

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дідик Н.І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2023.

Стор. 57; рис. 20; табл. 7; креслень (презентацій) 19; джерел 18.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розробка системи охолодження фотоелектричних модулів».

Метою роботи є розробити систему охолодження фотоелектричних модулів, яка є більш ефективною, ніж звичайний пасивний радіатор з прямими ребрами

У роботі проведено аналіз різних способів та методів охолодження фотоелектричних елементів, встановлено залежність напруги модуля від температури і запропоновано нову конструкцію радіатора. Також проведено імітаційне моделювання роботи розробленого радіатора і порівняно його із типовим.

*Ключові слова: пасивне охолодження; фотоелектричний модуль*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Особливості роботи фотоелектричного елемента .....	9
1.2 Залежність ефективності фотоелектричного елемента від температури і основні способи її зменшення.....	11
1.3 Охолодження фотоелектричного модуля через дуття.....	16
1.4 Висновки до розділу .....	19
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	14
2.1 Методи вимірювання температури сонячних елементів .....	20
2.2 Вимірювання температури переходу сонячного елемента.....	21
2.3 Вимірювальна установка.....	22
2.4 Результати вимірювань.....	25
2.5 Вимірювання температури p-n переходу сонячного елемента на місці.....	28
2.6 Запропонована конструкція системи охолодження фотоелемента.....	29
2.7 Висновки до розділу .....	30
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ .....	
3.1 Базові рівняння .....	31
3.2 Теплове навантаження.....	32
3.3 Методика імітаційного моделювання .....	33
3.4 Результати імітаційного моделювання .....	37
3.4.1 Загальні дані.....	37
3.4.2 Тепловий ефект від довжини ребра.....	38
3.4.3 Вплив напрямку потоку повітря.....	40
3.4.4 Порівняння запропонованої конструкції радіатора та звичайного радіатора .....	41
3.5 Висновки до розділу .....	45

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....	47
4.1 Організаційні та технічні заходи електробезпеки .....	47
4.2 Захист від статичної електрики .....	48
4.3 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	55

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Фотоелектричні (ФЕ) панелі є одним з найважливіших джерел сонячної енергії, що використовується для перетворення сонячного випромінювання, яке падає на них, безпосередньо в електричну енергію. На функціонування фотоелектричних панелей впливає багато факторів, включаючи зовнішні та внутрішні фактори. Зовнішні фактори, такі як швидкість вітру, інтенсивність падаючого випромінювання, температура навколишнього середовища та накопичення пилу на фотоелектричних панелях, неможливо контролювати. Внутрішні фактори можна контролювати, наприклад, температуру поверхні фотоелектричних панелей.

Частина випромінювання, що падає на поверхню фотоелемента, перетворюється на електрику, тоді як решта падаючого випромінювання поглинається всередині фотоелемента. Це, в свою чергу, підвищує температуру поверхні фотоелемента. Відомо, що чим вища температура панелі, тим нижча ефективність перетворення і менша надійність в довгостроковій перспективі.

Згідно з рекомендаціями виробників сонячних панелей, оптимальна робоча температура сонячних панелей становить  $25^{\circ}\text{C}$ . Очікується, що при цій температурі сонячні панелі поглинають максимальну кількість сонячного світла і перетворюють його в корисну енергію (пікова ефективність). Попередні дослідження збігаються з тим, що виробники рекомендують як оптимальну температуру, але розширюють її до певного діапазону. Середній діапазон за результатами багатьох досліджень становить  $15^{\circ}\text{C}$ - $35^{\circ}\text{C}$ .

Перетворення сонячної енергії в корисну потужність, що здійснюється сонячними панелями, безумовно, знизиться, якщо температура поверхні вийде за межі стандартної точки. З метою підвищення ефективності фотоелектричної системи, слід розробити стратегію охолодження модулів. При належному охолодженні можна очікувати, що ефективність сонячних панелей буде знаходитися на рівні верхньої межі стандартної ефективності (19-23 %).

Високі температури впливають на всю електроніку, і компоненти сонячних панелей не є винятком. Накопичення тепла також погіршує стан неелектронних компонентів сонячних панелей, таких як каркас, скляний лист і верхній поверхневий шар сонячних панелей. Зрештою, деградація призведе до значних втрат потужності. Втрата енергії через перегрів означає, що власник платитиме більше за електроенергію. Це суперечить початковій меті встановлення фотоелектричної сонячної системи, яка полягає в економії на рахунках за електроенергію.

На додаток до цього, перегрів пошкоджує сонячні панелі, а це означає, що доведеться їх постійно замінювати. Це ще один спосіб ненавмисно витратити гроші через перегрів.

Очевидно, що існує більш ніж достатньо причин, чому слід часто охолоджувати сонячні панелі. Про способи охолодження сонячних панелей описано у літературному огляді даної роботи.

Для охолодження сонячних елементів використовується багато методів охолодження, таких як пасивне охолодження, активне охолодження, охолодження за допомогою фазозмінних матеріалів (ФЗМ) і охолодження за допомогою ФЗМ з іншими добавками, такими як наночастинки або пористий метал.

Саме тому **актуальними** є розробки в напрямку зменшення температури фотоелементів ФЕС.

**Мета кваліфікаційної роботи:** розробка системи охолодження фотоелектричних модулів, яка є більш ефективною, ніж звичайний пасивний радіатор з прямими ребрами.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналіз різних способів та методів охолодження фотоелектричних елементів.
2. Встановити залежність напруги модуля від температури.
3. Запропонувати нову конструкція радіатора.

4. Провести імітаційне моделювання роботи розробленого радіатора і порівняти його із типовим.

**Структура роботи.** Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 57 арк. формату А4, графічна частина – 19 аркушів презентації.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Особливості роботи фотоелектричного елемента

Фотоелектричні системи (рис.1.1), які базуються на основі фотоелектричних елементів, широко використовуються для виробництва електроенергії; однак більшість комерційних сонячних модулів в даний час мають низьку ефективність перетворення і перетворюють лише 13-20 % падаючого сонячного випромінювання в електроенергію в ідеальних умовах експлуатації [1, 2].



а)



б)

Рисунок 1.1 - Фотоелектричні системи змонтовані на дах (а) і вільно-стоячі із сонячним трекером



Сонячне випромінювання, поглинуте комірками, перетворюється не лише в електричну, але і в теплову енергію, викликаючи підвищення його температури (рис. 1.2). Температура відіграє важливу роль у ефективності фотоелектричної системи, оскільки продуктивність сонячного модуля безпосередньо пов'язана з робочою температурою її фотоелементів [3]. Збільшення температури викликає зменшення як напруги розімкнутого контуру, так і коефіцієнта заповнення, а також збільшення рекомбінації внутрішніх носіїв заряду, що призводить до зменшення вихідної потужності фотоелектричної системи [3,4]. Підвищення температури впливає на виробництво енергії в короткостроковій перспективі; однак було також встановлено, що термічні цикли прискорюють старіння обладнання в довгостроковій перспективі та погіршують його експлуатаційні характеристики [5].

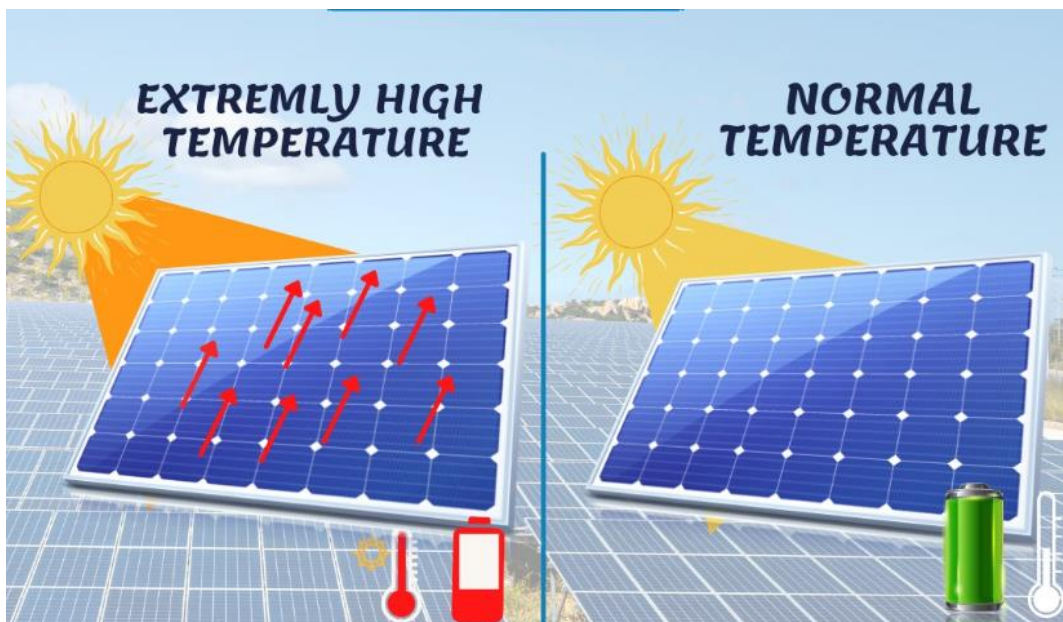


Рисунок 1.2 – Підвищення температури фотомодуля від сонячного випромінювання

## 1.2 Залежність ефективності фотоелектричного елемента від температури і основні способи її зменшення

Кількість енергії, яку може виробляти фотоелектричний модуль, залежить головним чином від його типу, складу та факторів навколишнього середовища (головним чином температури та сонячного опромінення) [3]. Модулі тестуються та сертифікуються в лабораторних умовах для встановлення їх номінальних характеристик (Стандартні умови випробувань,  $AM = 1,5$ , опромінення  $1000 \text{ Вт/м}^2$  і температура модуля  $25^\circ\text{C}$ ) [6]. Однак ці умови рідко виконуються в реальному середовищі, і фотомодулі, як правило, не досягають своїх номінальних показників. Крім того, вплив фотоелектричних систем на дії навколишнього середовища погіршує їх ефективність. Було задокументовано, що температура пов'язана з декількома типами деградації, такими як розшарування, гарячі точки, корозія, руйнування скла, електрична міграція між шарами модулів/взаємозв'язками та зміна кольору [7].

Кристалічні кремнієві фотоелементи є найбільш широко використовуваними у всьому світі завдяки вартості та доведеній надійності. Однак ефективність цієї технології залежить від її робочої температури, особливо в спекотному середовищі, де на кожне збільшення сонячного модуля на  $1^\circ\text{C}$  втрата електричної потужності  $0,5\%$  може вплинути на систему [7].

Ефективним способом протидії швидкості теплової деградації фотоелектричного модуля є зниження температури його поверхні. Цього можна досягти охолодженням системи (або запобіганням її нагріванню) під час роботи [4,8]. Згідно з опублікованими дослідженнями, для їх застосування в фотоелектричних модулях системи охолодження можна класифікувати як активні або пасивні. Попередній аналіз показав, що активні системи можуть бути дуже ефективними [4]. Однак їх використання призводить до збільшення вартості через складність та потребу в технічному обслуговуванні, крім споживання енергії, покладаючись на механічні/електричні системи, такі як насоси, вентилятори та датчики для підтримки робочої рідини в циркуляції.

Реха та ін. [9] використовував програмне забезпечення обчислювальної рідинної динаміки (ОРД) для моделювання та оцінки продуктивності гібридної системи фотовольтаїчної/теплової (ФЕ/Т) примусової конвекції (повітря). Їх результати були підтверджені експериментальними роботами, про які повідомляється в літературі, і було знайдено хорошу відповідність між числовими та експериментальними результатами для температури повітря в системі та температури фотоелементів. За допомогою перевіреної моделі було вивчено вплив масового потоку повітря та глибини каналу на продуктивність гібридної системи ФЕ/Т. Запропонована конструкція продемонструвала поліпшення продуктивності на 20 % у порівнянні зі звичайним ФЕ/Т колектором повітря. Mojumder та ін. [10] запропонував гібридний ФЕ/Т колектор, який інтегрує прямокутні ребра як елементи, що розсіюють тепло. Середні температури поверхонь фотоелектричного модуля, колектора та вихідних і впускних отворів вимірювали експериментально, змінюючи кількість ребер (0-4), масові витрати (0.02-0.14 кг/с) і рівні випромінювання (200-700 Вт/м<sup>2</sup>). Отримані максимальні теплові та фотоелектричні коефіцієнти корисної дії становили 56,19 % та 13,75 % відповідно, використовуючи чотири ребра з потоком 0,14 кг / с та 700 Вт / м<sup>2</sup> сонячного випромінювання.

Пасивні системи охолодження залежать від трьох основних механізмів теплопередачі: конвекції, провідності та випромінювання, які працюють без споживання енергії порівняно з активними системами. Згідно з попередніми дослідженнями, природна конвекція повітря є найпростішим способом охолодження фотоелектричного модуля; навколишнє повітря діє як робоча рідина і поглинає тепло обладнання, яке циркулює природним шляхом. Інші методи включають термосифонний ефект (рідини) і використання матеріалів із зміною фазового переходу. С. Г. Роровісі та ін. [11] провели чисельне дослідження каналізованого радіатора з мідних ребер різної довжини та нахилу. Для різних випадків дослідження висота ребра була змінена з 0,01 м до 0,05 м з кроком 0,01 м. Крім того, перфорації були додані до ребер для полегшення потоку повітря. Нахил плавців також змінювався щодо горизонталі,

використовуючи нахили  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $135^\circ$ . Решта геометричних параметрів радіатора залишалися фіксованими. Для створення турбулентності в кліматичних умовах використовували температуру навколишнього середовища  $35^\circ\text{C}$ , опромінення  $500\text{ Вт/м}^2$  та швидкість повітря  $1,5\text{ м/с}$ , перпендикулярну каналам. Результати показують, що панель без радіатора досягає максимальної температури  $56^\circ\text{C}$ , з електричним ККД  $86\%$  від номінальної потужності. Коли додали радіатор, температуру знизили приблизно на  $10^\circ\text{C}$ , що дозволило досягти електричних характеристик, які перевищують  $90\%$  від номінальної потужності. Найефективнішими були ребра, нахилені при  $45^\circ\text{C}$ , збільшуючи максимальну потужність на  $7,55\%$  порівняно з еталонними. М. Chandrasekar та Т. Senthilkumar [12] випробували пасивну систему, яка використовувала теплорозподільник у поєднанні з бавовняним ґнітом. Максимальна температура модуля була знижена на  $5,9^\circ\text{C}$  (з  $49,2^\circ\text{C}$  до  $43,3^\circ\text{C}$ ). Це було досягнуто за допомогою комбінованого ефекту випаровувального охолодження та ребер дифузора тепла, встановлених на задній панелі фотоелектричного модуля. Зниження робочої температури призвело до поліпшення електричної потужності на  $14\%$ .

У таблиці 1.1 представлено якісне порівняння різних систем охолодження, знайдених у літературі.

Таблиця 1.1 Порівняння різних систем охолодження

Система охолодження	Переваги	Недоліки
Фотоелектричний тепловий модуль (PV/T)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Підвищена комбінована ефективність.</li> <li>- Видобуте тепло можна використовувати для побутових потреб.</li> <li>- Підвищений вихід енергії.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість.</li> <li>- Вимагає механічних/електричних систем для циркуляції робочої рідини, коли не використовуються пасивні методи охолодження (тобто ефект термосифону).</li> <li>- Потребує регулярного догляду.</li> </ul>

## Продовження таблиці 1.1

Пасивні радіатори	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Практично не потребує обслуговування.</li> <li>- В основному використовується для пасивного охолодження (не має рухомих частин і не споживає енергію).</li> <li>- Може досягти хорошої рівномірності температури.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Видобуте тепло витрачається даремно.</li> <li>- Звичайні технології виготовлення (екструзія/обробка з ЧПК) обмежують його використання переважно концентрованою фотоелектричною системою .</li> <li>- Його продуктивність залежить від умов навколишнього середовища.</li> </ul>
Зміна фазового стану робочого тіла (охолоджувача) (PCM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зазвичай використовується в поєднанні з іншою системою охолодження.</li> <li>- Може зберігати велику кількість тепла.</li> <li>- Допомагає досягти хорошої рівномірності температури.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Здатність поглинати тепло з часом погіршується.</li> <li>- Деякі матеріали мають меншу теплопровідність.</li> <li>- Менш ефективний в холодних кліматичних умовах.</li> </ul>
Обдув струменем	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Може виділяти велику кількість тепла.</li> <li>- Може використовуватися в поєднанні з іншою системою охолодження.</li> <li>- Доведена ефективність завдяки широкому використанню в кількох галузях промисловості.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість.</li> <li>- Складний у проектуванні через низку параметрів, які необхідно оптимізувати.</li> <li>- Складна інтеграція з фотоелектричними модулями.</li> </ul>

Продовження таблиці 1.1

Теплові труби	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Може передавати тепло з мінімальними втратами.</li> <li>- Пристрій пасивного охолодження.</li> <li>- Може досягти хорошої рівномірності температури.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість.</li> <li>- В основному обмежено використання в концентрованих фотоелектричних системах через обмеженість у розмірі.</li> <li>- Складна інтеграція з фотоелектричними модулями.</li> </ul>
Занурення в рідину	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Економічний.</li> <li>- Може зменшити оптичні втрати.</li> <li>- Може підтримувати низьку та рівномірну температуру фотоелектричних елементів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ефективність перетворення залежить від глибини занурення, швидкості і температури середовища.</li> <li>- Низька ефективність в похмурі дні.</li> <li>- Через електропровідність іонізовані рідини спричиняють втрати ефективності.</li> </ul>
Мікроканали	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Може виділяти велику кількість тепла.</li> <li>- Може використовуватися в поєднанні з іншою системою охолодження.</li> <li>- Може досягти хорошої рівномірності температури.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока вартість.</li> <li>- В основному обмежено використання в концентрованих фотоелектричних системах через обмеженість у розмірі.</li> <li>- Потрібні механічні/електричні системи для циркуляції робочої рідини до теплообмінника.</li> </ul>

Було виявлено, що багато систем ефективно знижують і підтримують рівномірний рівень температури ФЕ системи. Однак через вартість та складність вони обмежуються застосуванням сонячних концентрованих фотоелектричних систем. Оскільки метою даної роботи є розробка простої,

дешевої системи охолодження для використання в комерційних фотомодулях, варто запропонувати новий пасивний радіатор. Зазвичай радіатори виготовляються з твердих блоків алюмінію і використовуються для охолодження електронних пристроїв; це тягне за собою певні недоліки для використання в сонячних фотоелектричних модулях. Приєднання радіатора, виготовленого за традиційними методами, до комерційного фотомодуля (250 - 300 Вт) було б дуже дорогим, на додаток до значного збільшення ваги системи. Більше того, звичайна геометрія радіатора (плавці з безперервним профілем) - це конструкція, призначена для конкретних умов експлуатації, таких як примусова конвекція з постійною швидкістю та напрямком робочої рідини.

### **1.3 Охолодження фотоелектричного модуля через дуття**

Цей метод базується на механічному пристрої для перекачування води або повітря, необхідного для охолодження модулів. Для цього потрібне безперервне джерело енергії, яке має відносно велику здатність охолоджувати сонячні елементи. Потужність, що використовується у вентиляторі або насосі, віднімається від потужності, виробленої з елемента, зменшуючи чисту вихідну потужність, вироблену фотоелектричними елементами. Цей метод поділяється на два основних типи: по-перше примусове повітряне охолодження, по-друге, примусове водяне охолодження, і було проведено багато досліджень цих двох типів.

Дослідниками проведено практичний експеримент з використанням декількох вентиляторів постійного струму, спрямованих на задню частину камери для її охолодження [13]. Було помічено, що зі збільшенням кількості вентиляторів швидкість охолодження зростала, а потужність, що виробляється модулем, збільшувалася, але потужність, необхідна для роботи цих вентиляторів, також зростала.

Використання одного вентилятора збільшило вироблену потужність на 12,93%; при збільшенні кількості вентиляторів до 2, 3 і 4 потужність зросла на 37,17%, 41,28% і 44,34% відповідно.



Рисунок 1.3 – Примусове повітряне охолодження фотоелектричних модулів

Проведено експеримент для порівняння природної конвекції і примусової конвекції у фотоелектричному охолодженні [13]. У своїй установці (рис.1.3) вони використовували два фотоелектричних перетворювача; один з них є еталонним, а інший має сталеву пластину під ним для створення повітряного каналу під ним. У першому дослідженні природне повітря циркулювало через канал, охолоджуючи фотоелектричні елементи за рахунок природної конвекції. У другому дослідженні використовується відцентровий вентилятор, який змушує повітря всередині каналу охолоджувати фотоелектричні елементи за

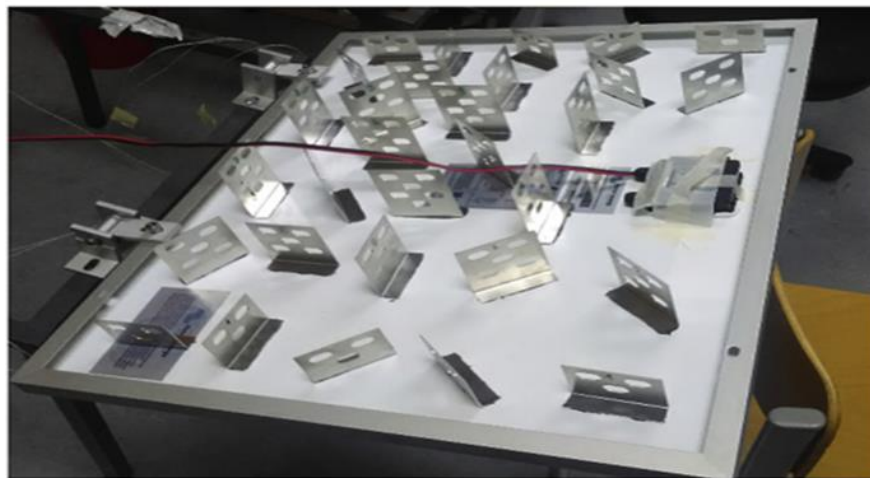


допомогою примусової конвекції, як показано на рис. 1.3. Результати показали, що примусова конвекція призвела до зниження температури поверхні на  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  і збільшення електричної потужності на  $15\%$  порівняно з природною конвекцією.

Грубішич-Чабо та ін. провели практичний експеримент з охолодження фотоелектричного сонячного елемента за допомогою ребер і створили два модулі. Перший містить алюмінієві ребра, прикріплені поздовжньо і регулярно до задньої поверхні елемента, як показано на рис. 1.4,а, тоді як другий модуль містить алюмінієві ребра, прикріплені до задньої поверхні елемента випадково і нерегулярно, як показано на рис. 1.4,б. З результатів було виявлено, що другий модуль дає кращі результати, ніж перший, оскільки другий модуль зміг підвищити ефективність модуля на  $2\%$ .



(a)



(b)

Рисунок 1.4 – Пасивне охолодження модуля

#### **1.4 Висновки до розділу**

1. Розкрито питання ефективності роботи фотоелектричних елементів.
2. Встановлено, що залежність ефективності фотоелектричного елемента від температури є значною і може складати до 14 % від його номінальної потужності .
3. Проведено детальний аналіз різних способів та методів охолодження фотоелектричних елементів. Результати аналізу узагальнено в табличній формі. Встановлено, що найбільш економічно та енергетично вигідними є системи пасивного охолодження, оскільки не потребують значних початкових та експлуатаційних вкладень.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Методи вимірювання температури сонячних елементів

Температура сонячних елементів може серйозно впливати на вихідну потужність сонячного фотоелектричного модуля. Отже, точне вимірювання температури сонячних елементів є важливим для правильної оцінки температурного ефекту сонячного фотоелектричного модуля.

Температура сонячних елементів залежить від упаковки сонячних елементів і факторів навколишнього середовища, таких як температура навколишнього середовища і швидкість/напрямок вітру. Існує кілька методів вимірювання температури сонячних елементів. Зазвичай температура переходу  $T_j$  приймається як середнє значення температур поверхні нижньої сторони  $T_{bot}$  і верхньої сторони  $T_{top}$ , (2.1) тобто через термічний опір матеріалів конструкції та градієнт внутрішньої температури температура спаю, виміряна таким чином, може бути неточною.

$$T_j = T_{ave} = T_{top} + T_{bot} / 2 \quad (2.1)$$

де  $T_j$  – температура р-п переходу, °С,

$T_{bot}$  - температура поверхні нижньої сторони, °С;

$T_{top}$  - температура поверхні верхньої сторони, °С;

$T_{ave}$  - середня температура верхньої та нижньої поверхонь фотоелектричного модуля, °С.

Деякі дослідники використовують чисельний метод і простий енергетичний баланс для прогнозування температури спаю [13].

Інший метод, прийнятий у стандарті IEC904-5 [14] (метод IEC), використовує попередньо визначену напругу  $V_{oc1}$  при відомих значеннях і визначає еквівалентну температуру комірки (ECT) з виміряних  $S_2$  і  $V_{oc2}$ , використовуючи середній температурний коефіцієнт  $V_{oc}$ ,  $C_T$  і задану теплову напругу діода  $D$  для заданого  $n_s$  (кількість послідовних з'єднань фотоелементів).

Дані вимірювання потребують багато часу та праці.

У даній роботі використано простий неруйнівний метод вимірювання температури сонячних елементів, який може бути використаний для моніторингу продуктивності сонячних фотоелектричних установок на місці.

## 2.2 Вимірювання температури переходу сонячного елемента

Відомо, що напруга холостого ходу сонячного елемента  $V_{oc}$  зменшується зі збільшенням температури переходу  $T_j$ . На  $V_{oc}$  також впливає сонячне випромінювання  $S$ . Тобто,  $V_{oc}$  підпорядковується функції (2.1).

$$V_{oc} = f(S, T_j) \quad (2.2)$$

де  $V_{oc}$  - напруга холостого ходу сонячного фотоелектричного модуля, В;

$S$  - інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на фотомодуль, Вт/м<sup>2</sup>

Вимірювання  $V_{oc}$  і сонячної радіації  $S$  дозволяє нам визначити  $T_j$ , якщо основне співвідношення, рівняння (2.2), попередньо визначено експериментально.

Залежність  $V_{oc}$  від  $T_j$  при різних сонячних опроміненнях  $S$  можна визначити в замкнутій камері, яка підтримує сонячний фотоелектричний модуль в тепловій рівновазі в камері з регульованою температурою. У випадку застосування на місці, температура переходу сонячних елементів може бути визначена шляхом раптового відключення сонячного фотоелектричного модуля на короткий проміжок часу з метою вимірювання  $V_{oc}$ . Температура переходу  $T_j$  потім може бути перетворена з виміряної  $V_{oc}$  і сонячного випромінювання  $S$  за допомогою заздалегідь визначеного співвідношення. Вимірювання є простим, неруйнівним і може бути дуже точним.

## 2.3 Вимірювальна установка

На рис. 2.1 показано вимірювальну установку для визначення функціональної залежності (2.2) фотоелектричного модуля. Як і в [15,16] нами використовували сонячний імітатор (лампу розжарення) для забезпечення штучного освітлення, що падає на фотомодуль. Напруга холостого ходу фотомодуля вимірюється в момент, коли сонячний імітатор спалахує світлом протягом короткого проміжку часу, 10 мс. Цей час спалаху занадто короткий, щоб викликати підвищення температури сонячного елемента під час вимірювання. Замкнута камера оснащена електричним нагрівачем, підключеним до PID контроллера для керування потужністю нагріву, щоб підтримувати в камері фіксовану температуру.

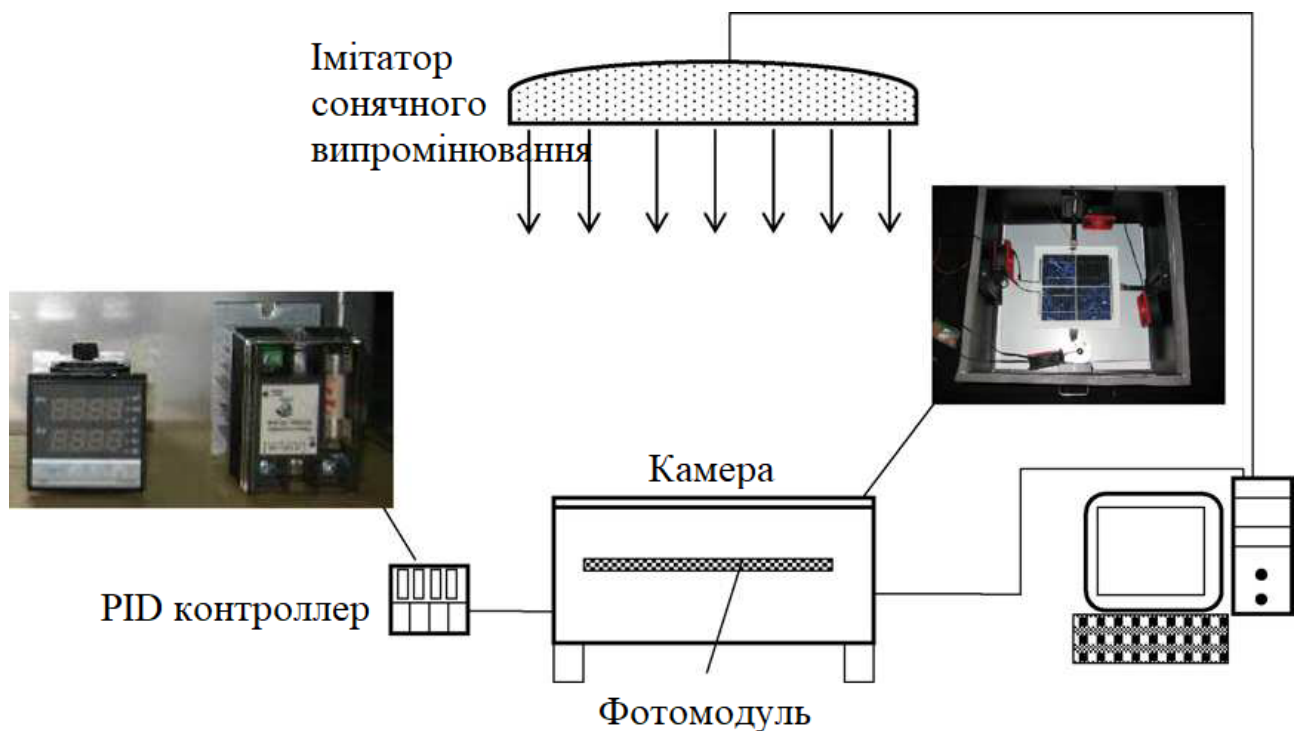


Рис. 2.1 Вимірювальна установка

Конструкція замкнутої камери, як показано на рис. 2.2, виготовлена з алюмінію. Камера термоізована і має скляну кришку, яка пропускає лише сонячне світло. Фотоелектричний модуль закріплений всередині камери. Усередині камери використовувався вентилятор для циркуляції повітря, щоб

створити рівномірну температуру над фотомодулем.

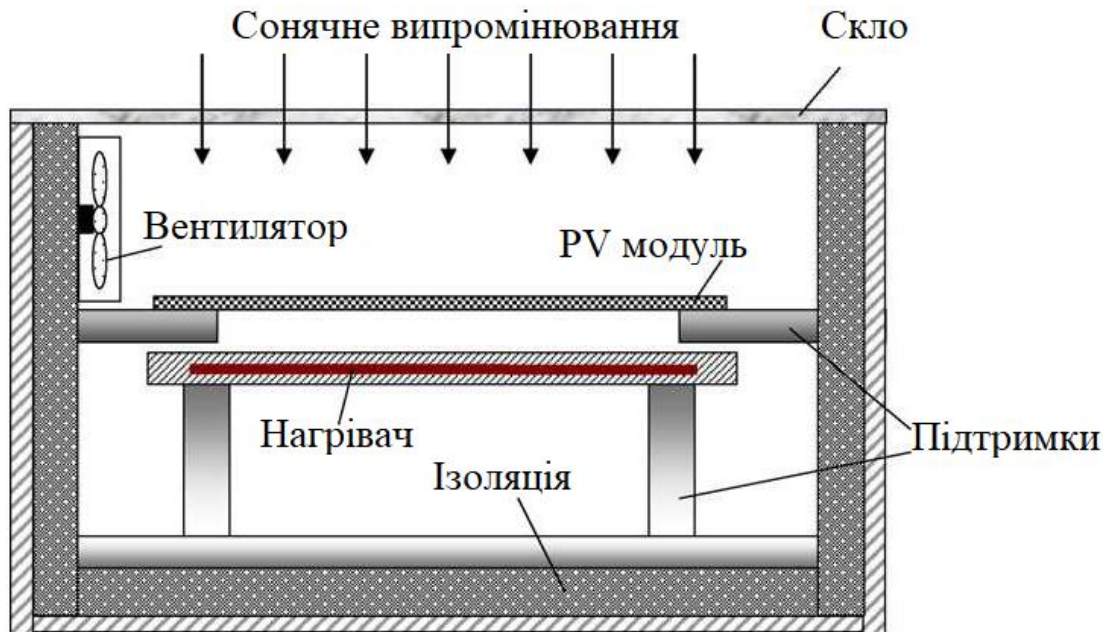


Рисунок 2.2 - Конструкція вимірювальної камери

У таблиці 3.1 наведено характеристики сонячного фотомодуля, що використовувався в цьому експерименті. Дані таблиці 1 взяті окремо від стандартних результатів тестування I-V кривої сонячного фотоелектричного модуля.

Таблиця 2.1 - Характеристики монокристалічного сонячного фотомодуля

ККД (%)	14,50-14,74
Максимальна вихідна потужність (Вт)	2,29
Максимальна потужність струму (А)	4,6
Струм короткого замикання $I_{sc}$ (А)	4,377
Максимальна напруга (В)	0,497
Напруга холостого ходу $V_{oc}$ (В)	0,598

Під час процесу нагрівання однорідність температури всередині камери

впливатиме на однорідність температури фотоелектричного модуля і може призвести до експериментальних помилок. Перше випробування полягає у вимірюванні розподілу температури поверхонь фотомодуля та сонячного елемента. Термопари Т-типу були рівномірно встановлені на верхній і нижній поверхнях фотомодуля і вставлені між склом і сонячним елементом. Три термопари були встановлені в кожному місці (всього дев'ять місць): верхня поверхня, поверхня комірки (між стеклами) і нижня поверхня. Нерівномірність температури поверхні фотомодуля становить менше 1 °С. Цей експеримент також може визначити температурну реакцію сонячного фотомодуля на досягнення стаціонарного стану між вимірюваннями за різних умов експлуатації. У тесті на однорідність температури фотоелектричного модуля використовується фотоелектричний модуль з термопарами, вставленими на поверхню сонячного елемента, а також на зовнішні поверхні, щоб перевірити конструкцію камери навколишнього середовища. Після цього тесту на рівномірність температури в камеру поміщають реальний фотоелектричний модуль для проведення звичайного експерименту.

Температура в камері спочатку встановлюється на рівні 40 °С, а в подальшому збільшувалася з кроком 10 °С. PID-регулятор регулює температуру в камері, а також температуру поверхні фотомодуля. Результати випробувань показують, що реакція температури верхньої поверхні фотомодуля на нове значення температури в камері займає близько 20 хвилин для досягнення сталого стану, а рівномірність температури поверхні фотомодуля є задовільною, в межах  $\pm 1$  °С.

Виявлено, що для досягнення теплової рівноваги при кожному температурному режимі камери потрібно близько 30 хвилин. Результати випробувань вказують на те, що будь-яка зміна умов експлуатації під час випробувань вимагає щонайменше 30 хвилин для досягнення теплової рівноваги.

## 2.4 Результати вимірювань

Після досягнення фотомодулем теплової рівноваги з камерою, що займає близько 30 хвилин для кожного температурного режиму, вимірюється напруга холостого ходу фотомодуля  $V_{oc}$  при вмиканні сонячного імітатора за короткий проміжок часу, 10 мс. Цей проміжок часу занадто короткий, щоб викликати значне підвищення температури сонячного елемента під час вимірювання.  $V_{oc}$  вимірювали повторно кожні 10 °C з кроком від 40 °C до 80 °C для різних  $S$ . Результат вимірювань представлено на рис. 2.3. З рис.2.3 видно, що при фіксованому  $S$ ,  $V_{oc}$  лінійно зменшується зі збільшенням  $T_j$ , що задовольняє співвідношенню рівняння (2.3):

$$V_{oc} = A_{oc} - C_T T_j \quad (2.3)$$

де  $A_{oc}$  - початковий коефіцієнт для  $V_{oc}$  при  $T_j = 0$  °C, В

$C_T$  - температурний коефіцієнт  $V_{oc}$ , В/°C

Залежність між  $A_{oc}$  і  $S$  отримана з експериментальних даних таблиці 2.2 і описується рівнянням (2.4). Дані табл. 2.2 графічно представлені на рис. 2.3.

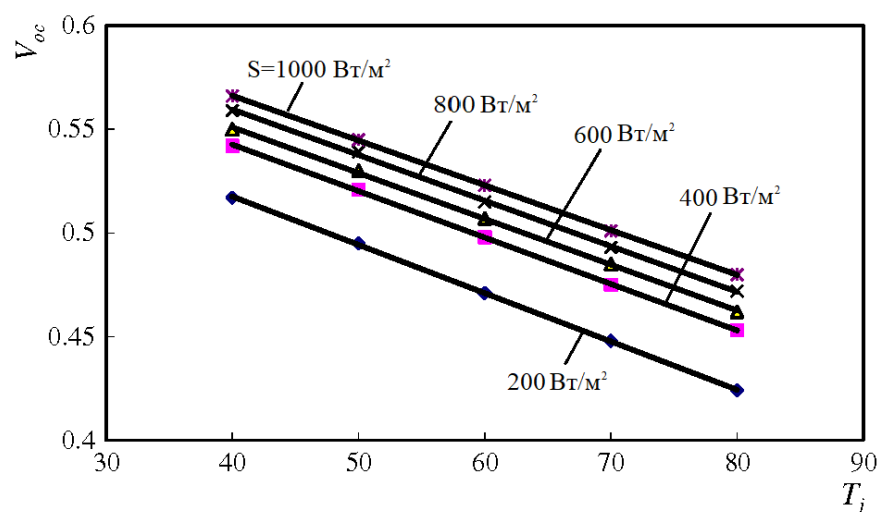
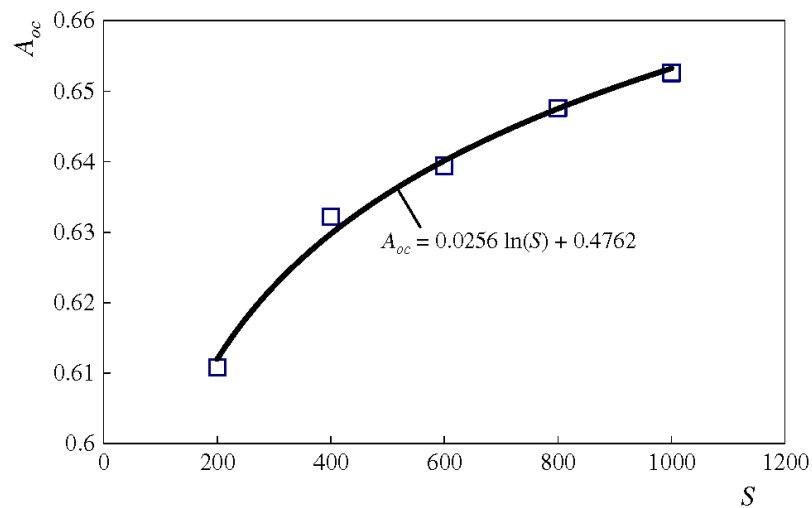


Рисунок 2.3 - Залежність  $V_{oc}$  від  $T_j$



Таблиця 2.2 - Результати апроксимації даних на рис. 2.3

Інтенсивність випромінювання (Вт/м <sup>2</sup> )	Апроксимаційна функція	$A_{oc}$ , В	$C_T$ (В/°С)
1000	$V_{oc} = -0,002160 \cdot T_j + 0,6526$	0,6526	0,002160
	$R^2 = 0,9999$		
800	$V_{oc} = -0,0022 \cdot T_j + 0,6476$	0,6476	0,002200
	$R^2 = 0,9993$		
600	$V_{oc} = -0,002210 \cdot T_j + 0,6394$	0,6394	0,002210
	$R^2 = 0,9994$		
400	$V_{oc} = -0,002240 \cdot T_j + 0,6322$	0,6322	0,002240
	$R^2 = 0,9998$		
200	$V_{oc} = -0,002330 \cdot T_j + 0,6108$	0,6108	0,002330
	$R^2 = 0,9998$		

Рисунок 2.4 – Залежність  $A_{oc}$  від інтенсивності випромінювання

На рис. 4 показано кореляцію між  $A_{oc}$  та  $S$ :

$$A_{oc} S = 0,0256 \ln S + 0,003525 \quad (2.4)$$

На рис. 2.5 показано кореляцію між  $C_T$  і  $S$ . Залежність між  $C_T$  і  $S$  отримана з експериментальних даних таблиці 2.2 і описується рівнянням (2.5)

$$C_T \cdot S = -0,00188 \ln S + 0,003525 \quad (2.5)$$

Об'єднавши рівняння (2.3) - (2.5), можна отримати функціональну залежність рівняння (2.6).

$$V_{oc} S, T_j = 0,0256 \ln S + 0,4762 - -0,000188 \ln S + 0,003525 T_j \quad (2.6)$$

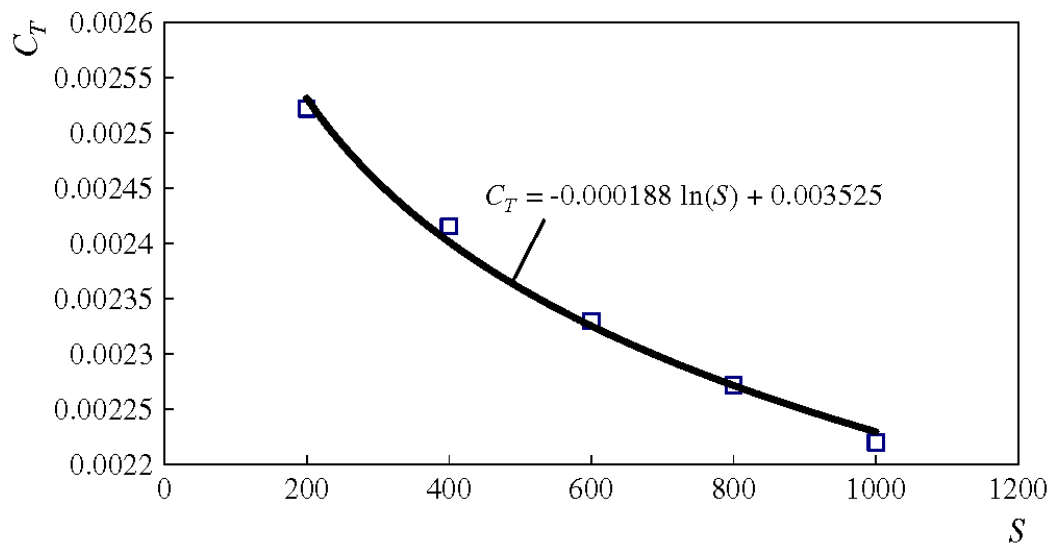


Рисунок 2.5 - Залежність  $C_T$  від інтенсивності випромінювання  $S$

Рівняння (2.6) є фундаментальним співвідношенням  $V_{oc}$ ,  $T_j$  і  $S$ , яке може бути використане для визначення температури переходу сонячного елемента в польових умовах експлуатації фотоелектричного модуля.

## 2.5 Вимірювання температури р-п переходу сонячного елемента на місці

Рівняння (2.6) є основним співвідношенням фотоелектричного модуля, яке може бути використане для моніторингу температури з'єднання сонячних елементів на місці, якщо  $V_{oc}$  і  $S$  вимірюються за короткий проміжок часу в розімкнутому стані. Той самий фотоелектричний модуль, що використовувався в даному дослідженні, був встановлений на відкритому повітрі і працював з постійним навантаженням (резистором) для імітації роботи сонячної фотоелектричної системи. Для визначення температури фотоелектричного переходу  $T_j$  було розроблено схему для відключення навантаження (розімкнення фотомодуля) на дуже короткий проміжок часу, в даному дослідженні 10 мс, для вимірювання  $V_{oc}$ . Вимірювальна схема показана на рис. 2.6. Миттєва температура переходу розраховується з рівняння (2.6), використовуючи вимірне сонячне випромінювання  $S$  і  $V_{oc}$ , і позначається  $T_{j0}$ . З метою моніторингу  $T_{j0}$  вимірювали кожні 3 хв. Втрати енергії через відключення кола генерації під час вимірювання  $T_j$  становлять лише  $10\text{мс}/180\text{с} = 0,05\%$ , що є незначною величиною.

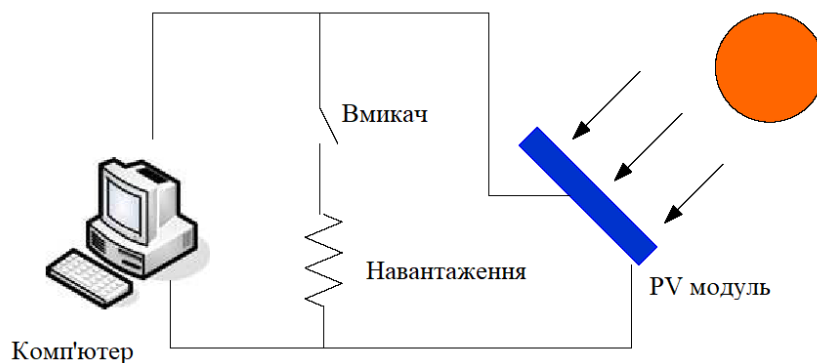


Рисунок 2.6 – Вимірювальна схема

Для перевірки точності вищезазначених результатів вимірювання  $T_{j0}$ , тонка термопара Т-типу була встановлена у фотоелектричний перехід

Таблиця 2.3 - Похибки вимірювання різними методами.

Похибка	Реальна температура переходу $T_j$ (°C)	Виміряна температура, $T_{j0}$ (°C)	Похибка (°C)
Максимальна	65,9	61,1	-4,8
Мінімальна	60,3	59,8	-0,5

## 2.6 Запропонована конструкція система охолодження фотоелементу

У даній роботі пропонується нова реберна решітка для пасивних ФЕ радіаторів, яка збільшує завихрення вітрового потоку і зменшує втрати тиску в каналах радіатора, забезпечуючи менш обмежений потік повітря; підсилення конвективного теплообміну та охолодження фотоелектричної системи. Застосування багатокутних алюмінієвих ребер (сегментований профіль ребра) оцінюється як пасивна система охолодження, яка досягає відносно однорідного розподілу температури в фотоелектричній системі порівняно зі звичайним ребристим радіатором (безперервний профіль ребра), підтримуючи більш стабільну теплову реакцію при різних напрямках падіння вітрового потоку. Це може вплинути на термін служби та ефективність фотоелемента. Оптимізацію теплопередачі матеріалу радіатора та тепла вивчали шляхом оцінки довжини ребра з кутами атаки вітру при  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $45^\circ$ , оцінюючи співвідношення витрат і економічної вигоди.

Запропонована конструкція з ребрами з чергуванням на  $\pm 30^\circ$  по відношенню до вертикальної осі (рис. 2.7) виготовлений з алюмінію, який вирізають і встановлюють на алюмінієвій поглинальній пластині для оцінки та порівняння з його звичайним профілем (безперервний при  $90^\circ$ ). Геометрія радіатора розроблена для підтримки стабільних характеристик у ситуаціях, коли потік та напрямок вітру постійно змінюються. Частина дослідження розглядає теплову реакцію в різних сценаріях; без радіатора, із звичайним

радіатором та багатокутовим радіатором з ребрами при  $\pm 30^\circ$  щодо вертикальної осі ( $60^\circ$  між ребрами).

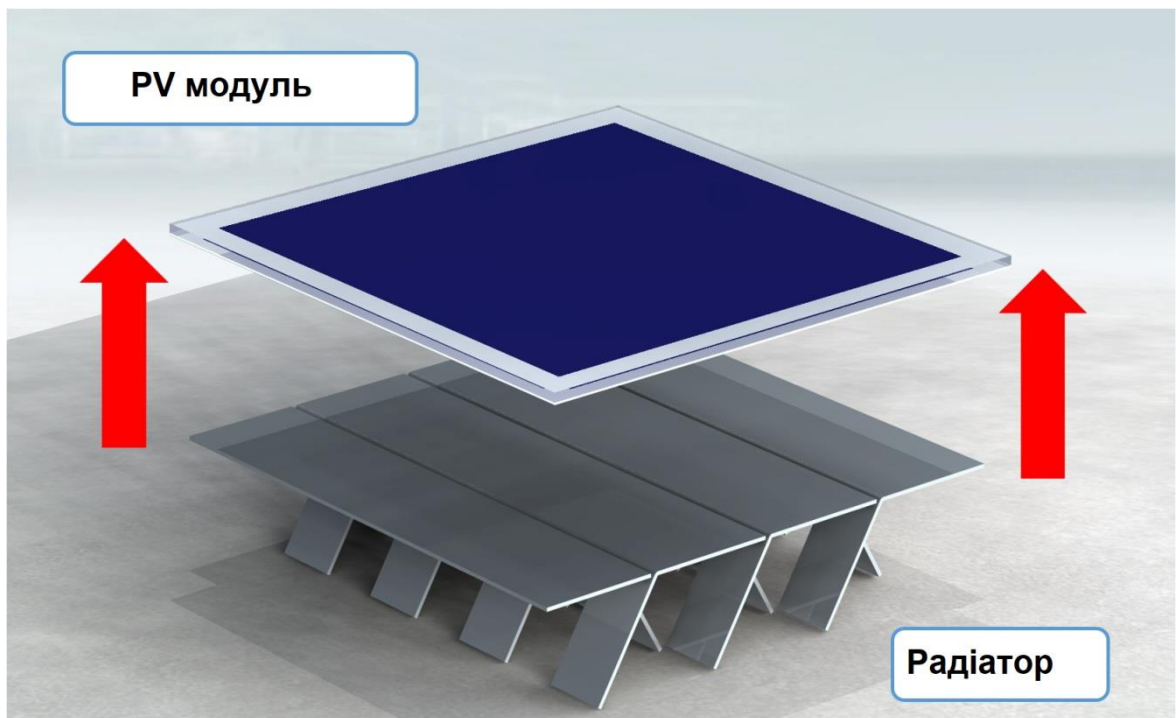


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд системи охолодження PV модуля (фотоелементу)

## 2.7 Висновки до розділу

1. Визначено неруйнівну методику вимірювань температури фотоелектричного модуля.
2. Спроектовано вимірювальну установку для досліджень температурних режимів фотоелектричних модулів.
3. Проведено лабораторні вимірювання залежності напруги модуля від температури. Запропоновано аналітичний вираз який описує цю залежність.
4. Запропоновано конструкцію пасивного охолоджуючого радіатора для фотоелектричних модулів.

## 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Базові рівняння

Теплообмін у фотоелектричному модулі з повітряним охолодженням відбувається за участю декількох твердих доменів. Рідинна область включає робочу рідину всередині радіатора (повітря). Для кожного шару матеріалу модуля (скло, комірка, EVA, тедлар) і для радіатора є своя тверда область. Фізичні аспекти рідин регулюються наступними принципами: збереження маси, збереження моменту імпульсу і збереження енергії. Ці принципи можна виразити у вигляді набору математичних виразів, які називаються рівняннями Нав'є-Стокса:

Неперервність:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (3.1)$$

Момент:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} \quad (3.2)$$

Енергія:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \nabla \cdot \vec{v} \rho E + p = -\nabla \cdot \left( \sum_j h_j J_j \right) \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – густина;

$v$  – швидкість;

$E$  – енергія.

Визначальні рівняння дискретизуються за допомогою стандартного методу скінченних об'ємів для формування системи алгебраїчних рівнянь, яка розв'язується за допомогою ітераційного процесу з використанням програмного забезпечення для комп'ютерної гідрогазодинаміки.

### 3.2 Теплове навантаження

Теплова модель передбачає температурне поле через товщину елементарної комірки. Враховуючи зменшену товщину шарів порівняно з їх довжиною та шириною, їх теплообміном до країв нехтують. Кондуктивні втрати тепла спричинені градієнтами між коміркою та іншими матеріалами, з якими вона контактує (включаючи навколишнє повітря). Здатність пристрою передавати тепло в навколишнє середовище описується його термостійкістю та конфігурацією матеріалів, що використовуються для інкапсуляції фотоелемента. Якщо в середовищі є температурне поле  $T(x, y, z, t) = T(r, t)$ , закон Фур'є виражає миттєві теплові потоки як:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (3.3)$$

де  $k$  - теплопровідність матеріалу,  
 $q$  - тепловий потік.

Цей механізм теплообміну дозволяє моделювати передачу енергії між шарами різних матеріалів та товщинами елементарної комірки.

Оскільки запропонована теплова модель враховує різні умови навколишнього середовища (сонячне випромінювання, температура навколишнього середовища, швидкість вітру тощо), теплообмін можна описати з точки зору двох фізичних явищ, конвекції та випромінювання. Конвекція повітрям виражається як:

$$q_{conv} = h_{conv}(T_s - T_{amb}) \quad (3.4)$$

і радіаційні обміни з небом або землею, як:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_0^4) \quad (3.5)$$

де  $\varepsilon$  - випромінювальна здатність поверхні скла,  
 $\sigma$  - постійна Стефана-Больцмана,

$T_0$  - абсолютна температура навколишнього середовища.

В рівнянні (3.3),  $h_{conv}$  - коефіцієнт тепловіддачі при температурі поверхні  $T_s$ . Цю конвекцію виробляє повітря при температурі навколишнього середовища  $T_{amb}$ . Слід зазначити, що  $h_{conv}$  може виражатися по-різному для природної або примусової конвекції.

### 3.3 Методика імітаційного моделювання

Методика імітаційного моделювання, яка використовується для отримання та оцінки оптимізованого радіатора, складається з двох етапів (рис. 3.1).

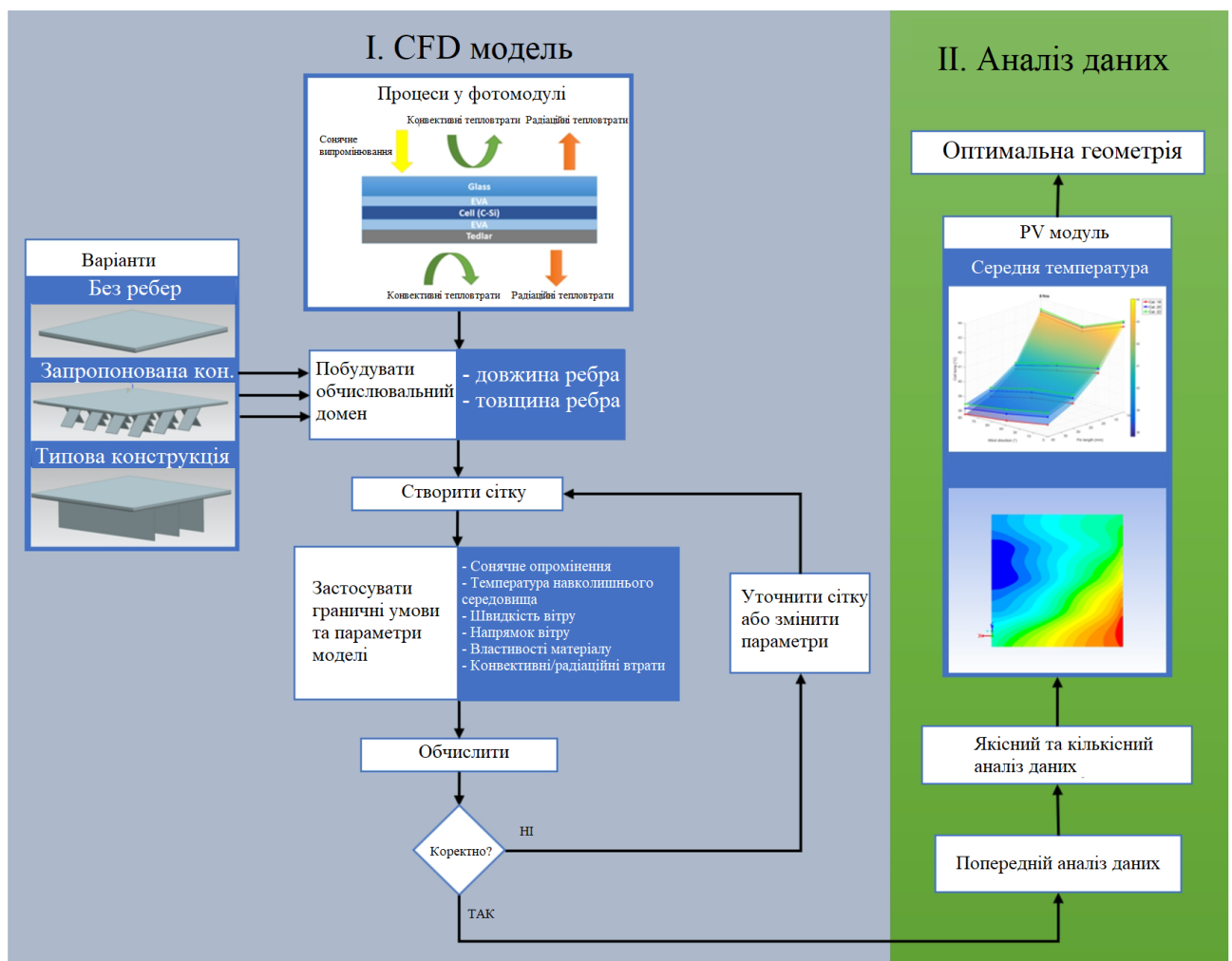


Рисунок 3.1 – Методика імітаційного моделювання радіатора та аналізу



даних для отримання оптимальної конфігурації для оцінки продуктивності

(Етап I) CFD модель.

Схема задачі представлена на рис. 3.1, де виділено елементарні частини, тобто фізичні явища, які взаємодіють з фотоелектричною системою. Ця задача була перетворена в обчислювальну область, в якій була змодельована елементарна комірка розміром  $170 \times 170 \text{ мм}^2$ . Модель містить ті ж самі стандартні шари звичайного фотоелектричного модуля і значно зменшує кількість елементів у сітці, що значно прискорює роздільну здатність моделей. Властивості змодельованих шарів детально описані в таблиці 3.1. Гібридні сітки використовувалися з огляду на складну геометрію об'єму, що включає ребра і повітряну масу в моделях з радіатором, які могли бути адекватно скомпоновані лише тетраедричними елементами; решта шарів були виконані з шестигранними елементами. Для визначення відповідного розміру елементів було проведено дослідження залежності від розміру сітки. При необхідному уточненні параметрів сітки кількість елементів зросла від  $1,15 \times 10^6$  для елементарної комірки без радіатора до  $2,94 \times 10^6$  для комірки з найскладнішим радіатором.

Таблиця 3.1 - Теплофізичні властивості шарів унітарної комірки/фотомодуля

Шар	Товщина (мм)	Теплопровідність (Вт/м К)	Густина (кг/м <sup>3</sup> )	Питома теплоємність (Дж/кг°С)
Скло	3	1,8	3000	500
Комірка	0,3	148	2330	677
ЕВА	0,5	0,35	960	2090
Полівінілфторид	0,1	0,2	1200	1250

Граничні умови та параметри моделі детально описані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Граничні умови, характеристики фотоелемента та параметри радіатора

<b>Навколишнє середовище</b>		
<b>Гранична умова</b>	<b>Значення</b>	<b>одиниця</b>
Сонячне опромінення	1000	Вт/м <sup>2</sup>
Температура навколишнього середовища	28	°С
Швидкість вітру	2	м/с
Напрямок вітру	0°, 45°, 90°	
<b>Фотоелектричний елемент</b>		
<b>Гранична умова</b>	<b>Значення</b>	<b>одиниця</b>
Коефіцієнт випромінювання передньої поверхні	0,91	
Коефіцієнт конвекції передньої поверхні	13,3	Вт/м <sup>2</sup> К
<b>Радіатор</b>		
<b>Геометричний параметр</b>	<b>Значення</b>	<b>одиниця</b>
Довжина ребра	10, 20, 30, 40	мм
Ширина ребра	20	мм
Відстань між ребрами	42	мм
Товщина листа (товщина ребра)	22 (0,71)	(мм)
Кут ребра	±30° з віссю Y	

Для зменшення елементів сітки та полегшення процесу моделювання для розрахунку коефіцієнта конвекції у верхній поверхні комірки було використано співвідношення, яке давало хороший компроміс час/точність [37]:

$$h = 5,7 + 3,8\nu \quad (3.6)$$

Перед проведенням чисельного моделювання були зроблені наступні припущення (рис. 3.2):

Температура навколишнього середовища є постійною і однаковою з усіх боків комірки, розраховувалася на основі трирічної історії і відповідає виключно середньому значенню для годин сонячного світла

Швидкість вітру постійна на вході в модель, а будь-які зміни швидкості в межах області рідини та на виході з моделі пояснюються взаємодією з геометрією комірки/радіатора.

Бруд, який впливає на поглинання комірки, не враховується

Всі матеріали в комірці мають ізотропні властивості

Задача розглядається в 3D і в стаціонарному стані

На верхню поверхню комірки діє постійний і однорідний потік сонячного випромінювання

Рисунок 3.2 – Основні припущення перед проведенням чисельного моделювання

Етап II. Аналіз даних (рис. 3.1).

В результаті розрахунків, якісні результати подано у вигляді розподілу температури. Це використовується для спостереження за однорідністю розподілу температури фотоелемента, а також за різницею між максимальною та мінімальною температурами. Кількісні дані відповідають середнім, максимальним і мінімальним температурам на поверхні фотоелемента, розрахованим за допомогою обчислювальної моделі. Це дозволяє проводити більш точні розрахунки зниження температури і віддачі потужності фотоелемента в порівнянні з візуальним оглядом графіка температурного контуру. Крім того, ці дані дозволяють визначити параметри радіатора,

включаючи оптимальну конфігурацію для досягнення більшого зниження температури, а також покращення однорідності її розподілу.

### 3.4 Результати імітаційного моделювання

#### 3.4.1 Загальні дані

Для моделювання використано програмне забезпечення для моделювання гідродинаміки CFD Software: Ansys computational fluid dynamics.

Результат можна побачити в таблиці 3.3, яка відображає чотири варіанти радіатора та еталонний фотоелемент, кожен з яких оцінюється з трьох напрямків повітряного потоку ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $90^\circ$ ). Температура в камері змінюється залежно від напрямку повітряного потоку. Найнижча температура, що спостерігається, відповідає найкращому випадку, а найвища - гіршому випадку. Як правило, температура нижча, коли повітря тече при  $90^\circ$  (перпендикулярно ребрам), і вища, коли повітря тече при  $0^\circ$  (паралельно ребрам). Отримане максимальне зниження температури становить близько  $9,4^\circ \text{C}$  (19,6%), що відповідає радіатору з ребрами 40 мм.

Таблиця 3.3 - Підсумок теоретичних результатів (середня температура фотоелектричної комірки)

Довжина ребра радіатора (мм)	Температура комірки ( $^\circ\text{C}$ )		Зниження температури ( $^\circ\text{C}$ )		Зниження температури (%)	
	Найкращий випадок	Найгірший випадок	Найкращий випадок	Найгірший випадок	Найкращий випадок	Найгірший випадок
Еталон (без радіатора)	47,92	48,65	0	0	0	0
10	42,91	44,02	5,01	4,63	10,45	9,51
20	40,21	41,49	7,71	7,16	16,09	14,71
30	39,06	40,10	8,86	8,55	18,49	17,57
40	38,49	39,42	9,43	9,23	19,67	18,97

Слід зазначити, що збільшення довжини ребра радіатора не відповідає лінійному зниженню температури. Теплова ефективність ребра зменшується експоненціально при збільшенні його довжини, оскільки менше тепла передається в навколишнє середовище при віддаленні від основи ребра. Отже, з кожним кроком зниження температури буде ставати все меншим, тому додаткове використання матеріалу може бути невиправданим з точки зору вартості та практичності. У зв'язку з цим у таблиці 3.3 можна побачити, що зниження температури зменшується з кожним збільшенням довжини, і для того, щоб подвоїти ефективність 10-міліметрового ребра, необхідно збільшити його довжину більш ніж у чотири рази.

### **3.4.2 Тепловий ефект від довжини ребра**

На рис. 3.3 показано тепловий розподіл унітарного фотоелектричного елемента з ребрами і без ребер (вид зверху) досліджуваного елемента ( $170 \times 170$  мм<sup>2</sup>), що використовується як константа для цього дослідження; напрямок повітряного потоку -  $45^\circ$ , ширина ребер - 20 мм, товщина - 0,71 мм, змінюється лише довжина ребер (на цьому зображенні ребра не спостерігаються).

Під час постобробки для отримання точного вимірювання різниці температур між більш високими і низькими температурними областями фотоелектричного елемента використано зондовий інструмент. На рис. 3.3,а розподіл температури унітарної комірки без ребер має градієнт з боку в бік  $9^\circ\text{C}$ . На рис. 3.3, б градієнт з ребрами 10 мм зменшується до  $4,9^\circ\text{C}$ , на рис. 3.3,в (20 мм) - до  $4^\circ\text{C}$ , на рис. 3.3,г (30 мм) - до  $3,8^\circ\text{C}$ , а на рис. 3.3,д (40 мм) - до  $3,6^\circ\text{C}$ . У якісному плані зі збільшенням довжини ребер область нижчих температур має тенденцію до збільшення (сині тони). Також видно, що до певної міри збільшення довжини плавників вже не призводить до значних змін у зниженні температури там, де спостерігається найбільш очевидна зміна, тобто при збільшенні від 10 мм до 20 мм (рис. 3.3,б та рис. 3.3,в). З іншого боку, при

збільшенні з 30 мм до 40 мм (рис. 3.3, г та рис. 3.3, д) зміна розподілу температури є мінімальною, так само як і зменшення її градієнта ( $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

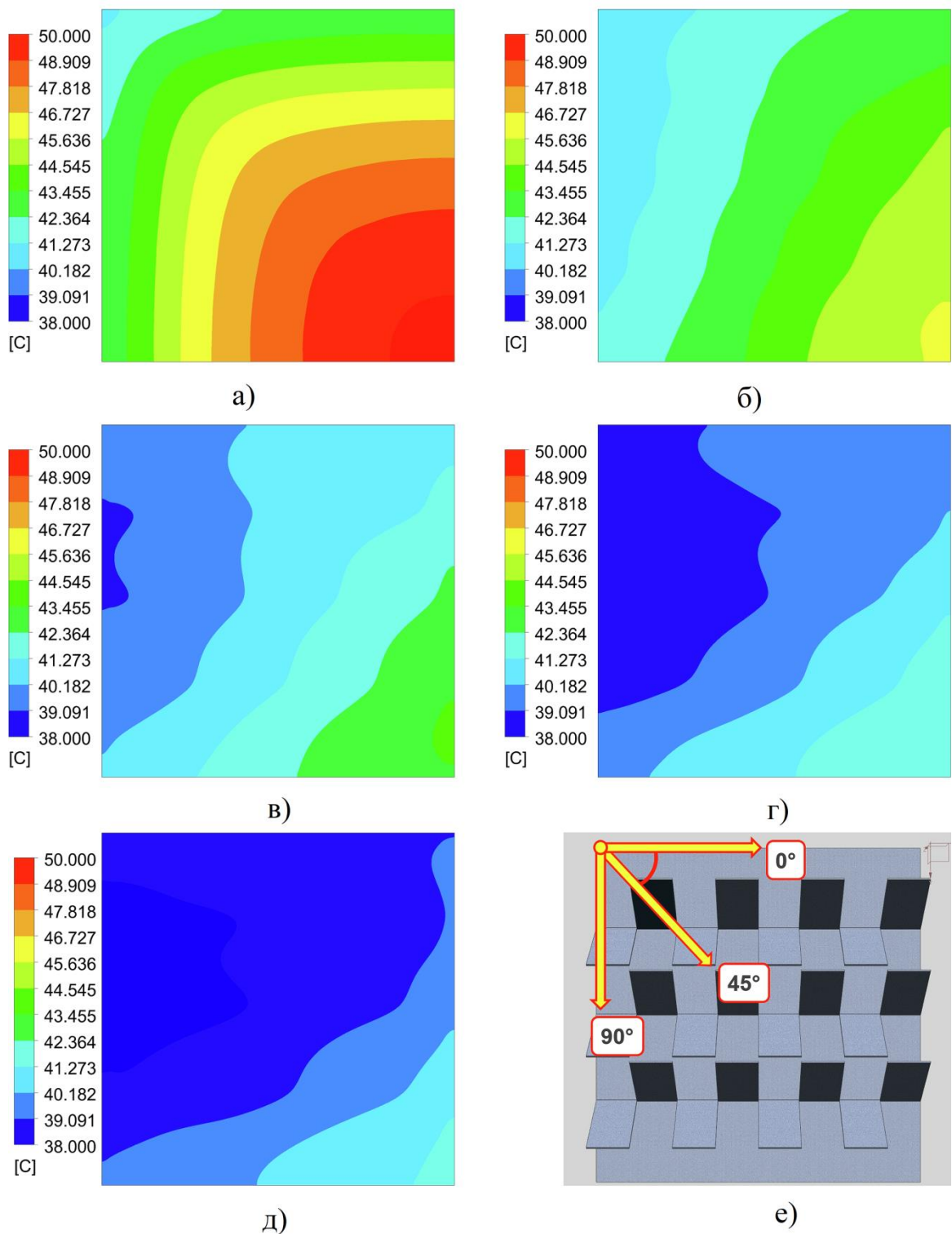


Рисунок 3.3 - Моделювання розподілу температури унітарної комірки PV з використанням різної довжини ребра, (а) відсутність радіатора, (б) 10 мм ребра, (в) 20 мм ребра, (г) 30 мм ребра, (д) 40 мм ребра, (е) Орієнтація ребра та напрямок повітряного потоку

Помічено, що при додаванні радіатора досягається більш висока температурна однорідність фотоелемента, і цей ефект значно зменшується при збільшенні довжини ребер понад 30 мм. Ребра довжиною 40 мм забезпечують найкращий розподіл температури фотоелемента з найменшими температурними градієнтами. Крім того, враховуючи відстань між ребрами (42 мм) і кут нахилу ребер ( $\pm 30^\circ$  по відношенню до вертикальної осі), збільшення довжини понад 40 мм призведе до високої геометричної щільності, а отже, до уловлювання тепла.

### 3.4.3 Вплив напрямку потоку повітря

На рис. 3.4 показано теплову характеристику запропонованого радіатора, змодельованого з шириною ребра 20 мм (товщина ребра 0,71 мм), а також довжиною ребра 10, 20, 30 і 40 мм. Досліджено залежність між напрямком повітряного потоку, температурою комірки та довжиною ребра. Виявлено, що запропонований радіатор має позитивну поведінку при зміні напрямку повітряного потоку; зниження температури спостерігається при зміні напрямку повітряного потоку від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ .

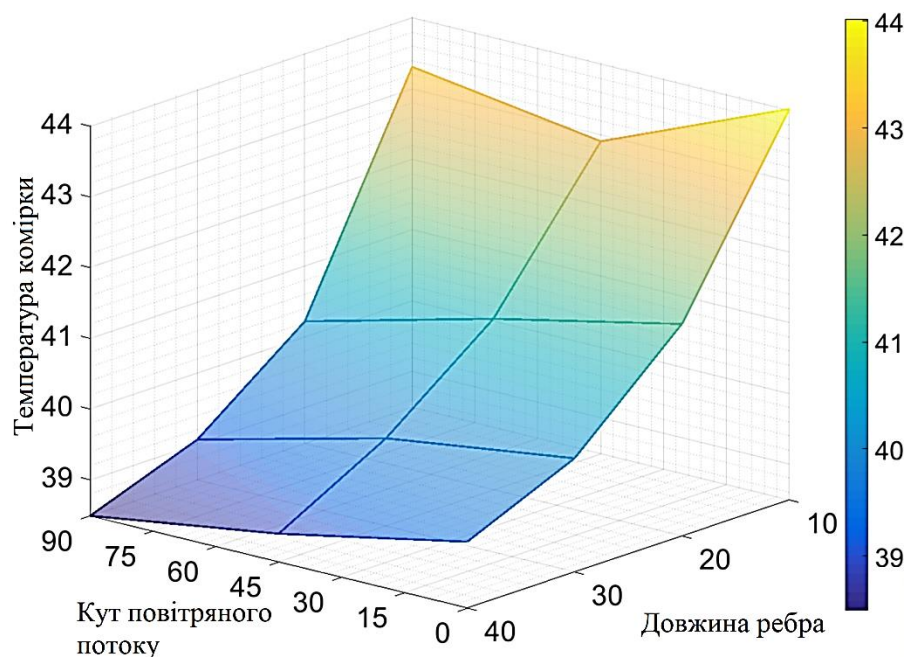


Рисунок 3.4 - Моделювання зміни температури фотоелемента на вплив напрямку повітряного потоку та довжини ребер

Як правило, температура фотоелемента нижча, коли потік повітря спрямований під кутом  $90^\circ$  (перпендикулярно до поверхні ребер), за винятком випадків, коли довжина ребер становить 10 мм, де тепловий відгук нагадує теплову реакцію еталонного фотоелемента (температура нижча, коли потік повітря спрямований під кутом  $45^\circ$ ). В еталонному фотоелементі діагональ - це найбільша відстань, яку повітря може пройти, контактуючи з його поверхнею, що сприяє кращій теплопередачі і, отже, більшому відбору тепла. Використання ребер довжиною 10 мм не сильно змінює повітряний потік, таким чином, ця поведінка зберігається (як і без ребер). Це можна побачити на рис. 3.3,а і рис. 3.3.б, де температурні контури для еталонної комірки і радіатора з ребрами довжиною 10 мм схожі. З іншого боку, при подовженні ребер повітряний потік значно змінюється, впливаючи на швидкість, турбулентність і поведінку тиску повітря в каналах радіатора, що призводить до більш стабільної теплової реакції, особливо для ребер довжиною 40 мм.

#### **3.4.4 Порівняння запропонованої конструкції радіатора та звичайного радіатора**

Метою даної роботи є розробка радіатора, який є більш ефективним, ніж звичайний пасивний радіатор з прямими ребрами (L-подібної форми). Для порівняння було змодельовано радіатор зі звичайними профільними ребрами з використанням тієї ж запропонованої технології виготовлення (листового штампування). Обидві конструкції базуються на алюмінієвому листі 22 калібру (0,71 мм) і ребрах довжиною 40 мм, оскільки вони виявилися найбільш економічно ефективними. Обидва радіатори використовують однакову кількість матеріалу. Різниця полягає в тому, що запропонована модель сегментована протилежними ребрами з нахилом  $\pm 30^\circ$  по відношенню до вертикальної осі, що дозволяє, в кращому випадку, забезпечити більш рівномірний потік повітря. Для того, щоб цього добитися, було оцінено три



репрезентативні напрямки падіння повітряного потоку (рис. 3.5, 3.6).

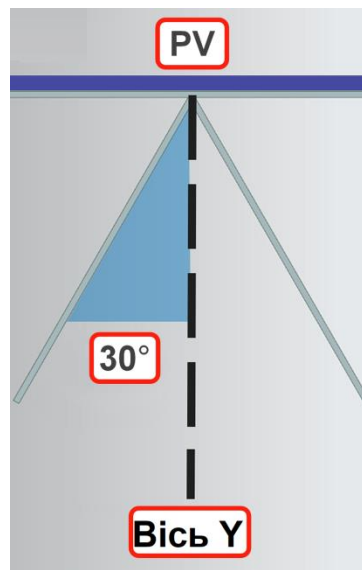


Рисунок 3.5 - Кут ребра радіатора

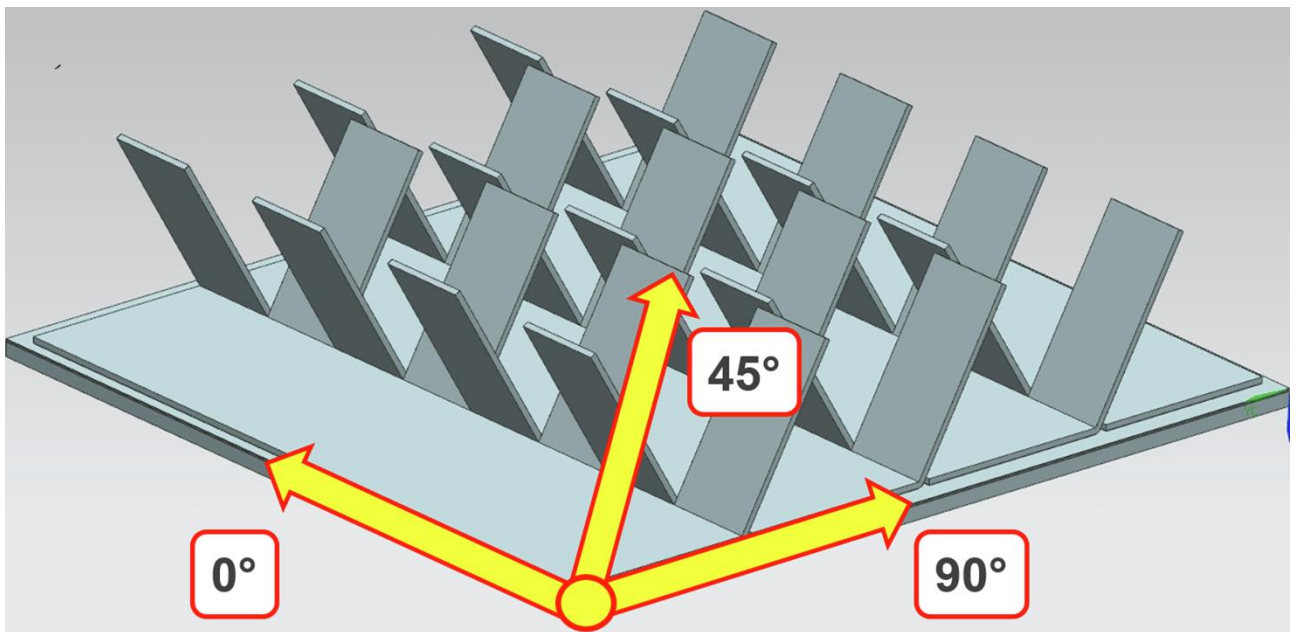


Рисунок 3.6 - Напрямки потоку повітря під час досліджень

З рис. 3.7 можна бачити, запропонована модель працює краще, ніж звичайний радіатор, особливо коли потік повітря рівний 2 м/с і наближається до  $0^\circ$  у напрямку паралельному ребрам. Для кожного досліджуваного напрямку потоку повітря ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $90^\circ$ ) отримані температури становлять  $39,13^\circ\text{C}$ ,

38,59 °C та 38,18 °C - для запропонованого радіатора та 40,12 °C, 38,82 °C та 38,74 °C для звичайного радіатора.

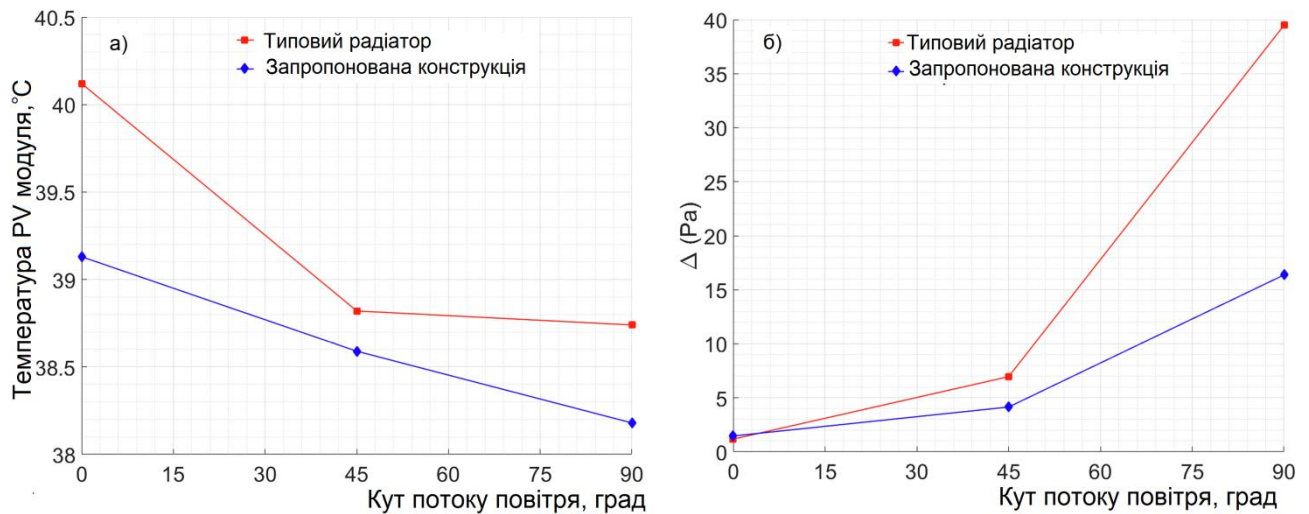


Рисунок 3.7 - Порівняння радіатора для потоку повітря при 0°, 45° та 90°, а) середня температура фотоелемента, б) падіння тиску повітря в радіаторі

Коли повітря тече паралельно ребрам (0°), втрата тиску є мінімальною для обох радіаторів (рис. 3.7, б). Однак сегментація ребер дозволяє збільшити площу тепловіддачі. Крім того, це незначно збільшує рівень турбулентності в радіаторних каналах без значного зменшення швидкості потоку повітря, що призводить до більшого зниження температури в порівнянні зі звичайною геометрією. Коли падіння повітря діагональне (45°), обидва радіатори працюють однаково, враховуючи, що ребра мають тенденцію перенаправляти повітряний потік. Однак сегментований радіатор з ребрами забезпечує менш обмежений потік повітря, що призводить до менших втрат тиску та поліпшення тепловіддачі. Найзначніший випадок має місце, коли повітря тече перпендикулярно до реберних каналів (90°). Цей сценарій заслуговує більш детального аналізу, оскільки це найгірший варіант для обох радіаторів через втрати високого тиску, особливо для звичайного радіатора.

Охолоджуюче середовище втрачає тиск при протіканні через теплообмінник. Якщо втрати великі, це може бути пов'язано з неоптимальною конструкцією радіатора, яка забезпечує низьку рівномірність потоку повітря, що призводить до поганої тепловіддачі. На рис. 3.8 представлено порівняння

контуру тиску з напрямком повітряного потоку  $90^\circ$  (вигляд перерізу радіатора). Запропонований радіатор має менші і менш різкі втрати тиску, завдяки менш обмежувальній конструкції, яка дозволяє краще взаємодіяти охолоджуючому середовищу з поверхнею радіатора. Ця характеристика є суттєвою, оскільки при масштабуванні системи у більшій ФЕ-решітці втрата тиску, як правило, збільшується із збільшенням розміру радіатора.

На рис. 3.9 представлено розподіл швидкості навколо радіаторів. Запропонована система демонструє більшу наявність завихрень всередині радіатора, а також більш поступове зменшення швидкості повітря (більш рівномірний потік). З іншого боку, геометрія типової конструкції спричиняє прискорення рідини, яке спрямоване переважно з радіаторних каналів. Це неприпустимо, оскільки воно створює зони з низьким / від'ємним тиском (рис.3.8) та низькою швидкістю відразу після першого ребра через завихрення в повітряному потоці у вхідній області та значну зміну розподілу швидкості по каналах ребра. Загалом спостерігається, що теплові характеристики радіаторів мають високу кореляцію з гідравлічними характеристиками.

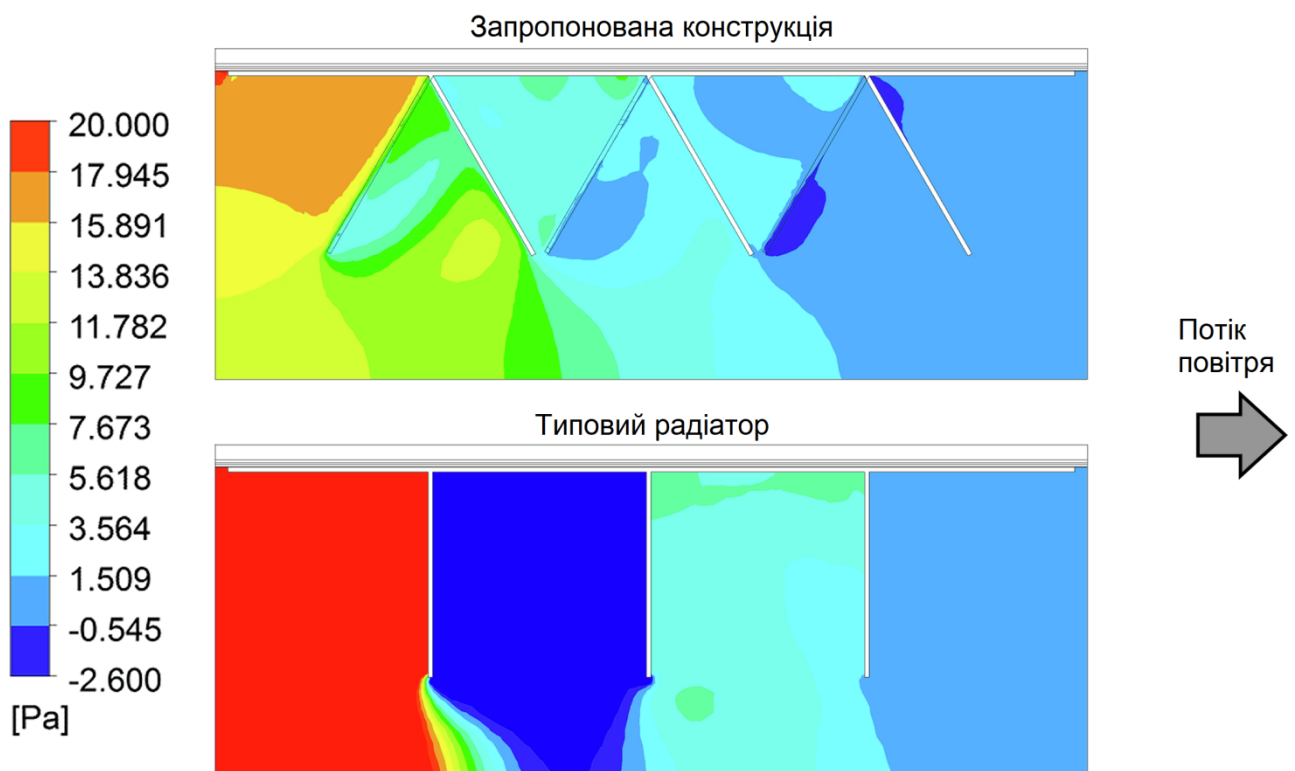


Рисунок 3.8 - Поле обтікання радіатора повітряним потоком під кутом  $90^\circ$  (перпендикулярно до каналів ребер). Розподіл тиску в радіаторі

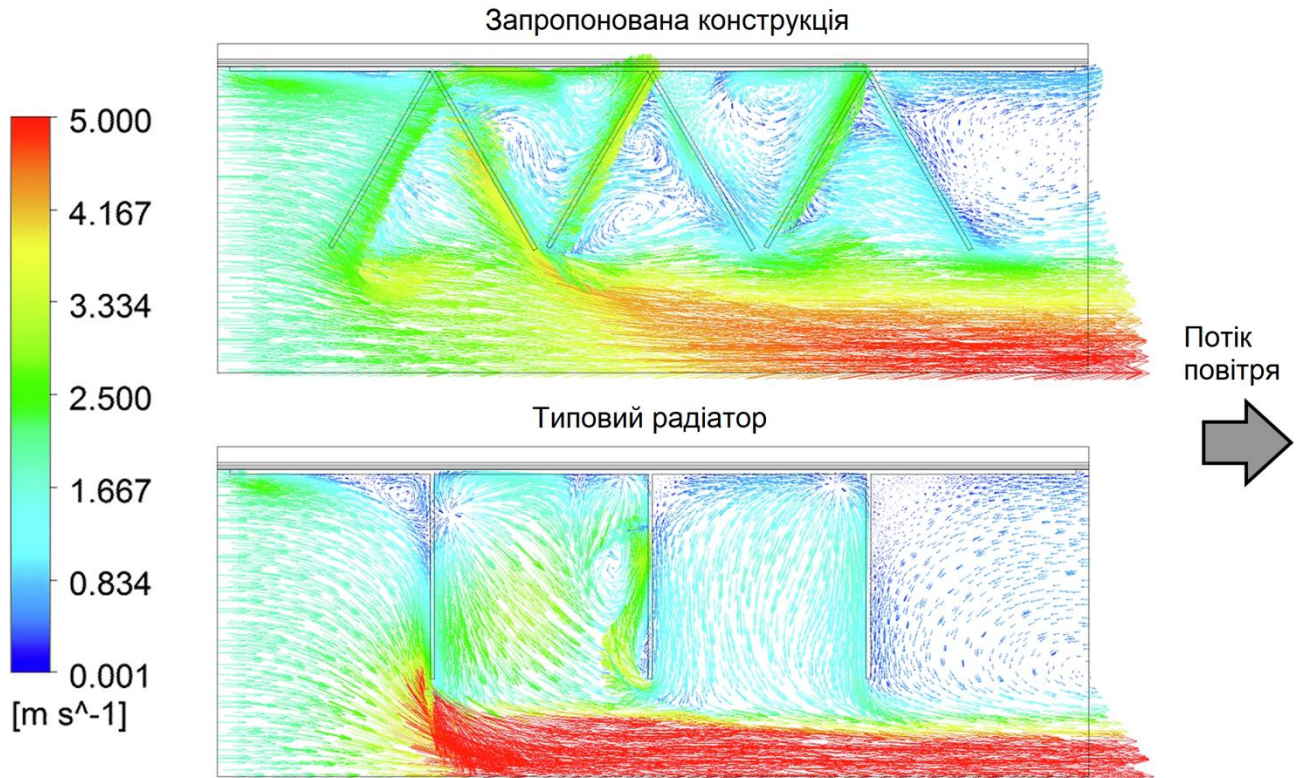


Рисунок 3.9 - Поле обтікання радіатора повітряним потоком під кутом  $90^\circ$  (перпендикулярно до каналів ребер). Розподіл швидкості на радіаторі

Коли повітряний потік змінює напрямок з паралельного на перпендикулярний до каналів ребер, відбувається збільшення чисел Рейнольдса і Нуссельта через більш турбулентний потік, таким чином, посилюючи конвективний теплообмін, незважаючи на більший перепад тиску (рис. 3.7).

### 3.5 Висновки до розділу

1. Запропонована конструкція є більш ефективною за рахунок оптимізації розмірів, необхідних для підвищення продуктивності фотоелектричних систем, які зазнають впливу високих температур. Було показано, що ребро довжиною 40 мм є достатнім для цієї мети. Відомо, що коротші ребра можуть бути більш ефективними, проте з меншою здатністю відводити тепло від поверхні фотоелементу
2. Гідравлічні характеристики запропонованої моделі радіатора демонструють нижчі втрати тиску порівняно з традиційною

геометрією (суцільний профіль ребер) завдяки зменшенню втрат швидкості в каналах, що в поєднанні з геометрією конструкції збільшує турбулентність і значно сприяє конвективному теплообміну.

3. Максимальне зниження температури, що забезпечує удосконалена конструкція становить  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в години пікового сонячного випромінювання ( $800 - 1000\text{ Вт/м}^2$ ).
4. Якщо підтримувати роботу фотоелектричних панелей при нижчій температурі (близько  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в умовах максимального опромінення), то термін їхньої експлуатації можна продовжити, зменшивши їхню теплову деградацію, особливо в системах сонячного стеження, які довше перебувають під впливом прямого сонячного випромінювання.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Організаційні та технічні заходи електробезпеки

До роботи на електроустановках допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли інструктаж та навчання з безпечних методів праці, перевірку знань правил безпеки та інструкцій відповідно до займаної посади та кваліфікаційної групи з електробезпеки, і які не мають проти показів, визначених Міністерством охорони здоров'я України [17].

Для забезпечення безпеки робіт у діючих електроустановках належить виконувати наступні організаційні заходи:

- призначення осіб, які відповідають за організацію та проведення робіт;
- оформлення наряду чи розпорядження на проведення робіт;
- організація нагляду за проведенням робіт;
- оформлення закінчення робіт, перерв у роботі, переведення на інші робочі місця.

До технічних заходів, які необхідно виконувати в діючих електроустановках для забезпечення безпеки робіт належать:

1. При проведенні робіт зі зняттям напруги в діючих електроустановках чи поблизу них:

- вимкнення установки (частини установки) від джерела живлення електроенергії;

механічне блокування приводів апаратів, які здійснюють вимкнення, зняття запобіжників, від'єднання кінців лінії, яка

- здійснює електропостачання та інші заходи, що унеможливають випадкову подачу напруги до місця проведення робіт;
- встановлення знаків безпеки та захисних огорож біля струмопровідних частин, що залишаються під напругою і до яких в процесі роботи можливе доторкання або наближення на недопустиму відстань;

- встановлення заземлення (ввімкнення заземлювальних ножів чи встановлення переносних заземлень);

- огороження робочого місця та вивішування плакатів безпеки;

2. При проведенні робіт на струмопровідних частинах, які знаходяться під напругою та поблизу них:

- виконання робіт за нарядом не менш ніж двома працівниками зі застосуванням електрозахисних засобів, під постійним наглядом, із забезпеченням безпечного розташування працівників, використовуваних механізмів та пристосувань.

## 4.2 Захист від статичної електрики

Статична електрика – це сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, накопиченням та релаксацією вільного електричного заряду на поверхні або в об'ємі діелектричних та напівпровідникових речовин, матеріалів та виробів. Виникнення зарядів статичної електрики є результатом складних процесів перерозподілу електронів чи іонів при стиканні двох різнорідних тіл (речовин) [17].

Порушення поверхневого контакту при терті тіл призводить до електризації - виникнення електричних зарядів, які можуть утримуватись на поверхні цих тіл протягом тривалого часу. Такі заряди, на відміну від рухомих зарядів динамічної електрики (електричний струм) знаходяться у статичному стані.

Електричні заряди виникають:

- при терті діелектричних тіл один об одного або об метал (наприклад, пасові передачі);

- при переливанні, перекачуванні, перевезенні в ємностях горючих та легкозаймистих рідин;

- при транспортуванні горючих газів трубопроводом;

- при подрібненні діелектриків;



- при переміщенні сухого запиленого повітря зі швидкістю понад 15 – 20 м/с і т.п.

Систематичний вплив електростатичного поля підвищеної напруженості негативно впливає на організм людини, викликаючи, в першу чергу, функціональні розлади центральної нервової та серце-судинної систем. Відповідно до ДСТУ(ГОСТ) 12.1.045-84 гранично допустима напруженість електричного поля  $E_{доп}$  на робочих місцях не повинна перевищувати 60 кВ/м, якщо час впливу  $t_v$  не перевищує 1 год; при 1 год <  $t_v$  < 9 год –  $E_{доп} = 60\sqrt{t_v}$ .

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів досягається трьома основними способами:

- запобіганням виникнення та накопичення статичної електрики,
- прискоренням стікання електростатичних зарядів, нейтралізацією електростатичних зарядів.

### **4.3 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж**

Запобігання вибухів та пожеж – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення вибухів та пожеж.

Організаційні і технічні заходи щодо запобігання пожежі реалізуються ще на стадії проектування окремих об'єктів підприємств. При цьому заздалегідь вивчаються особливості технологічних процесів і об'єктів, можливі причини і джерела виникнення вибухів та пожеж. Запобігання пожежі великою мірою сприяє правильне планування, розміщення основних об'єктів з урахуванням рельєфу місцевості, дотримання протипожежних розривів між будівлями відповідно до вимог генерального плану.

Попередження вибухів та пожеж на підприємствах досягається[18]:

- запобіганням утворенню горючого середовища;
- запобіганням виникненню в горючому середовищі або появи в ньому джерел запалювання.



Запобігання утворення горючого середовища повинно досягатися:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важко горючих речовин і матеріалів;
- обмеженням маси і об'єму горючих речовин, матеріалів та найбільш безпечним способом їх розміщення;
- ізолюванням горючого середовища;
- підтримуванням концентрації горючих газів, пари, суспензій і окислювача в суміші за межею їх спалаху;
- достатньої концентрації флегматизатора в повітрі захищеного об'єкту;
- підтримуванням його температури і тиску, за якими розповсюдження полум'я неможливе;
- максимальною механізацією і автоматизацією технологічних процесів, пов'язаних з вживанням горючих речовин;
- встановленням пожежонебезпечного обладнання, по можливості, в ізольованих приміщеннях чи на відкритих площадках;
- застосуванням для горючих речовин герметичного обладнання і тари;
- застосуванням пристроїв захисту виробничого обладнання з горючими речовинами від ушкоджень і аварій, встановленням відключаючих, відсікаючих та інших пристроїв;
- застосуванням ізольованих відсіків, камер, кабін.

Попередження утворення в горючому середовищі джерел запалювання повинно досягатися такими основними заходами [18]:

- застосуванням машин, механізмів, обладнання, пристроїв, під час експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;
- застосуванням електрообладнання, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
- застосуванням в конструкції швидкодіючих засобів захисного відключення можливих джерел запалювання;

- застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки;
- пристроєм блискавкозахисту будівель, споруд і обладнання. Будівлі та споруди складів паливно-мастильних матеріалів захищають від прямих ударів блискавки, електростатичної та електромагнітної індукції та заносу потенціалів;
- підтримкою тиску в горючому середовищі нижчого за максимально припустимий за горючістю;
- зменшенням визначального розміру горючої суміші середовища нижче максимально припустимого за горючістю.;
- регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації машин, механізмів та іншого обладнання, матеріалів і виробів, що можуть бути джерелом запалювання горючого середовища;
- застосуванням енергоустаткування, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
- застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки.;
- регламентацією максимально допустимої температури нагрівання поверхонь обладнання і матеріалів, що можуть увійти в контакт з горючим середовищем. Режимми роботи насосів, перекачувальних паливно-мастильних матеріалів не повинні спричиняти підвищене нагрівання їх поверхонь;
- регламентацією максимально допустимої енергії іскрового розряду в горючому середовищі. Знижувати енергію іскрового розряду можна, зменшуючи напруження між частинами обладнання, при якому відбувається іскровий розряд в горючому середовищі;
- регламентацією максимально допустимої температури нагрівання горючих речовин, матеріалів і конструкцій;
- застосуванням інструмента, що не іскрить під час роботи з легкозаймистими речовинами. Слід застосовувати інструмент і пристосування, що не висікають іскри під час ударів і падіння;

- ліквідацією умов для хімічного самозагоряння речовин і матеріалів. До самоzapalювальних речовин в технологічних процесах належать пірофорні речовини, що розігріваються при окисленні киснем повітря до 600 °С;
- усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній роботі, за допомогою чисельного моделювання, перевірено ефективність різних компонувань радіатора.

1. Проведено детальний аналіз різних способів та методів охолодження фотоелектричних елементів. Результати аналізу узагальнено в табличній формі. Встановлено, що найбільш економічно та енергетично вигідним є системи пасивного охолодження, оскільки не потребують значних початкових та експлуатаційних вкладень.
2. Проведено лабораторні дослідження залежності напруги модуля від температури. Запропоновано аналітичний вираз який описує цю залежність.
3. В результаті аналізу конструкцій радіаторів виявлено, що продуктивність звичайного ребристого радіатора може бути покращена в несприятливих погодних умовах за допомогою запропонованої нової конструкції без збільшення використання матеріалу.
4. Запропонована конструкція є більш ефективною за рахунок оптимізації розмірів, необхідних для підвищення продуктивності фотоелектричних систем, які зазнають впливу високих температур. Було показано, що ребро довжиною 40 мм є достатнім для цієї мети. Відомо, що коротші ребра можуть бути більш ефективними, проте з меншою здатністю відводити тепло від поверхні фотоелементу. Крім того, довші ребра збільшують вартість радіатора без суттєвого підвищення ефективності.
5. Гідравлічні характеристики запропонованої моделі радіатора демонструють нижчі втрати тиску порівняно з традиційною геометрією (суцільний профіль ребер) завдяки зменшенню втрат

швидкості в каналах, що в поєднанні з геометрією конструкції збільшує турбулентність і значно сприяє конвективному теплообміну.

6. Максимальне зниження температури, що забезпечує удосконалена конструкція становить  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в години пікового сонячного випромінювання ( $800 - 1000\text{ Вт/м}^2$ ). Таке зниження температури означає покращення ефективності електричного перетворення системи на  $\sim 4\%$  за цих умов. Також було помічено, що ефективність радіатора зростає зі збільшенням сонячного випромінювання (коли дельта-температура зростає), що сприяє збільшенню температурних втрат.
7. Якщо підтримувати роботу фотоелектричних панелей при нижчій температурі (близько  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в умовах максимального опромінення), то термін їхньої експлуатації можна продовжити, зменшивши їхню теплову деградацію, особливо в системах сонячного стеження, які довше перебувають під впливом прямого сонячного випромінювання.
8. Запропонований радіатор показав хороші результати, значно скоротивши тепловий цикл, якому піддавалася фотоелектрична сонячна панель. Надалі планується провести практичні випробування. Це дасть змогу отримати детальну інформацію про ефективність роботи в складних природних погодних умовах. Також планується розробка математичної моделі, яка також необхідна для оптимізації конструктивних параметрів радіатора, що дозволить мінімізувати виробничі витрати і максимізувати ефективність. Визначення оптимальних значень цих параметрів має велике значення для впровадження пасивних систем розсіювання тепла на ринку.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
2. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
3. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.
4. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81.а.
5. Ndiaye, C. M. Kébé, A. Charki, P. A. Ndiaye, V. Sambou, and A. Kobi, "Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment," Solar Energy, vol. 103, pp. 70-77, 2014.
6. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021

7. M. Kumar and A. Kumar, "Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 554-587, 2017.
8. M. Chandrasekar, S. Rajkumar, and D. Valavan, "A review on the thermal regulation techniques for non integrated flat PV modules mounted on building top," *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 692-697, 2015.
9. L. Rekha, C. V. Vazhappilly, and C. Melvinraj, "Numerical Simulation for Solar Hybrid Photovoltaic Thermal Air Collector," *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 513-522, 2016.
10. J. C. Mojumder, W. T. Chong, H. C. Ong, and K. Leong, "An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 272-285, 2016.
11. C. G. Popovici, S. V. Hudişteanu, T. D. Mateescu, and N.-C. Cherecheş, "Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks," *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 425-432, 2016.
12. M. Chandrasekar and T. Senthilkumar, "Experimental demonstration of enhanced solar energy utilization in flat PV (photovoltaic) modules cooled by heat spreaders in conjunction with cotton wick structures," *Energy*, vol. 90, pp. 1401-1410, 2015.
13. Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J. R., Vera-García, F., Káiser, A. S., & Zamora, B. (2013). Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013.
14. IEC, International Standard 904-5:1993 (first ed.), *Photovoltaic Devices – Part 5: Determination of the Equivalent Cell Temperature (ECT) of Photovoltaic (PV) Devices by the Open-Circuit Voltage Method*, pp. 1–11.
15. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник

Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.

- 16.Герєга С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герєга, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали ІІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
- 17.Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
- 18.Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.