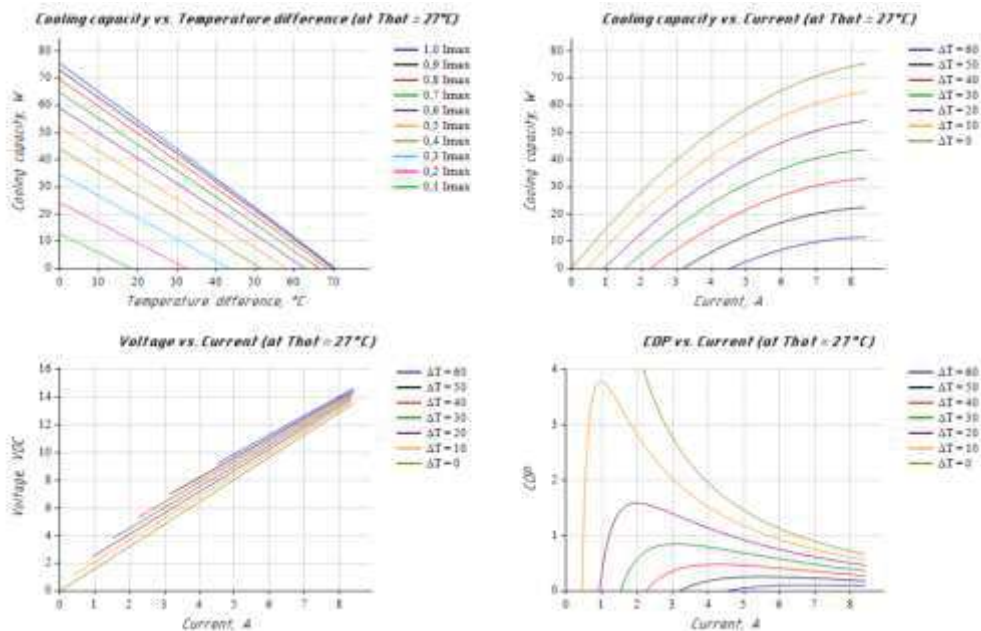


Рисунок 2.2 - Графіки залежності параметрів термоелектричного модуля Пельтьє MT2-1,13-127S FM411.361 (науково-виробнича фірма «Модуль» www.spf-modul.com): холодопродуктивності від різниці температур холодного і гарячого спаю; холодопродуктивності від струму; напруги від струму; коефіцієнта ефективності від струму при температурі гарячого спаю 27 °C

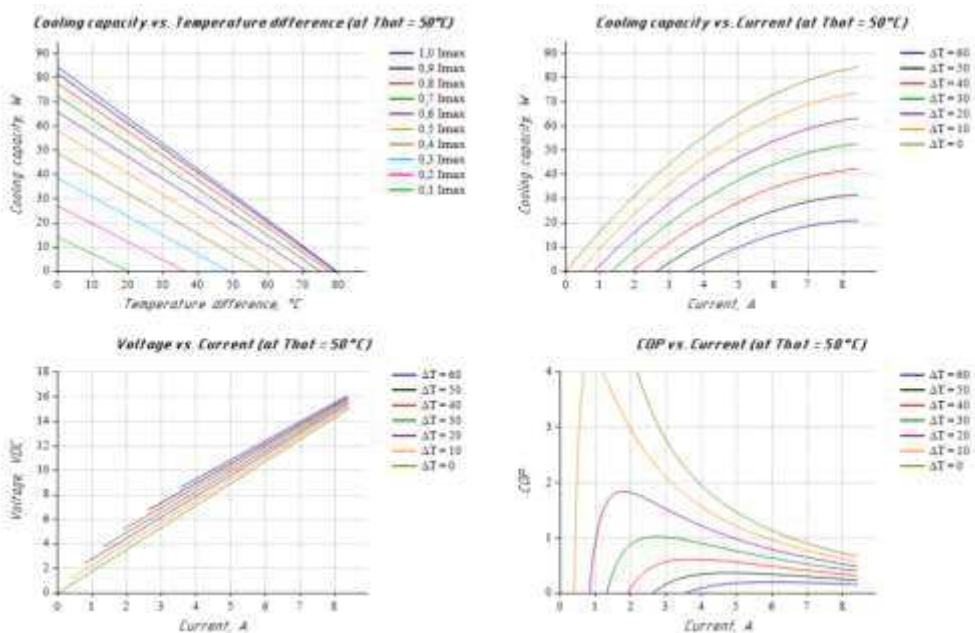


Рисунок 2.3 - Графіки залежності параметрів термоелектричного модуля Пельтьє MT2-1,13-127S FM411.361 (науково-виробнича фірма «Модуль» www.spf-modul.com): холодопродуктивності від різниці температур холодного і гарячого спаю; холодопродуктивності від струму; напруги від струму; коефіцієнта ефективності від струму при температурі гарячого спаю 50 °C

Отримані з графіків дані будуть використані у подальших розрахунках для підбору трикаскадних термоелектричних модулів Пельтьє, необхідних для створення моделі термоелектричного холодильника.

Робота будь-якого термоелектричного модуля визначається такими характеристиками, як: I_{max} , V_{max} , Q_{max} і ΔT_{max} за умови заданої температури навколишнього середовища T_p . Однак робота при граничних значеннях струму є малоефективною, оскільки супроводжується інтенсивним виділенням джоулевого тепла, що знижує загальну ефективність системи. Тому на практиці модулі зазвичай експлуатують при струмах, що становлять 25–80% від I_{max} .

Крім того, саме споживана електрична потужність визначає температуру гарячої сторони термоелемента, а отже - і його реальну холодопродуктивність у конкретних умовах навантаження

Для будь-якого термоелектричного охолоджувача максимальна холодопродуктивність Q_{max} досягається при максимальних значеннях струму I_{max} і V_{max} , за умови відсутності перепаду температур між гарячою та холодною сторонами ($\Delta T_{max}=0$). Максимальний перепад температур - це найбільша різниця температур, яку модуль здатен забезпечити між гарячою та холодною сторонами при номінальних значеннях струму і напруги (тобто при I_{max}) за умови відсутності теплового навантаження ($Q_0 = 0$)

Вихідні умови для розробки системи охолодження: необхідна холодопродуктивність: до 22 Вт; тип теплообміну: вимушена конвекція; тепловий опір теплообмінника: 0,15 °С/Вт; температура охолоджуваного об'єкта: 5 °С; тип контакту з термобатареею: безпосередній тепловий контакт; температура навколишнього середовища: 25 °С.

Виробник систем охолодження має у розпорядженні такі термоелектричним модулі з функціональними характеристиками: $I_{max}=6.3\text{A}$; $Q_{max}=65.0\text{Вт}$; $V_{max}=16.7\text{В}$; $\Delta T_{max}=74^\circ\text{C}$.

Необхідно перевірити, чи підходить обраний термоелектричний модуль для розроблюваної системи охолодження. Приймаємо температуру холодної

									Арк.
									36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

сторони $T_x = 5^\circ\text{C}$. З огляду на характеристики використовуваного теплообмінника, припускаємо, що температура гарячої сторони буде приблизно на 10°C вищою за температуру навколишнього середовища, тобто $T_g = 35^\circ\text{C}$.

Оскільки точне значення залежить від вхідної потужності, яка наразі невідома, оцінка температурного перепаду проводиться наближено $\Delta T = 35 - 5 = 30^\circ$.

Рисунки 2.4 та 2.5 ілюструють експлуатаційні характеристики термоелектричного модуля за умови, що температура гарячої сторони становить 35°C . Зокрема, на них подано графіки залежності перепаду температур від прикладеної напруги, а також залежності холодопродуктивності від напруги живлення.

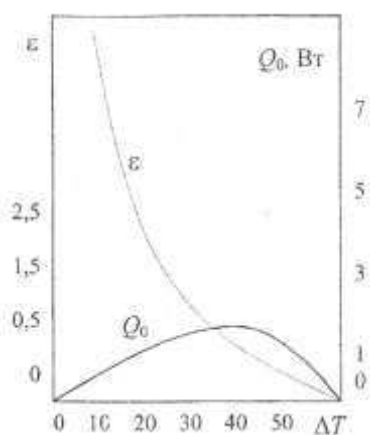


Рисунок 2.4- Залежність холодильного коефіцієнта ϵ та холодопродуктивності Q_0 від різниці температур для режиму максимального холодильного коефіцієнта

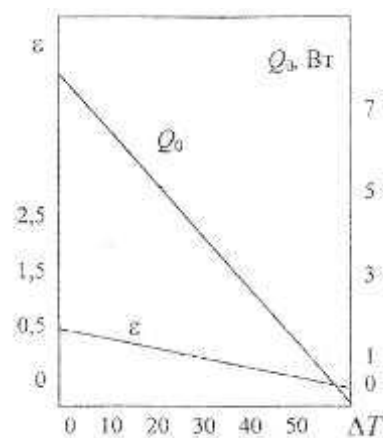


Рисунок 2.5 - Залежність холодильного коефіцієнта ϵ і холодопродуктивності Q_0 від різниці температур для режиму максимальної холодопродуктивності

Згідно з графіками на рисунках 2.4 та 2.5, точка перетину кривих ΔT і Q_0 свідчить про те, що обраний модуль здатен забезпечити холодопродуктивність до 22 Вт при температурному перепаді $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ та струмі 3,1 А. Це значення отримано за припущення температури гарячої сторони $T_g = 35^\circ\text{C}$. Оскільки тепер відома споживана електрична потужність, можна застосувати відповідні рівняння з попереднього розділу для точнішого визначення температури гарячої сторони та оцінки правильності первинного наближення.

Споживана потужність визначається як добуток струму на напругу. Відповідно до графіка, при струмі 3,1 А та температурному перепаді $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ напруга становить приблизно 8 В. Підставивши ці дані у рівняння з розділу, присвяченого розрахунку параметрів термоелектричної батареї, можна визначити уточнене значення температури гарячої сторони T_g

$$Q_{gmax} = 22 + (3.1 \cdot 10) = 22 + 31 = 53 \text{ Вт};$$

$$T_g = 25 + (0.15 \cdot 53) = 25 + 8.0 = 33.0^\circ\text{C}.$$

Розрахункове значення температури гарячої сторони T_g виявилось близьким до її попередньої оцінки, що дозволяє зробити висновок: обраний модуль є придатним для використання в даній конструкції термоелектричного холодильного агрегату. У разі необхідності отримання більш точного значення температури T_g , розрахунок може бути повторений з використанням ітераційного методу - до моменту стабілізації результату.

Далі виконується розрахунок основних експлуатаційних параметрів термоелектричної батареї за заданих умов роботи та при встановленій холодопродуктивності, з урахуванням властивостей напівпровідникового матеріалу. До таких параметрів належать: холодильний коефіцієнт (COP) — ефективність перетворення електричної енергії в холод; споживана електрична потужність термобатарею; теплова енергія, що виділяється на гарячих спаях; напругове падіння на одному термоелементі; кількість термоелементів у батареї; електричний опір одного термоелемента та повний опір батареї; співвідношення довжини до площі поперечного перерізу гілок (що впливає на теплопровідність і електроопір).

Вихідні дані для розрахунків параметрів:

- добротність матеріалу $Z = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$;
- коефіцієнт термоЕДС $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$;
- коефіцієнт електропровідності $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$;
- потрібна холодопродуктивність $Q_0 = 60 \text{ Вт}$;
- умови експлуатації $T_x = 280 \text{ }^\circ\text{K}$, $T_g = 310 \text{ }^\circ\text{K}$;
- джерело живлення $U_{п} = 12 \text{ В}$.

Розрахунок параметрів термоелектричного модуля в режимі максимальної холодопродуктивності. За заданою геометрією гілок термоелемента та відомими характеристиками використовуваного напівпровідникового матеріалу необхідно провести розрахунок таких основних параметрів: кількості термоелементів у складі модуля; струму, що протікає через термобатарею; напруги живлення, необхідної для роботи модуля; електричної потужності, яку споживає термобатарея; холодильного коефіцієнта (COP), що характеризує ефективність охолодження.

У таблиці 2.1 наведено результати та послідовність виконання.

- довжина термоелемента $l = 4$ мм;
- переріз $S = 5.5$ мм²;
- добротність матеріалу $Z = 2,8 \cdot 10^{-3}$ °К⁻¹;
- коефіцієнт термоЕДС $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3}$ В/К;
- коефіцієнт електропровідності $\sigma = 8 \cdot 10^4$ Ом⁻¹м⁻¹;
- потрібна холодопродуктивність $Q_0 = 60$ Вт;
- умови експлуатації $T_x = 280$ °К, $T_r = 310$ °К;

Таблиця 2.1 - Розрахунок термобатареї у режимі максимальної холодопродуктивності

№	Величина, що визначається	Розрахункова формула	Результати розрахунку
1	2	3	4
1	Оптимальний струм I_{opt} , А	$I_{opt} = \alpha T_x \sigma S / 2l$	5,7
2	Падіння напруги, U_0 , В	$U_0 = \alpha T_c$	0,115
3	Холодильний коефіцієнт	$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2T_c} \left(T_x - \frac{2(T_c - T_x)}{ZT_x} \right)$	0.96
4	Опір термопар R_0 , Ом	$R_0 = 2l / \sigma S$	0,0182

5	Холодопродуктивність термопари Q' , Вт	$Q' = \frac{\alpha^2}{R_0} \left(\frac{T_{\delta}^2}{2} - \frac{(T_a - T_{\delta})}{Z} \right)$	68
6	Число термопар N	$N = Q_0 / Q'$	91
7	Потужність затрачувана однією термопарою P_0 , Вт	$P_0 = Q_0 / \varepsilon_{\delta}$	0,76
8	Потужність джерела живлення P, Вт	$P = P_0 N$	69,16
9	Теплота гарячих спаїв Q_r , Вт	$Q_r = P + Q_0$	89
10	Напруга джерела живлення U_{rp} , В	$U_{rp} = U_0 N$	10,5

Технічні характеристики розрахованого та запропонованого модуля Пельтьє [5].

Температура гарячої сторони (T_r)	°C	27	50
Максимальна сила струму I_{max} при максимальній різниці температур dT_{max}	I	8,4	8,4
Максимальна напруга V_{max} при максимальній різниці температур $dT_{max} = 0$ °C (Q_{max})	B	14,7	16,4
Максимальна холодопродуктивність (Q_{max}) при максимальній різниці температур dT_{max}	Вт	76,8	86,2
Максимальна різниця температур dT_{max} при максимальній холодопродуктивності (Q_{max})	C	71	78
Опір термопари, R	Ом	1,61	1,79
Максимальна робоча температура	°C		90
Температура розплавлення	°C		138

2.4 Розроблення електричної схеми охолоджуючого пристрою на основі елементів Пельтьє

Звісно, термоелектрична батарея може ефективно функціонувати лише при живленні стабільним постійним струмом заданих параметрів. Тому в конструкції термоелектричного холодильника передбачено спеціальний випрямляч, що дозволяє отримувати постійний струм з однофазної мережі змінного струму.

У випрямлячах термоелектричних побутових холодильників найбільше застосування одержали напівпровідникові вентиля у виді германієвих і кремнієвих діодів, що мають велику надійність і довговічність, малі габарити і вагу і є при цьому більш економічними в порівнянні з ламповими (електронними й іонними) вентилями. Випрямні властивості вентилів, як відомо, характеризуються коефіцієнтом випрямлення, що представляє відношення прямого струму до зворотного.

Вибір конкретної схеми випрямляча залежить від допустимого рівня пульсацій у вихідному струмі. Якість роботи випрямляча, як правило, оцінюють коефіцієнтом пульсації, який визначається як відношення максимальної амплітуди коливань випрямленої напруги до її середнього значення. Для живлення термоелектричних модулів необхідна така схема, яка забезпечує мінімальний рівень пульсацій.

З цією метою в конструкції використовується двопівперіодна схема випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора та згладжувальними фільтрами. Схема такої конструкції наведена на рисунку 2.6.

Завдяки використанню двох вентилів, електричний струм проходить через термобатарею під час кожного півперіоду змінної напруги. У той півперіод, коли струм у вторинній обмотці трансформатора спрямований від точки А до точки О, випрямлений струм подається до термобатареї через перший вентиль. Другий вентиль у цей момент не проводить струм, оскільки напруга на його аноді є негативною відносно катода, що унеможлиблює його провідність.

						Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

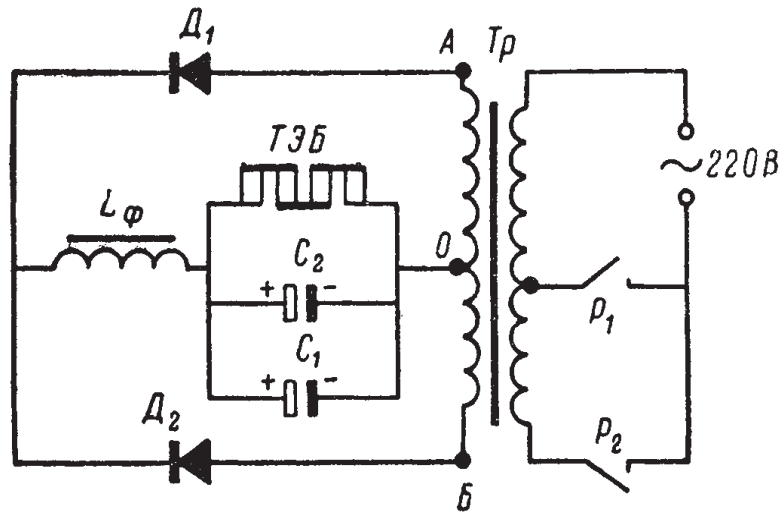


Рисунок 2.6 - Електрична схема термоелектричного охолоджуючого пристрою на елементах Пельтьє

У наступному півперіоді, коли змінний струм у вторинній обмотці трансформатора спрямований від точки Б до точки О, випрямлений струм надходить до термобатарей через другий вентиль. У цей час на першому вентилі з'являється зворотна напруга, яка блокує його провідність.

Однак навіть при такій двопівперіодній схемі коефіцієнт пульсації випрямленого струму $p = \frac{U_T}{U_H}$ залишається досить високим — приблизно 0,7. Для його зменшення, як правило, застосовують згладжувальні фільтри комбінованого типу, що поєднують індуктивні та ємнісні елементи.

У найпоширенішій конфігурації — Г-подібному фільтрі — дросель (індуктивний елемент) згладжує пульсації за рахунок впливу на форму та тривалість струмових імпульсів, а конденсатор (ємнісний елемент) розряджається в моменти між піковими значеннями напруги, забезпечуючи тим самим більш стабільне живлення термобатарей.

Розрахунок трансформатора для випрямляча струму здійснюється з урахуванням необхідності забезпечення оптимальної напруги на термоелектричній батареї. Передусім визначається режим роботи термобатарей: безперервний або періодичний. Оскільки вихід термоелектричного холодильника на стабільний тем-

пературний режим займає значний проміжок часу (від 1 до 5 годин), для зменшення енергоспоживання доцільно використовувати частково циклічний режим роботи, подібно до абсорбційних систем.

У такій конфігурації первинна обмотка трансформатора виконується з поділом на дві окремі секції. Одна з них служить для живлення термобатарей в режимі максимальної холодопродуктивності — з напругою, яка забезпечує найінтенсивніше охолодження. Друга секція, або комбінація з двох, розраховується для роботи в режимі енергоефективності, коли потрібне лише підтримання досягнутої температури.

Перемикання між цими режимами здійснюється автоматично: холодильник переходить у режим підвищеної холодопродуктивності, коли температура в камері перевищує значення, встановлене терморегулятором. Після досягнення цільового рівня охолодження система перемикається у режим мінімального споживання енергії.

У стаціонарних побутових умовах для живлення невеликих термоелектричних холодильників можуть застосовуватись спрощені випрямлячі, зібрані за схемою однопівперіодного випрямлення. Що стосується портативних (зокрема автомобільних) моделей, вони можуть ефективно працювати від джерел постійного струму — акумуляторних батарей з напругою 6 В, 12 В або 24 В.

Система терморегулювання в термоелектричних холодильниках, як і в абсорбційних, може бути як автоматичною, так і керованою вручну. У випадку неавтоматичної схеми необхідна температура охолодження встановлюється шляхом ручного регулювання живлення термобатарей — наприклад, перемикачем потужності. Передбачена також можливість зміни режиму роботи холодильника з охолодження на нагрів (актуально для зимового періоду), що досягається за рахунок реверсу напрямку струму, який протікає через термоелементи.

Автоматичне терморегулювання використовується при циклічному режимі роботи термоелектричного холодильника. Така система включає терморегулятор, який керує увімкненням та вимкненням однієї з секцій первинної обмотки

трансформатора. У цьому випадку можуть застосовуватись добре відомі сильфонні терморегулятори, аналогічні тим, що використовуються у компресійних і абсорбційних холодильниках.

Для запобігання перегріву термоелектричної батареї в аварійних ситуаціях передбачено автоматичний захист на основі біметалевих термореле. Зазвичай такі елементи встановлюються на радіаторі гарячих спаїв. У разі підвищення температури радіатора до критичного значення контакти термореле розмикаються, і живлення холодильника автоматично вимикається з мережі.

Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто теоретичні основи функціонування термоелектричного пристрою. Для реалізації його конструкції наведено ключові розрахункові формули, що дозволяють визначити основні конструктивні параметри. Представлено вихідні дані, необхідні для обчислення основних експлуатаційних характеристик термоелектричного пристрою, а також подано формули, що застосовуються при розрахунку стандартного термоелектричного модуля.

						Арк.
						44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА СИСТЕМА ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ ТА ТЕРМОІЗОЛЯЦІЇ КОРПУСУ ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Розробка системи тепловідведення від термоелектричної батареї

Оскільки зниження температурної різниці між гарячими та холодними з'єднаннями термоелементів підвищує ефективність термоелектричного охолодження, під час розробки побутових термохолодильників велике значення надається оптимальному проектуванню систем тепловідведення.

Для того щоб забезпечити підвищення температури на стороні холодних з'єднань, необхідно налагодити ефективну теплопередачу від внутрішнього об'єму холодильної камери. З цією метою внутрішню поверхню камери зазвичай виготовляють із добре теплопровідних металевих матеріалів, як-от алюмінієві сплави. Одна зі стінок щільно прилягає до термобатареї, іноді через проміжний теплообмінний елемент. Інші стінки, не з'єднані з термоелементами, виконують функцію теплових радіаторів або охолоджувальних пластин.

Ефективність теплопередачі до холодної частини термоелектричного модуля може бути суттєво покращена завдяки організованій циркуляції повітря всередині камери. Це дозволяє використовувати дешевші й легші пластмасові матеріали для виготовлення камери. Водночас така система примусового підведення тепла є економічно доцільною лише для холодильників з великим внутрішнім об'ємом.

Покращити відведення тепла від холодних спаїв можна шляхом організації примусової циркуляції повітря в камері. Це дозволяє використовувати легші та дешевші пластичні матеріали для виготовлення самої камери. Водночас така система доцільна з економічного погляду лише у холодильниках із великою внутрішньою місткістю.

Для зниження температури гарячих спаїв у термоелектричних батареях застосовують спеціалізовані системи ефективного тепловідведення, вартість яких має бути обґрунтована відповідним зростанням енергоефективності пристрою.

Усі системи тепловідведення від гарячих спаїв можна умовно поділити на

									Арк.
									45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

два основні типи: системи повітряного охолодження; системи з використанням проміжного теплоносія.

Перший тип зазвичай реалізується у вигляді радіаторів, які охолоджуються за рахунок потоку навколишнього повітря. Для підвищення ефективності охолодження швидкість цього потоку збільшують як конструктивними рішеннями, так і шляхом встановлення вентиляторів. У термоелектричних холодильниках малої місткості (до 10 літрів) застосовуються спеціальні повітряні канали, тоді як у холодильниках більших об'ємів (понад 10 літрів) використовуються вентилятори.

Системи охолодження повітрям гарячих спаїв застосовуються в термоелектричних холодильниках, де допустимий температурний перепад між гарячими та холодними спаями не перевищує 30 °С.

Системи з проміжним теплоносієм використовуються у випадках, коли необхідно забезпечити глибше охолодження, а різниця температур між гарячими та холодними спаями перевищує 30 °С. При використанні водяного охолодження температурний перепад між гарячими спаями термобатарей та охолоджувальною водою становить орієнтовно 5–8 °С, тоді як при повітряному охолодженні ця різниця між гарячими спаями та навколишнім повітрям сягає 10–12 °С. Це свідчить про вищу ефективність теплообміну між спаями та водою порівняно з повітрям. Циркуляція проміжного теплоносія в системах охолодження може здійснюватися як природним, так і примусовим способом. Використання насосів для забезпечення примусової циркуляції ускладнює конструкцію, тому частіше застосовують природну циркуляцію, яка базується на різниці густини холодної та нагрітої рідини поблизу спаїв.

Для забезпечення ефективної роботи термоелектричного холодильника необхідне якісне теплове з'єднання термобатарей з об'ємом, що підлягає охолодженню (холодильною камерою), з одного боку, та з системою тепловідведення - з іншого. З цією метою одну зі стінок холодильної камери виготовляють із алюмінієвого сплаву, що має високу теплопровідність.

У даній конструкції термоелектричного холодильника було обґрунтовано обрано тип та конфігурацію системи тепловідведення відповідно до вимог експлуатації.

						Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Суть способу охолодження об'єкта за допомогою каскадної термоелектричної батареї полягає в поетапному (дискретному) перенесенні тепла від охолоджуваного об'єкта через каскади з проміжним акумулюванням тепла у теплових накопичувачах. При цьому на клеми батареї подається регульований стабілізований постійний струм. Кожен каскад працює у двох режимах — режимі номінальної холодопродуктивності та режимі теплового ключа. Тривалість кожного режиму, а також величина струму через каскади регулюються під час встановлення стаціонарного теплового режиму залежно від температур охолоджуваного об'єкта і теплових акумуляторів.

Для досягнення необхідного рівня охолодження термоелементи з'єднуються в послідовний ланцюг, утворюючи термоелектричну батарею. Водночас реалізація такого способу супроводжується значним зниженням холодильного коефіцієнта - відношення кількості відведеного тепла до витраченої електричної енергії - у разі збільшення температурного перепаду між гарячими та холодними спаям термобатареї. Найбільш близьким за технічною сутністю та отримуваним ефектом є метод охолодження на основі використання каскадної термоелектричної батареї. Суть цього методу полягає у послідовному перенесенні тепла від охолоджуваного об'єкта через каскади термоелементів при подачі на клеми батареї регульованого стабілізованого постійного струму до моменту досягнення стаціонарного режиму роботи.

Холодні спаї першого каскаду відводять тепло безпосередньо від об'єкта, і це тепло, разом із електричною потужністю, спожитою першим каскадом, надходить до холодних спаїв другого каскаду. У свою чергу, третій каскад приймає на себе тепловий потік, який вже включає сумарну електричну потужність, спожиту першим і другим каскадами, і так далі. Таким чином, кожен наступний каскад, будучи електрично з'єднаним із попереднім, повинен мати більшу холодопродуктивність. Це, у свою чергу, призводить до потреби у збільшенні кількості дефіцитних напівпровідникових матеріалів для побудови ефективної каскадної системи. Загальна електрична потужність, споживана каскадною термоелектричною батареєю, є сумою потужностей, що споживаються кожним із каскадів окремо. Відмітною особливістю цього способу охолодження є дискретне пере-

									Арк.
									47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

несення тепла між каскадами з його проміжним накопиченням у теплових акумуляторах. При цьому кожен каскад працює в режимах номінальної холодопродуктивності та теплового ключа, а тривалість цих режимів і сила струму через каскади регулюються залежно від температур охолоджуваного об'єкта та стану теплових акумуляторів у процесі виходу системи на стаціонарний режим.

Для втілення запропонованої технології охолодження було створено відповідну конструктивну схему (рис. 3.1). Об'єкт, що підлягає охолодженню (поз. 1), термічно взаємодіє з тепловим акумулятором (поз. 2), який входить до складу першого тепловідвідного каскаду термоелектричної батареї. Цей акумулятор реалізовано у вигляді теплопровідної пластини з оребреною поверхнею, що забезпечує ефективне сприйняття тепла. Він, у свою чергу, знаходиться у прямому тепловому контакті з холодними спаями термоелементів (поз. 3), що формують перший каскад системи.

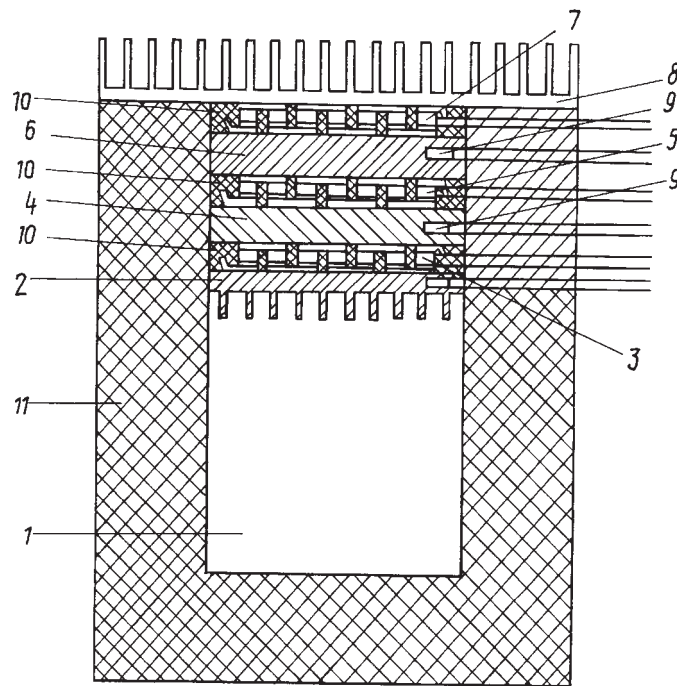


Рисунок 3.1 - Конструктивна схема пристрою охолодження згідно із запропонованою технологією

Гарячі спаї термоелементів першого каскаду перебувають у тепловому контакті з тепловим акумулятором (поз. 4), який виконаний у формі теплопровідної пластини. Ця пластина одночасно контактує з холодними спаями наступного каскаду термоелементів (поз. 5). Далі, гарячі спаї термоелементів другого каска-

ду передають тепло тепловому акумулятору третього каскаду (поз. 6), який також реалізовано у вигляді теплопровідної плити. Акумулятор 6 зв'язаний тепловим контактом із холодними спаями термоелементів третього каскаду (поз. 7), гарячі спаї яких, у свою чергу, з'єднані з радіатором (поз. 8), виконаним як оребрена плита з високою теплопровідністю. Кожен з акумуляторів (поз. 2, 4 і 6) обладнаний температурним датчиком (поз. 9), що дозволяє контролювати теплові умови на кожному етапі передачі тепла. Простір між акумуляторами заповнений теплоізоляційним матеріалом (поз. 10) для мінімізації теплових втрат. Весь охолоджувальний вузол, що включає об'єкт (поз. 1) і термоелектричну батарею, додатково захищений зовнішнім теплоізоляційним шаром (поз. 11), який забезпечує стабільність температурного режиму.

Розрахунки систем охолодження. Параметри для розрахунку: $I_{\max} = 3.7$ А, $Q_{\max} = 37.4$ Вт, $U_{\max} = 16.3$ В, $T_{\max} = 72$ К, Розміри: $40 \times 40 \times 4.8$ мм

Для визначення мінімальної температури, яку можливо досягти в термоелектричному холодильнику, було використано програмне забезпечення, надане компанією «НВП «Модуль»[5]. Розрахунок проводився для холодильника з такими геометричними параметрами: висота - 1 м, глибина - 0,5 м, ширина - 1 м. Товщина теплоізоляційних стінок становила 5 см. Температура навколишнього середовища - 25 °С. Внутрішній об'єм охолоджуваної порожнини дорівнює 529 000 см³. У розрахунковій моделі для гарячої сторони застосовувався радіатор з такими характеристиками: кількість ребер — n , довжина ребер $L_2 = 30$ см, висота радіатора $L = 30$ см. Аналогічний радіатор передбачається і для холодної сторони. Оптимальною напругою живлення для забезпечення стабільної роботи системи визнано 14 В. При збільшенні напруги радіатор гарячої сторони вже не забезпечуватиме необхідного тепловідведення. За цих умов маємо такі розрахункові значення: сила струму: $I = 3.44$ А; споживана потужність: $W = 48.11$ Вт; теплова потужність, що відводиться з холодної сторони: $Q_x = 17.46$ Вт; теплова потужність, що виділяється на гарячій стороні: $Q_g = 65.57$ Вт. За розрахунками, температура повітря всередині камери холодильника становитиме приблизно 13.3 °С. У разі використання двох термоелектричних елементів Пельтьє за аналогічних умов температура може знизитися до 5.6 °С.

						Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3.2. Розробка вентиляційної системи тепловідведення від гарячих спаїв

3.2.1 Розрахунок діаметру робочого колеса вентилятора

Якщо відома характеристика вентилятора, що підходить за типом для заданих умов експлуатації, і його критерій швидкохідності дорівнює або наближається до критерію швидкохідності вентилятора, що проектується, тоді розміри останнього можна визначити за допомогою формул перерахунку.

Геометричний масштаб - тобто коефіцієнт, на який необхідно помножити розміри дослідного вентилятора для отримання розмірів розрахункового вентилятора — може бути визначений з таких умов:

$$\frac{D_1}{D} = \frac{\omega}{\omega_1} \sqrt{\frac{p_1 \rho}{p \cdot \rho_1}} \quad (3.1)$$

Виходячи з базової конструкції, приймаємо за основу відповідні характеристики для подальших розрахунків. Тиск $p_1 = 392$ Па, і кутова швидкість $\omega_1 = 100$ рад/с.

Маємо розмірну характеристику вентилятора подібного типу, з якої випливає, що при заданому діаметрі $D = 0,091$ (рис. 2.1) $\omega = 75$ рад/с, і тиску $p = 200$ Па:

$$\frac{D_1}{D} = \frac{\omega}{\omega_1} \sqrt{\frac{p_1 \rho}{p \cdot \rho_1}} = \frac{75}{100} \cdot \sqrt{\frac{39,2}{200}} = 1,05 \quad (3.2)$$

Звідки $D_1 = D \cdot 1,05 = 0,091 \cdot 1,05 = 0,096$ м.

						Арк.
						50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для обраного вентилятора передбачається використання електродвигуна марки Двигун вентилятора обдуву LG4680 JB1026C [9].

Стандартні вентилятори мають конфігурацію лопатей, зображену на рис. 3.2. У даній кваліфікаційній роботі, з метою збільшення площі контакту лопатей вентилятора з повітряним потоком, а відповідно - для підвищення ефективності відведення тепла, передбачено модифікацію конструкції лопатей вентилятора (рис. 3.3). [БРМА.25.00.00.000 ГК].

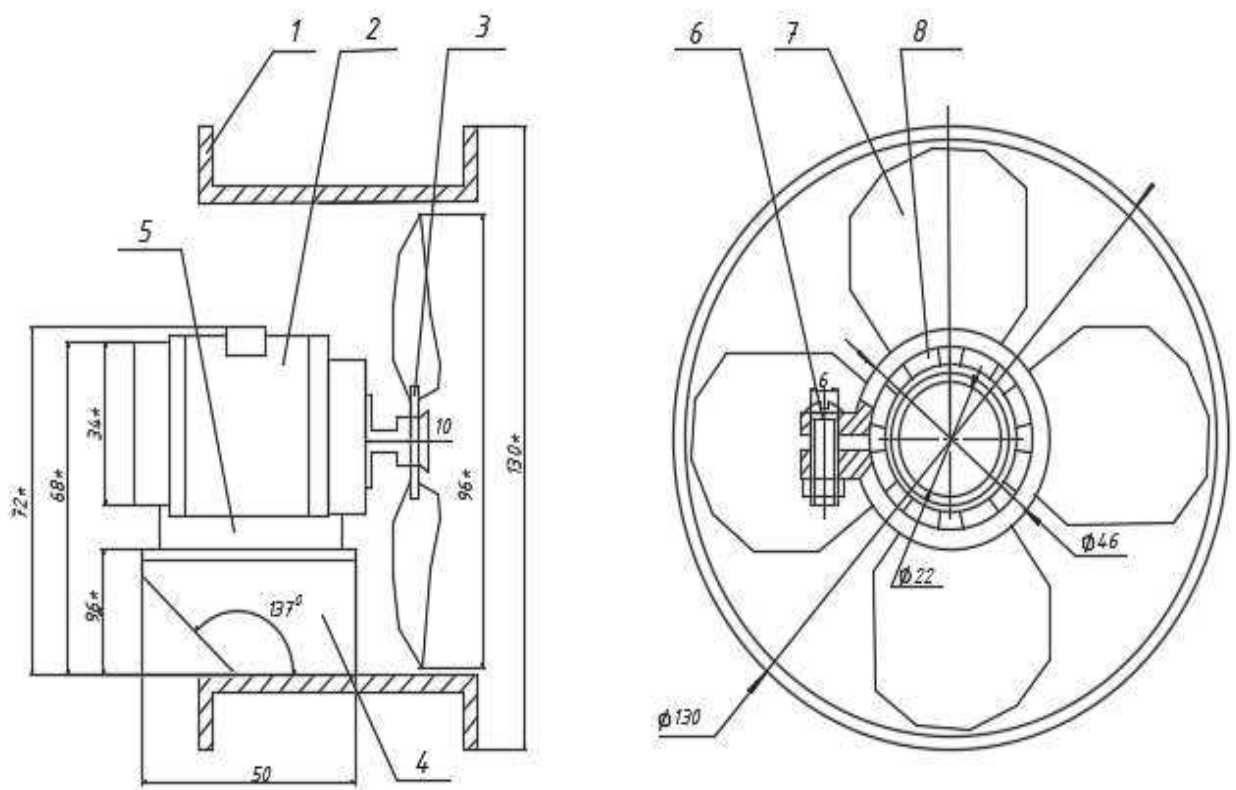


Рисунок 3.2 - Схема осьового вентилятора

Лопатеве колесо монтується на спеціальному ободі, який насаджується на втулку та фіксується за допомогою клемового з'єднання. Сама втулка жорстко встановлюється на вал електродвигуна.

3.2.2 Розрахунок клемового з'єднання

Для вентилятора, що встановлюється у термоелектричний холодильник, застосовується клемове з'єднання з маточиною, що має проріз. Щоб забезпечити нерухомість лопатевого колеса на втулці в осьовому напрямку, необхідно створити достатню силу тертя між контактними поверхнями втулки та отвору лопатевого колеса. Ці сили тертя досягаються шляхом достатньої затяжки болта клемового з'єднання. Далі виконується розрахунок клемового з'єднання, і відповідно до умови міцності підбирається необхідний болт.

Умова міцності:

$$5F_{зам} \cdot f \geq F_a \quad (3.3)$$

де $F_{зам}$ - зусилля затягування клем; $f = 0,15$ - коефіцієнт тертя; $F_a = 960$ кН - осьова сила.

Визначаємо зусилля затягування клем:

$$F_{зам} = \frac{F_a}{5 \cdot f} = \frac{960}{5 \cdot 0,15} = 1280 \text{ кН.} \quad (3.4)$$

Підбираємо для болтових з'єднань. Матеріал болта - сталь 3.

Допустиме напруження для цього матеріалу:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{[s]} = \frac{200}{2} = 100, \quad (3.5)$$

де $[s] = 1,25 \dots 2,25$ — коефіцієнт запасу; $\sigma_T = 200$ МПа - межа плинності;

Умова міцності для цього з'єднання:

$$\sigma_{екв} = 1,3F_{зам} / \frac{\pi d_1^4}{4} \leq [\sigma] \quad (3.6)$$

						Арк.
						52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Звідки внутрішній діаметр різьби болта визначається:

$$d_1 = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 4 \cdot F_{зам}}{\pi \cdot [\sigma]}} = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 4 \cdot 1280}{3,14 \cdot 100}} = 4,60 \quad (3.7)$$

Відповідно до ДСТУ EN 10226-1:2016 приймаємо для використання болт типу М6, для якого: $d_1 = 4,918$ мм, $d_2 = 5,350$ мм, крок різьби - 1 мм.

3.2.3 Оптимізація конфігурації лопатей вентилятора охолодження

Розглянемо різні варіанти конфігурації лопатей вентилятора. Нижче наведено розрахункові дані, що стосуються порівняння кінематичних та експлуатаційних характеристик базової моделі вентилятора та вентилятора, запропонованого для встановлення у розроблюваній конструкції холодильника.

Слід зазначити, що перехід від уніфікованої конфігурації лопатей вентилятора, до запропонованого у до використання у кваліфікаційній роботі, здійснювався поступово із використанням обчислювальної техніки. [9].

У пояснювальній записці подано детальний опис структури планів швидкостей для двох варіантів конфігурації лопатей, які визнано найбільш доцільними. Можна виразити розрахунковий напір H_i як функцію від витрати повітря, розмірів лопатей та їх геометричної форми [9].

Для подальшого аналізу необхідно визначити швидкості часткових точок на поверхні лопатей (рис. 3.4 а, б) [9].

На цьому рисунку зображено лопаті: а - стандартного вентилятора; б - лопать вентилятора, запропонованого для встановлення у термоелектричний холодильник [9].

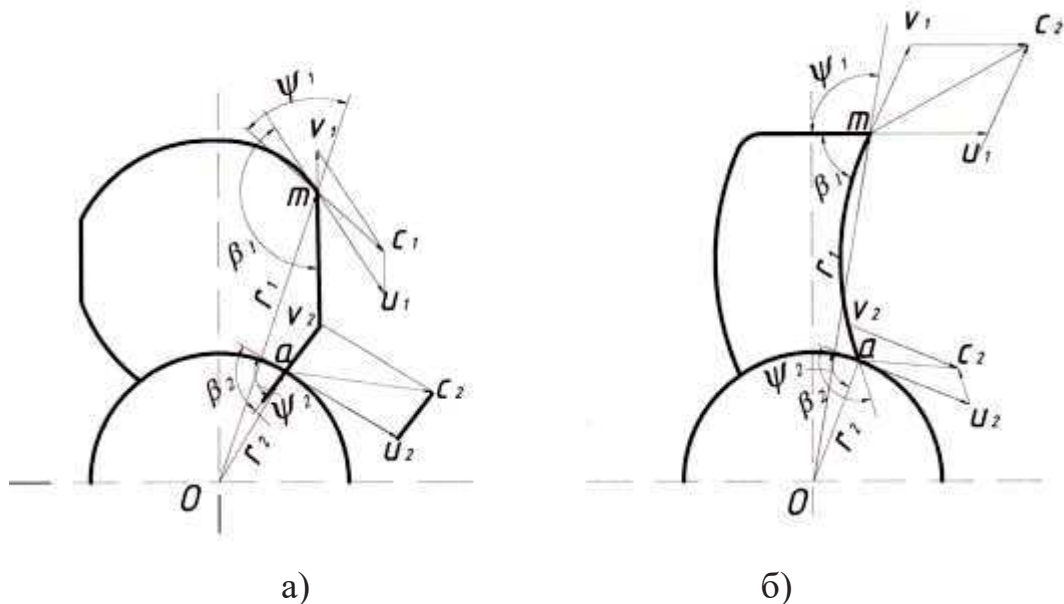


Рисунок 3.4 - Кінематичні характеристики лопастей

Розглянемо точку m , що розміщена на передній (набігаючій) крайці лопаті вентилятора. Її також можна інтерпретувати як повітряну частинку, яку захоплює і переміщує вентилятор під час обертання. Частинка рухається з певною абсолютною швидкістю, що позначається як s . На рисунку 3.4 зображено відповідні вектори швидкості — c_1 і c_2 : c_1 — швидкість частинки поблизу верхнього краю лопаті, c_2 — швидкість у нижній частині, біля її основи [9].

Точка m розташована на радіусі r від центра обертання вентилятора O . Кут між вектором c_1 та радіусом r_1 визначає напрям абсолютної швидкості s_1 у цій зоні.

Кількісна характеристика руху частки повітря m' , що переміщується за одну секунду біля точку m , визначається величиною $m' \cdot s$.

Обрахуємо кількісну величину моменту руху точки (рис. 3.5) [9]:

$$M = m' \cdot c_1 \cdot r_1 \cdot \sin \gamma \quad (3.8)$$

Вектор абсолютної швидкості s можна представити у вигляді суми двох компонент. Одна з них — тангенціальна складова c_1 , напрям дії якої перпендикулярний до радіального вектора та збігається з дотичною до траєкторії руху.

Позначимо її проекцією c' на напрямок, що проходить по дотичній до кола: $c' = c \sin \gamma$, де γ — кут між вектором c та радіусом. Із цього рівняння можна зробити висновки щодо залежності тангенціальної компоненти швидкості від геометрії положення точки [9].

$$M_1 = m^1 \cdot r \cdot c' , \quad (3.9)$$

де $m^1 = \frac{V \cdot \gamma}{g}$ - витрата повітря за секунду у лопатях вентилятора.

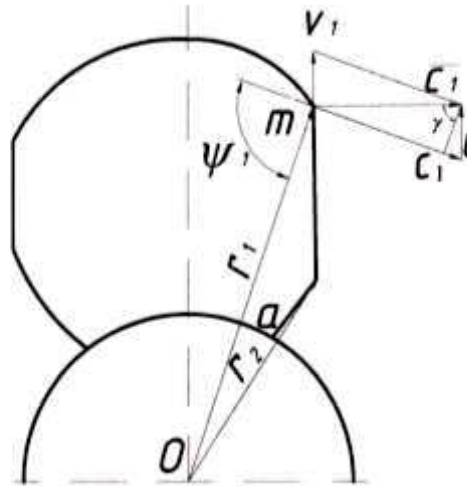


Рисунок 3.5 – Положення точки m (на крильчатці)

Для точки вихода повітря момент можна виразити аналогічно:

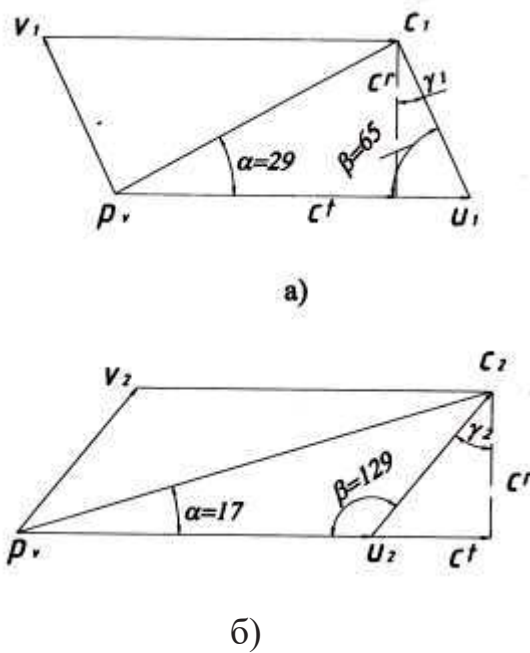
$$M_2 = m^1 r_2 c_2^r \quad (3.10)$$

Різниця $\Delta M = M_2 - M_1 = m^1 (r_1 \cdot c_1^r - r_2 \cdot c_2^r)$ - це змінна кількості маси руху повітря m^1 за час проходження через лопаті вентилятора [9].

Позначимо швидкість окружну точки m лопасті вентилятора через $u = \omega r$ ($u_1 = \omega r_1$); ($u_2 = \omega r_2$) [9].

Для подальших обчислень необхідно встановити швидкості окремих точок крильчатки.

Визначення швидкостей за допомогою графічного методу. Розглянемо побудову схем швидкостей для верхнього положення крильчатки вентилятора у базовій конфігурації.



а) положення для точки *m*; б) положення для точки *a*

Рисунок 3.6 - План швидкостей для базового варіанту вентилятора

Позначимо окружну швидкість лопаті вентилятора через $u = \omega r$ ($u_1 = \omega r_1$); ($u_2 = \omega r_2$) [9].

Тоді для точки *m*:

$$u_1 = \omega \cdot r_1 = 75 \cdot 0,092 = 6,9 \quad (3.11)$$

Відкладаємо відрізок pu_1 , горизонтально в масштабі:

$$\mu_v = \frac{u_1}{[p_v \cdot u_1]} = \frac{3}{100} = 0,03 \frac{м}{мм \cdot с} \quad (3.12)$$

де $p_v u_1 = 100$ мм - довільно вибрана величина.

Тоді відносна швидкість визначиться:

						Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$v_1 = [pv_1] \cdot \mu_1 = 48,98 \cdot 0,069 = 3,38 \text{ м/с}; \quad (3.14)$$

Радіальна складова абсолютної швидкості лопаті:

$$c_1^r = [p_v c_1^r] \cdot \mu_v = 44,39 \cdot 0,069 = 3,06 \text{ м/с}. \quad (3.15)$$

Тангенціальна складова абсолютної швидкості лопаті:

$$c_1^t = [p_v c_1^t] \cdot \mu_v = 79,3 \cdot 0,069 = 5,47 \text{ м/с}; \quad (3.16)$$

Повна абсолютна швидкість лопаті буде рівна:

$$c_1 = [p_v c_1] \cdot \mu_v = 90,88 \cdot 0,069 = 6,27 \text{ м/с}. \quad (3.17)$$

Відповідно, для точки *a* визначаємо такі параметри:

Колова швидкість:

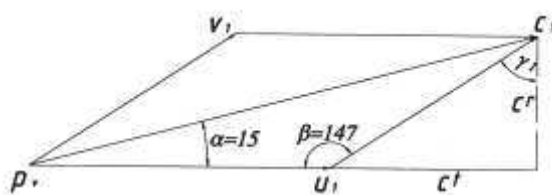
$$u_2 = \omega \cdot r_2 = 75 \cdot 0,034 = 2,55 \text{ м/с} \quad (3.18)$$

$$\mu_v = \frac{u_2}{[p_v \cdot u_2]} = \frac{2,55}{100} = 0,02 \frac{\text{м}}{\text{мм} \cdot \text{с}} \quad (3.19)$$

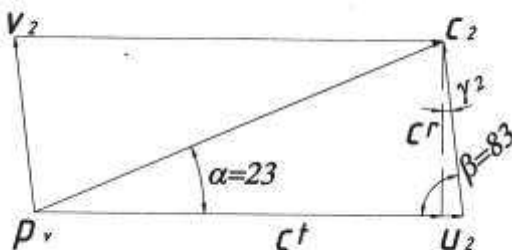
Тоді відносна швидкість точки *a* визначиться лопаті:

$$v_2 = [pv_2] \cdot \mu_2 = 52,95 \cdot 0,0255 = 1,35 \text{ м/с}; \quad (3.20)$$

						Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

а) положення для точки *m*; б) положення для точки *a*

Рисунок 3.7 - План швидкостей для розроблюваного варіанту

Радіальна складова абсолютної швидкості буде рівна:

$$c_2^r = [p_v \cdot c_2^r] \mu_{v,2} = 41,14 \cdot 0,02 = 1,04 \text{ м/с}; \quad (3.21)$$

Тангенціальна складова абсолютної швидкості буде рівна:

$$c_2^t = [p_v \cdot c_2^t] \cdot \mu_v = 133,32 \cdot 0,02 = 3,4 \text{ м/с}; \quad (3.22)$$

Повна абсолютна швидкість визначиться:

$$c_2 = [p_v \cdot c_2] \cdot \mu_{v,2} = 139,53 \cdot 0,025 = 3,56 \text{ м/с}. \quad (3.23)$$

Для розробленого варіанту величини швидкостей визначаються:

для точки *m*:

$$u_1 = \omega \cdot r_1 = 75 \cdot 0,045 = 3,375 \text{ м/с}.$$

(3.24)

Відкладаємо відрізок $p_v u_1$, горизонтально у масштабі:

$$\mu_v = \frac{u_1}{[p_v \cdot u_1]} = \frac{3}{100} = 0,03 \frac{м}{мм \cdot с}, \quad (3.25)$$

де $p_v u_1 = 100$ мм довільно вибрана величина.

Тоді радіальна швидкість точки на лопаті визначиться:

$$v_1 = [pv_1] \cdot \mu_1 = 81,24 \cdot 0,03 = 2,44 \text{ м/с}. \quad (3.26)$$

Радіальна складова абсолютної швидкості лопаті:

$$c_1^r = [p_v c_1^r] \mu_v = 168,63 \cdot 0,03 = 5,05 \text{ м/с}. \quad (3.27)$$

Тангенціальна складова абсолютної швидкості точки лопаті:

$$c_1^t = [p_v c_1^t] \cdot \mu_v = 44,25 \cdot 0,03 = 1,33 \text{ м/с}. \quad (3.28)$$

Повна абсолютна швидкість лопаті буде дорівнювати:

$$c_1 = [p_v c_1] \cdot \mu_v = 173,86 \cdot 0,03 = 5,22 \text{ м/с}. \quad (3.29)$$

Відповідно проводимо обчислення для точки а:

Колова швидкість точки:

$$u_2 = \omega \cdot r_2 = 75 \cdot 0,034 = 2,555 \text{ м/с}. \quad (3.30)$$

$$\mu_v = \frac{u_2}{[p_v u_2]} = \frac{2,555}{100} = 0,0256 \frac{м}{мм \cdot с} \quad (3.31)$$

Тоді радіальна швидкість точки а лопаті визначиться:

$$v_2 = [pv_2] \cdot \mu_2 = 40,81 \cdot 0,0255 = 1,04 \text{ м/с}; \quad (3.32)$$

Радіальна складова абсолютної швидкості:

$$c_2^r = [p_v c_2^r] \cdot \mu_{v2} = 40,51 \cdot 0,0255 = 1,033 \text{ м/с}; \quad (3.33)$$

Тангенціальна складова абсолютної швидкості точки:

$$c_2^t = [p_v c_2^t] \cdot \mu_v = 95,03 \cdot 0,0255 = 2,42 \text{ м/с}; \quad (3.34)$$

Повна абсолютна швидкість точки визначиться:

$$c_2 = [p_v c_2] \cdot \mu_{v2} = 103,3 \cdot 0,0255 = 2,63 \text{ м/с} \quad (3.35)$$

Теоретичне значення напору, який генерується вентилятором, можна обчислити з урахуванням гідродинамічних параметрів повітряного потоку. Об'єм повітря, що подається вентилятором за одиницю часу (секундна витрата), визначається за виразом [9]:

$$m^l = \frac{\gamma}{g} = \frac{2,1}{9,8} = 0,21 \text{ м/с}. \quad (3.36)$$

Енергія, яку набуває повітря, що проходить через вентилятор:

$$E = \omega \Delta M = m^l (u_1 c_1^t - u_2 c_2^t) = 0,21 \cdot (3 \cdot 5,47 - 2,55 \cdot 3,4) = 4,21 \text{ Дж} \quad (3.37)$$

Теоретичний напір, що створюється вентилятором [9]:

$$H_T = \frac{E}{V} = \frac{\gamma}{g} (u_2 c_2^t - u_1 c_1^t), \quad (3.38)$$

де E - енергія повітря, Дж; $\gamma = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - статичний тиск;

Для базового вентилятора:

$$H_T^0 = \frac{E}{V} = \frac{\gamma}{g} (u_2 c_2^t - u_1 c_1^t) = \frac{4,2}{9,8} (3 \cdot 5,04 - 3 \cdot 2,42) = 0,42 \text{ кг/м}^3 \quad (3.39)$$

						Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для розробленої моделі вентилятора:

$$H_T^{(n)} = \frac{E}{V} = \frac{\gamma}{g} (u_2 c_2^r - u_1 c_1^r) = \frac{4,2}{9,8} (6,9 \cdot 5,47 - 6,9 \cdot 3,4) = 0,86 \text{ кг/м}^3 \text{ (3.40)}$$

Слід відзначити, що значення швидкості c' визначається шляхом розгляду еквівалентного механізму лопаті (рис. 3.7 а).

Виконані розрахунки підтвердили доцільність використання запропонованої модифікації вентилятора.

Запропонована форма лопаті вентилятора демонструє перевагу порівняно із базовою конструкцією, оскільки: забезпечує теоретичний приріст напору повітря на 26 %; у базовій формі для досягнення підвищеного тиску необхідна значно більша витрата повітря, що складно реалізувати в обмеженому просторі холодильника.

3.3 Визначення раціональної товщини теплоізоляції корпусу термоелектричного охолоджуючого пристрою

Розрахунок теплоізоляції термоелектричного охолоджуючого пристрою зводиться до визначення оптимальної товщини ізоляційного шару, яка забезпечує необхідний термічний опір для зменшення теплопроникнення в охолоджувану камеру. Як відомо, термічний опір є оберненою величиною до загального коефіцієнта теплопередачі конструктивних елементів корпусу.

Товщину ізоляційного шару для бічних стінок, дна та кришки було визначено за результатами математичного моделювання нестационарних температурних полів. На основі отриманих розрахунків геометричних характеристик і теплових параметрів холодильника виконано аналіз необхідної товщини ізоляції для досягнення ефективного теплозахисту.

Окрім теплотехнічних розрахунків, проведено економічну оцінку вартості застосованих ізоляційних матеріалів, а також розраховано сумарне енергоспо-

									Арк.
									61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

живання пристрою за прогнозований строк служби. Це дало змогу обґрунтувати вибір оптимальної товщини теплоізоляційного шару з урахуванням співвідношення між витратами на теплоізоляцію та витратами на електроенергію протягом експлуатації пристрою.

Нижче представлено розрахунок загальної вартості електроенергії, яку споживає охолоджувач за весь період його служби (грн):

$$A_{el} = N_{el} \cdot T_{\delta} \cdot q_{el}, \quad (3.50)$$

де N_{el} - електроенергія, яка споживається за добу пристроєм, $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}$; T_{δ} - строк служби (доба); q_{el} - вартість електроенергії, $q_{el} = 0,35 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$.

Строк служби охолоджуючого пристрою за добу:

$$T_{\delta} = T_p \cdot 365, \quad (3.51)$$

де T_p - строк служби у роках, $T_p = 15$ років.

Електроенергія, що споживається за добу охолоджуючи пристроєм ($\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{доба}$):

$$N_{el} = (Q \cdot t_{\delta}) / (3600 \cdot 1000 \cdot \varepsilon), \quad (3.52)$$

де Q - потужність теплового потоку, що проходить через стінки пристрою, Вт; t_{δ} - кількість секунд в добі (86400 с); ε - холодильний коефіцієнт пристрою, $\varepsilon = 0,97$.

Потужність теплового потоку через стінки охолоджуючого пристрою:

$$Q = 1,16 \cdot k \cdot F \cdot \Delta t, \quad (3.53)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі через стінку охолоджуючого пристрою,

						Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ккал/(год·м²·град.); F - площа бічних стінок охолоджуючого пристрою, м²; Δt - перепад температур ззовні та в середині охолоджуючого пристрою ($\Delta t = 27$ град).

Коефіцієнт теплопередачі через стінки охолоджуючого пристрою:

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}, \quad (3.54)$$

де α_1 и α_2 - коефіцієнти тепловіддачі поверхонь стінок охолоджуючого пристрою, $\alpha_1 = \alpha_2 = 8,9$ ккал/(год·м²·град.); δ - товщина шару теплоізоляції охолоджуючого пристрою, м, λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції, використовуємо пінополістирол для якого $\lambda = 0,025$ ккал/(год·м·град.).

Площа стінок охолоджуючого термоелектричного пристрою:

$$F = (a \cdot H + b \cdot H + a \cdot b) \cdot 2 \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3.55)$$

де a - зовнішня ширина охолоджуючого пристрою $a = 1$ м; b - внутрішня глибина охолоджуючого пристрою $b = 0,565$ м; H - зовнішня висота охолоджуючого пристрою, м.

Зовнішня висота шафи охолоджуючого пристрою:

$$H = \frac{V}{((a - 2 \cdot \delta) \cdot (b - 2 \cdot \delta)) + 2 \cdot \delta} \quad (3.56)$$

де V - внутрішній об'єм шафи пристрою $V = 0,576$ м³. Для розрахунків змінювали об'єм камери від 0,1 м³ до 0,6 м³. Визначали оптимальні параметри витрат на теплоізоляцію та на електроенергію. Визначали конструктивні параметри термоелектричного охолоджуючого пристрою.

Вартість шафи (основна складова це теплоізоляція) пристрою:

$$A_{шафи} = q_{mi} \cdot m_{mi} \quad (3.57)$$

						Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

де q_{mi} - вартість 1 кілограма теплоізоляції (пінополіуретан) (200 грн./кг); m_{mi} - маса теплоізоляції (кг).

Маса теплоізоляції охолоджуючого пристрою:

$$m_{mi} = \rho_{mi} \cdot V_{mi}, \quad (3.58)$$

де ρ_{mi} - густина матеріалу теплоізоляції (пінополіуретан) $\rho_{mi} = 50,6$ кг/м³; V_{mi} - об'єм теплоізоляції (пінополіуретан) пристрою, м³.

Об'єм теплоізоляції охолоджуючого пристрою:

$$V_{mi} = \delta \cdot F \quad (3.59)$$

Розрахунки здійснено за допомогою редактора OpenOffice Calc та представлені у додатках.

Складальне креслення термоелектричного охолоджуючого пристрою із системою термоелектричної батареї Пельтьє та системою охолодження показано у графічній частині [БРМА 25.00.00.000 ВЗ].

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу конструктивних рішень термоелектричних холодильників встановлено, що кожна з розглянутих конфігурацій має свої переваги й обмеження. Для підвищення ефективності роботи термохолодильників доцільним є внесення ряду технічних удосконалень. Зокрема, рекомендовано впровадити вдосконалену систему автоматичного керування процесами вмикання й вимикання термоелектричних модулів, а також реалізувати більш ефективну систему відведення теплоти від гарячих спаїв. Це дозволить суттєво підвищити холодопродуктивність та енергоефективність холодильного агрегату.

На основі розробленої методики визначення основних теплових і геометричних параметрів було спроектовано систему посиленого тепловідведення.

						Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Здійснено інженерні розрахунки радіатора для ефективного охолодження гарячих спаїв, а також проведено обґрунтування оптимальної товщини теплоізоляції корпусу холодильника з метою мінімізації тепловтрат та зменшення споживання енергії.

						Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Основною метою даної кваліфікаційної роботи була розробка ефективної системи відведення теплоти від гарячих спаїв термоелектричних модулів з метою підвищення їх холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта. У ході виконання розрахунків та впровадження конструктивних рішень було оптимізовано теплоізоляцію між теплообмінними елементами, а також удосконалено систему тепловідведення від гарячих спаїв. Це дозволило суттєво покращити енергетичну ефективність і теплову продуктивність створеного термоелектричного охолоджувального пристрою.

Для цього було проведено теоретичний аналіз принципів отримання холоду на основі термоелектричного ефекту, а також здійснено огляд і аналітичне дослідження термоелектричних холодильних установок, які функціонують за цим принципом. В результаті аналізу встановлено, що існуючі конструкції таких агрегатів мають низку недоліків, зокрема в архітектурі термоелектричних модулів, системах тепловідведення та алгоритмах керування при змінних умовах експлуатації термоелементів.

Було розглянуто теоретичні основи функціонування термоелектричного пристрою. Для реалізації його конструкції наведено ключові розрахункові формули, що дозволяють визначити основні конструктивні параметри. Представлено вихідні дані, необхідні для обчислення основних експлуатаційних характеристик термоелектричного пристрою, а також подано формули, що застосовуються при розрахунку стандартного термоелектричного модуля.

У результаті проведеного аналізу конструктивних рішень термоелектричних холодильників встановлено, що кожна з розглянутих конфігурацій має свої переваги й обмеження. Для підвищення ефективності роботи термохолодильників доцільним є внесення ряду технічних удосконалень. Зокрема, рекомендовано впровадити вдосконалену систему автоматичного керування процесами вмикання й вимикання термоелектричних модулів, а також реалізувати більш ефективну систему відведення теплоти від гарячих спаїв. Це дозволить суттєво підвищи-

						Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ти холодопродуктивність та енергоефективність холодильного агрегату.

На основі розробленої методики визначення основних теплових і геометричних параметрів було спроектовано систему посиленого тепловідведення. Здійснено інженерні розрахунки радіатора для ефективного охолодження гарячих спаїв, а також проведено обґрунтування оптимальної товщини теплоізоляції корпусу холодильника з метою мінімізації тепловтрат та зменшення споживання енергії.

						Арк.
						67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перелік джерел посилань

1. Анатичук Л.І. Термоелементи и термоелектричні пристрої. - К.: Техніка, 1999.-767 с.
2. Булат Л.П. Термоелектричне охолодження: стан і перспективи // Холодильна техніка.1999. № 7, с. 12–14.
3. Sergiy Filin. Termoelectryczne urzadaenia chlodnicze. IPPU MASTA 2002. 225с.
4. Thermoelectric Materials – New Directions and Approaches // MRS,Pittsburgh, 1998. V.478. – 348 p.|
5. Офіційний сайт науково-виробничої фірми Модуль. Код доступу: <https://spf-modul.com.ua/ua/p1801094129-2mt2-12763es-40x40.html>
6. Застосування термоелементів та термопар. Код доступу <https://www.kvota.com.ua/statti/termopara/>
7. Інноваційні, енерго- та ресурсозберігаючі технології галузі: методичні вказівки до вивчення дисципліни для здобувачів вищої освіти ОНР «доктор філософії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / упоряд.: О.С.Поліщук, М.Є.Скиба, С.П.Лісевич, О.О.Коротич, В.О.Харжевський. Хмельницький : ХНУ, 2021. 212 с.
8. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.С. Поліщук, М.Є. Скиба, С.П. Лісевич, А.О. Поліщук, С.В. Каретний, О.В. Вишинський. – Хмельницький: ХНУ, 2022. – 185 с.
9. Удосконалення конструкції системи охолодження термоелектричного автомобільного холодильника О.О. Налобіна, В.В. Якимчук. Вісник КНУТД №5 2010 р. с.296-303.
10. Типи двигунів холодильної техніки. Режим доступу: <https://polaris.in.ua/ua/p1818488095-dvigatel-ventilyatora-obduva.html>

									Арк.
									68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата					

11. Кудря С.О., Головка В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії - Київ, 2009. 201 с

12. Соловей О.І., Лега Ю.Г., Розен В.П. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії Навчальний посібник / О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен та інш.; За заг. ред. О. І. Солов'я - Черкаси: ЧДТУ, 2007. - 490 с.

13. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами і графіками) Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна. 2003р. - 52с.

14. L.I. Anatyshuk and R.V. Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. Berlin: Expert Verlag, 2011.

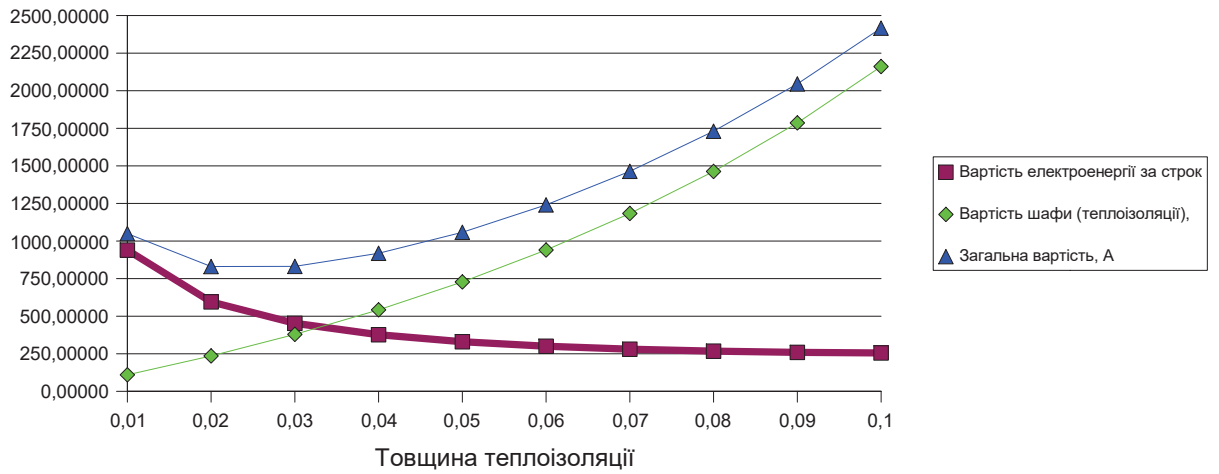
15. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles //Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, 2011.

						Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

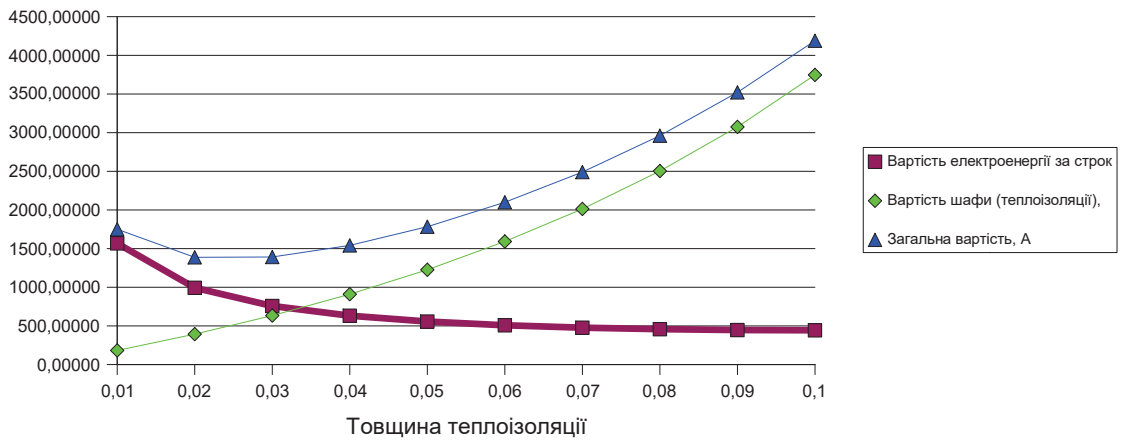
						Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



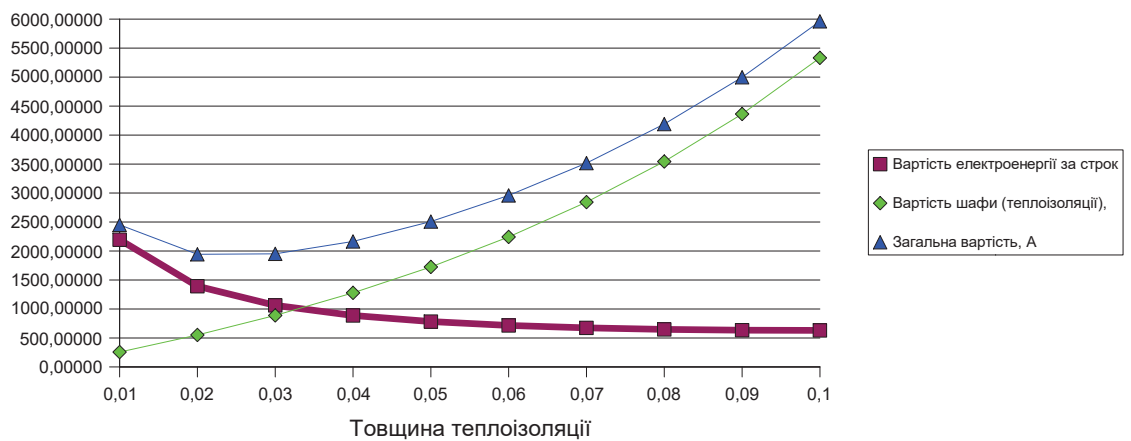
а)

Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



б)

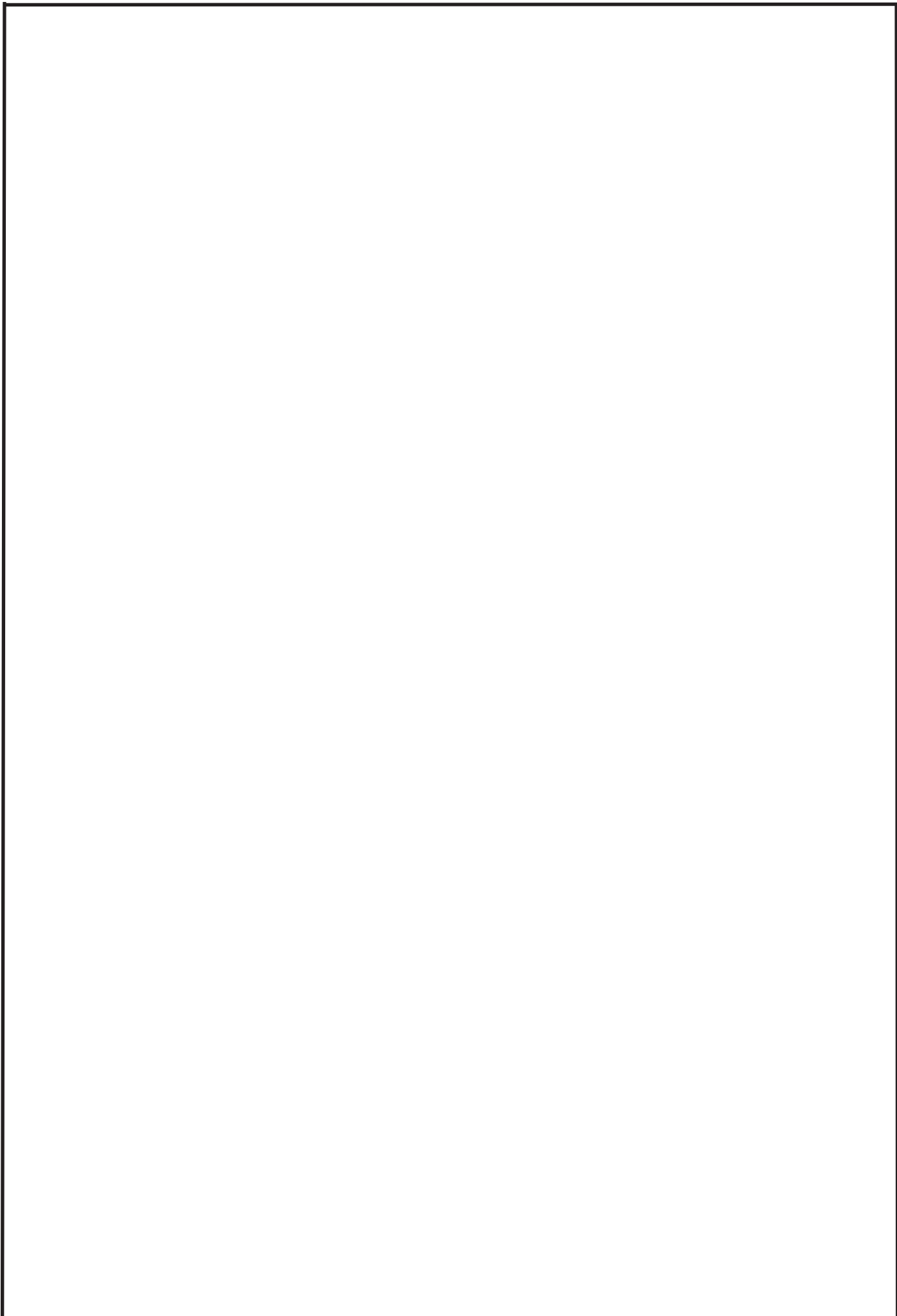
Витрати на теплоізоляцію та електроенергію



в)

Графіки залежності вартості експлуатації холодильника від товщини теплоізоляції: а - об'єм холодильника 0,2 куб.м б - 0,4 куб.м; в - 0,6 куб.м

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------



						Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		