

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
Оптимізація продуктивності інтегрованої теплової
системи з фотоелектричними модулями
Optimising the performance of an integrated thermal
system with photovoltaic modules

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Даниїл ГОЛОВКО
«__» _____ 2024 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
«__» _____ 2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький, 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Головка Даниїла Сергійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи » Оптимізація продуктивності інтегрованої теплової системи з фотоелектричними модулями

Optimising the performance of an integrated thermal system with photovoltaic modules

2. Керівник роботи Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є дослідження конструктивних особливостей енергетичних та теплових процесів на ефективність функціонування системи теплової сонячної покрівлі.

Завдання роботи: розробка ефективних типів колекторів, аналіз ефективності функціонування запропонованої конструкції сонячної теплової покрівлі в реальних експлуатаційних умовах. Розроблення конструктивних рішень щодо створення та використання теплової покрівлі, орієнтованої на забезпечення систем теплопостачання. економічний аналіз доцільності інтеграції сонячної теплової покрівлі до складу систем теплопостачання; охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Загальні положення щодо компенсації реактивної потужності</i>	<i>09.10.24</i>	
3	<i>Цільова функція і математичне формулювання задачі</i>	<i>21.10.24</i>	
4	<i>Алгоритм і програма розрахунку оптимального режиму реактивної потужності</i>	<i>28.10.24</i>	
5	<i>Оптимальна компенсація реактивних навантажень в системі електропостачання виробничого об'єднання</i>	<i>04.11.24</i>	
6	<i>Розрахунок економічної ефективності впровадження оптимального режиму реактивних навантажень в системі електропостачання</i>	<i>11.11.24</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11.24</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>25.11.24</i>	
9	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>	<i>02.12.24</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника

_____ Савеленко І.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Головко Д.С.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Головко Д.С. Оптимізація продуктивності інтегрованої теплової системи з фотоелектричними модулями.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження конструктивних особливостей енергетичних та теплових процесів на ефективність функціонування системи теплової сонячної покрівлі.

Зростання вартості традиційних джерел енергії та поступове виснаження їхніх запасів, вимагають активного впровадження альтернативних та нетрадиційних джерел енергії. Найбільш простим та водночас ефективним методом використання енергії Сонця є її перетворення у теплову енергію.

Розробка ефективних типів колекторів є пріоритетним напрямом у сфері відновлюваної енергетики, що дозволяє максимально використовувати потенціал сонячного випромінювання. Для підтвердження результатів досліджень було здійснено аналіз ефективності функціонування запропонованої конструкції сонячної теплової покрівлі в реальних експлуатаційних умовах. Розроблено конструктивні рішення щодо створення та використання теплової покрівлі, орієнтованої на забезпечення систем теплопостачання. Запропоновано методику розрахунку параметрів системи теплопостачання з урахуванням специфіки різноманітних конструктивних варіантів сонячної теплової покрівлі. Також виконано економічний аналіз доцільності інтеграції сонячної теплової покрівлі до складу систем теплопостачання.

Ключові слова: сонячний колектор, тепла покрівля, мінімум приведених витрат, енергія сонця, системи теплопостачання.

ABSTRACT

Golovko D.S. Optimisation of the performance of an integrated thermal system with photovoltaic modules.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 'Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics', educational and professional programme 'Electrotechnical systems of electricity consumption', Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the qualification work is to study the design features of energy and thermal processes on the efficiency of the solar thermal roof system.

The rising cost of traditional energy sources and the gradual depletion of their reserves require the active introduction of alternative and non-conventional energy sources. The simplest and most efficient way to use solar energy is to convert it into thermal energy.

The development of efficient collector types that provide increased productivity at a reduced cost remains a priority in the renewable energy sector, which allows for maximum use of the solar radiation potential.

To confirm the research results, we analysed the efficiency of the proposed solar thermal roof structure in real operating conditions. Constructive solutions for the creation and use of a thermal roof focused on providing heat supply systems have been developed.

A methodology for calculating the parameters of a heat supply system is proposed, taking into account the specifics of various design options for a solar thermal roof. An economic analysis of the feasibility of integrating a solar thermal roof into heat supply systems is also performed.

Keywords: solar collector, thermal roof, minimum reduced costs, solar energy, heat supply systems.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;

КВП – коефіцієнт використання встановленої потужності;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

СК – сонячний колектор;

СЕС – сонячна електростанція;

СЕУ – сонячна енергоустановка установка;

ТЕС – теплова електростанція;

ТСЕС – теплова сонячна електростанція;

ЦП – центральний приймач;

ФЕП – фотоелектричний перетворювач.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	11
3.2. Потенціал сонячної енергії для систем теплопостачання	12
3.3. Аналіз сонячних систем теплопостачання.....	19
3.4. Фототермальні системи пасивного типу	32
3.5. Комбіновані фототермічні системи енергозабезпечення	34
3.6. Методологічні підходи до дослідження фотоколекторних систем.....	38
3.7. Аналіз інтеграції фотоенергетичних систем у архітектурно-будівельні конструкції.....	41
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	44
2.1. Модель системи теплопостачання із фотопокрівлею	44
2.2. Аеродинамічний вплив на теплообмінні процеси фотоустановки.....	54
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ СОНЯЧНОЇ ПОКРІВЛІ	56
3.1. Характеристика фотопокрівлі без захисту з трубковими теплообмінними елементами	56
3.2. Дослідження ефективності фотопокрівлі з захисним покриттям.....	64
3.3. Аналіз результатів ефективності фотопокрівлі в сонячній системі теплопостачання.....	68
4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД СИСТЕМ СОНЯНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	69
4.1. Характеристика та функціональний принцип ССТ	69

4.2. Техніко-економічні порівняння ефективності використання фотопокрівлі та сонячних колекторів	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	80
ДОДАТКИ.....	83
Додаток А	84
ОХОРОНА ПРАЦІ.....	84

ВСТУП

Зростання вартості традиційних джерел енергії та поступове виснаження їхніх запасів, вимагають активного впровадження альтернативних та нетрадиційних джерел енергії. До таких належать сонячна, вітрова, геотермальна, гідроенергія та інші.

Сонячна енергія, ще безкінечно довго, може забезпечувати Землю протягом найближчих 3-4 мільярдів років. Річна кількість сонячної енергії перевищує глобальні потреби людства приблизно в багато разів. Найбільш простим та водночас ефективним методом використання енергії Сонця є її перетворення у теплову енергію. Для цього широко застосовуються спеціалізовані пристрої – сонячні колектори.

Сьогодні існує велика різноманітність конструкцій сонячних колекторів, що дозволяє обирати найбільш оптимальний варіант залежно від технічних і економічних показників. Більшість сучасних сонячних колекторів мають плоску конструкцію, яка дозволяє ефективно використовувати їхню поверхню для збору та перетворення сонячної енергії у теплову. Від площі колектора залежить кількість поглиненої сонячної енергії.

Розробка ефективних типів колекторів, які забезпечують підвищену продуктивність за зниженої собівартості, залишається пріоритетним напрямом у сфері відновлюваної енергетики, що дозволяє максимально використовувати потенціал сонячного випромінювання.

В Енергетичній стратегії України до 2035 року обґрунтована необхідність зростання використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). До 2035 року передбачається збільшити частку ВДЕ у загальному первинному енергопостачанні до 30 %. Що сформовано у вимогах, пов'язаних із приєднанням до Третього енергетичного пакета ЄС і виконанням положень Директиви ЄС 2001/80/ЕС, яка регулює допустимі рівні викидів оксидів сірки (SO_x), азоту (NO_x) та інше.

У липні 2021 року Уряд України прийняв нове зобов'язання: до 2030 року скоротити обсяги парникових газів на 65% порівняно з рівнем 1990 року. На той час уже було досягнуто зменшення викидів на 60% від зазначеного базового рівня, проте таке скорочення стало наслідком економічного спаду промисловості, а не результатом активних кліматичних зусиль.

Незважаючи на труднощі, викликані війною, зусилля на боротьбу зі зміною клімату поступово зростають. У 2023 році в Україні створили Державний фонд декарбонізації та енергоефективної трансформації. Основним джерелом його фінансування частково став податок на викиди CO₂, що сплачується великими підприємствами, для реалізації проектів з декарбонізації.

Податок на викиди діоксиду вуглецю, на сьогодні, становить 30 гривень за тону, що є одним із найменшим показником серед країн Європи. Основним інструментом досягнення цих цілей є розвиток відновлюваної енергетики разом із використанням потужностей атомних електростанцій.

В 2020 року встановлено СЕС загальною потужністю 5928 МВт. Частка СЕС на перший квартал 2021 року загальній генерації України складала близько 6 %. На кінець 2021 року загальна потужність ВЕС зросла до 1673 МВт, а промислових СЕС до 6226,9 МВт. Аналітичні центри надають інформацію, що за результатами 2021 року ВЕС зросли на 27,3% потужностей, а СЕС – на 4,8%[1].

Наразі в Україні сонячні електростанції мають переважну більшість серед ВДЕ і генерують близько 75% зеленої енергетики.

Україна володіє значним потенціалом для подальшого нарощування потужностей ВДЕ, зокрема вітрових і сонячних станцій. Водночас відносно висока вартість впровадження цих технологій у порівнянні з традиційними джерелами електрогенерації ускладнює їхнє широкомасштабне використання. Електроенергія, вироблена за допомогою ВДЕ, нині є приблизно вдвічі дорожчою.

Покрівлі, виготовлені з гофрованих металевих листів мають особливе значення як ефективний теплопоглинач. Їхня форма створює умови для підвищеного поглинання сонячного випромінювання, особливо вранці та ввечері,

коли кут падіння променів є меншим. У зв'язку з цим розробка сонячної теплової покрівлі з металевого даху з інтеграцією до неї сонячного колектора є актуальним рішенням. Така конструкція може бути вбудована у нові будівлі та існуючі споруди, забезпечуючи підвищену ефективність роботи традиційних комбінованих систем теплопостачання (КСТ).

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

Дослідження проведене в межах теми бакалаврської роботи є частиною комплексних науково-дослідних проектів, що реалізуються відповідно до наукових напрямів діяльності кафедри «Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту» Центральноукраїнського національного технічного університету. Це дослідження проведене згідно вимог Закону України «Про енергозбереження».

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- Провести аналіз переваг і недоліків систем та конструкцій сонячних колекторів, з оцінкою інтеграції до покрівлі будівлі сонячного колектора.
- Розробити конструкцію теплової покрівлі та вдосконалити математичну модель для оцінки ефективності поглинання сонячної енергії і визначення теплових акумуляційних властивостей системи.
- Провести експериментальні дослідження роботи теплової покрівлі для визначення їх експлуатаційних характеристик.
- За отриманими результатами визначити графічні й аналітичні залежності, впливових факторів на ефективність теплової сонячної покрівлі.
- Визначити економічну ефективність теплової сонячної покрівлі з врахуванням витрат на впровадження та експлуатацію.

Об'єкт дослідження — технологічний процес, пов'язаний із отриманням теплової енергії в конструкції теплової сонячної покрівлі.

Предмет дослідження — вплив конструктивних особливостей енергетичних та теплових процесів на продуктивність і ефективність функціонування системи теплової сонячної покрівлі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Проведені моделювання та експериментальні дослідження систем теплопостачання з сонячного тепловою покрівлею дозволили вдосконалити теоретичні підходи перетворення сонячної енергії в теплову за рахунок теплопоглинаючих будівельних конструкцій.

- Встановлено залежність середньої теплової потужності від періоду сонячного освітлення.

- Вдосконалено аналітичні залежності, що описують ефективність теплових сонячних покрівель з урахуванням динаміки зовнішніх умов.

Практична цінність отриманих результатів:

На підставі аналізу експериментальних даних та теоретичних моделей доведено доцільність теплових сонячних покрівель. Цей вид систем може використовуватися для забезпечення теплом при проектуванні нових будівель.

Основні наукові результати, які наведені у кваліфікаційній роботі, отримані здобувачем самостійно в результаті проведення експериментальних та теоретичних досліджень сонячної теплової покрівлі; досліджено вплив основних факторів на ефективність її роботи; виконано техніко-економічне обґрунтування використання теплових сонячних покрівель.

Апробація результатів дослідження:

Деякі аспекти кваліфікаційної роботи були представлені на Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві” (Кропивницький, 2024 р.)

РОЗДІЛ 1

СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Сучасні системи сонячного теплопостачання є важливим елементом переходу до ефективного енергетичного майбутнього. Вони забезпечують використання відновлюваних джерел енергії для нагріву води та обігріву приміщень, що сприяє зменшенню викидів парникових газів і залежності від традиційних викопних джерел енергії. Сонячна енергія є чистим і невичерпним джерелом, яке мінімізує вплив на навколишнє середовище. Використання сонячних теплових систем зменшує споживання викопного палива, що є ключовим фактором у боротьбі зі зміною клімату.

Сучасні системи мають високу ефективність перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію, особливо у регіонах із значною сонячною інсоляцією. У поєднанні з накопичувальними баками вони здатні забезпечувати теплом навіть у періоди низької сонячної активності. У довгостроковій перспективі сонячні системи зменшують витрати на енергоносії. Завдяки державним програмам підтримки встановлення таких систем стає доступнішим для широких верств населення.

Основним недоліком сонячних теплових систем є їх залежність від погодних умов. У дні з низькою сонячною їх ефективність значно знижується.

Для забезпечення якісного теплопостачання часто потрібна інтеграція з іншими джерелами енергії або використання акумуляційного обладнання, що значно підвищує вартість системи. В довгостроковій перспективі, початкові капіталовкладення залишаються високими, що виступає перешкодою для багатьох потенційних користувачів. У великих системах теплопостачання, інтеграція сонячних теплових систем потребує складних рішень для теплогенерації, зберігання та розподілу тепла.

Інновації у сфері акумуляторів, таких як фазоперехідні матеріали або підземні теплоакумулятори, здатні значно підвищити ефективність таких

систем. Використання гібридних систем, які поєднують сонячні теплові установки з іншими відновлюваними джерелами, наприклад тепловими насосами, дозволить зменшити вплив сезонних коливань.

Сучасні системи сонячного теплопостачання мають значний потенціал для розвитку та широкого впровадження, однак вони не позбавлені технічних та економічних викликів. Подальші дослідження та інновації у цій галузі сприятимуть зростанню їх ефективності та доступності. Як фахівець в галузі електроенергетики, я бачу перспективу в інтеграції цих систем у загальну енергетичну інфраструктуру.

3.2. Потенціал сонячної енергії для систем теплопостачання

Сучасна енергетична галузь перебуває в критичній точці трансформаційних процесів, що характеризується комплексом визначальних викликів технологічного та ресурсного характеру. Демографічні зрушення та перманентне підвищення рівня життєдіяльності суспільства спричиняють неухильне нарощування потреб в енергетичних потужностях, що, своєю чергою, створює системні виклики для традиційних схем енергозабезпечення.

Техніко-економічний аналіз перспектив розвитку паливно-енергетичного комплексу засвідчує наближення критичної межі експлуатації традиційних ресурсів. Прогнозований період видобутку розвіданих запасів нафти і природного газу – 100-150 років, що актуалізує питання термінового пошуку нових ефективних джерел енергетичної генерації.

Принципові обмеження традиційної моделі енергозабезпечення концентруються в площині геотехнологічних та екологічних ризиків. Зокрема, характерними викликами вугільної галузі є:

- Локалізація основних покладів на критичних глибинах (понад 1000 м)
- Висока ймовірність техногенних інцидентів

- Перманентне зростання собівартості видобувних процесів

Стратегічним вектором подолання системної кризи традиційної енергетики постає комплексна трансформація технологічних підходів до енергогенерації. Пріоритетним напрямком визначається впровадження альтернативних відновлюваних джерел енергії, зокрема:

- Геліоенергетика
- Вітроенергетика
- Утилізація техногенних теплових потоків

Принципова перевага означеного підходу полягає в мінімізації експлуатаційних витрат, практично необмеженому потенціалі відновлення та радикальному зниженні негативного антропогенного впливу на екосистему.

Реалізація представленої концепції вимагає системної модернізації світового енергетичного балансу, впровадження інноваційних технологічних рішень та формування принципово нових принципів енергозабезпечення.

Ось перефразований текст на рівні головного інженера-теплоенергетика:

Сучасна парадигма розвитку глобальної енергетичної системи вимагає радикальної трансформації технологічних підходів до генерації та споживання енергетичних ресурсів. Визначальним вектором означеної стратегії постає впровадження комплексних технологічних рішень у сфері нетрадиційних відновлюваних джерел енергії.

Розвиток галузі альтернативної енергетики характеризується інтенсивними дослідженнями як вітчизняних, так і зарубіжних наукових шкіл. Пріоритетними напрямками диверсифікації енергетичного балансу визначаються:

- Геліоенергетика
- Вітроенергетика

- Геотермальні технології
- Утилізація техногенних теплових потоків
- Гідроенергетичні системи

Найбільш дієвим компонентом виступає фотоенергетика, що характеризується унікальним потенціалом та принциповою екологічною нейтральністю.

Техніко-економічні дослідження Міжнародного енергетичного агентства характеризують потенціал фотоенергетики:

- Використання 1,5% сонячного випромінювання повністю забезпечує поточні глобальні енергетичні потреби
- Нарощування частки до 5% гарантує повне покриття перспективних енергетичних потреб цивілізації

Сонячна енергетика характеризується непоганими кліматичними умовами для впровадження фотоенергетичних технологій:

- Річний потік сонячного випромінювання в південних регіонах становить 1100-1380 кВт·год на 1 м²
 - Тривалість сонячного випромінювання сягає близько 2000 годин на рік
- Зрозуміло, існують принципові обмеження фотоенергетики пов'язані з низькою густиною падаючої сонячної радіації; нерівномірною інтенсивністю впродовж доби та року

Сонячне випромінювання залежить від комплексу фізико-географічних чинників, таких як:

- кут нахилу поверхні сонячних фотоелементів;
- географічна широта розташування;
- сезонні особливості;
- рівень хмарності.

Світовий потенціал сонячної енергії перевищує сумарне енергоспоживання людства в 10000 разів, що підтверджує перспективність означеного напрямку як базового для формування принципово нової моделі

світової енергетики.



Рис. 1.1. Середньорічний розподіл надходжень сонячної енергії на території України [3]

Ось перефразований текст на рівні інженера-енергетика:

Сонячний потік надходить до земної поверхні у формі електромагнітних променевих систем, які характеризуються комплексним параметром питомої густини потоку, що вимірюється в Вт/м². Означений параметр має низку синонімічних науково-технічних номінацій: питома потужність, інтенсивність радіаційного випромінювання, енергетична освітленість.

Фізико-астрономічні характеристики сонячного випромінювання мають джерело випромінювання - сонце з усередненою температурою плазмового шару близько 5762 К надсилає електромагнітне випромінювання в трьох діапазонах (ультрафіолетовий і видимий (короткохвильові), інфрачервоний (довгохвильовий))

Принципова особливість сонячної радіації полягає в існуванні трьох потоків:

- пряме радіаційне випромінювання;
- розсіяне випромінювання;

- відбите випромінювання.

Технічна реєстрація та вимірювання сонячної радіації вимагають використання спеціалізованого вимірювального обладнання: піранометрів, спектрорадіометрів, фотографів.

Принципова відмінність сучасних фотоенергетичних технологій полягає в здатності максимально ефективно трансформувати електромагнітне випромінювання в інші види енергії - теплову чи електричну.

Таким чином, фотоенергетика постає складною міждисциплінарною галуззю, що інтегрує положення астрофізики, електродинаміки, термодинаміки та технічних наук.

Геліоенергетичні процеси являють собою надзвичайно складну систему фізико-технічних взаємодій, що охоплюють широкий спектр природничо-наукових закономірностей. Сонячне випромінювання - це унікальне явище електромагнітної природи, яке характеризується складними механізмами трансформації та перетворення енергетичних потоків.

Принципова особливість сонячної радіації полягає у тому, що включає різноманітні спектральні діапазони. Короткохвильове випромінювання, яке домінує в фотофізичних процесах, охоплює видимий спектр та частину ультрафіолетового діапазону. Водночас довгохвильове випромінювання представлене інфрачервоною областю, що має принципово відмінні характеристики взаємодії з навколишнім середовищем.

Атмосферна трансформація сонячної радіації являє собою надзвичайно складний процес селективної взаємодії електромагнітних хвиль з різноманітними компонентами повітряного середовища. Ключову роль у цьому процесі відіграють озоновий шар, водяна пара, повітряні маси та дисперсні частинки. Внаслідок цих взаємодій відбувається часткове розсіювання, поглинання та перерозподіл енергетичних потоків.

Інтенсивність сонячного випромінювання є динамічною величиною, що залежить від цілого комплексу параметрів. Визначальними чинниками

постають довжина електромагнітної хвилі, часова динаміка та просторова орієнтація променевої системи. Кожен із цих параметрів може суттєво впливати на загальну картину енергетичного обміну.

Методологія дослідження фотофізичних процесів вимагає застосування складного математичного апарату, графоаналітичних методів та високотехнічного вимірювального обладнання. Сучасні наукові підходи передбачають використання комплексних моделей, що дозволяють максимально точно описати механізми перетворення сонячної енергії.

Особливої уваги заслуговує просторово-часова динаміка сонячного випромінювання. Залежно від географічної широти, сезонних змін та атмосферних явищ, інтенсивність фотоенергетичного потоку може зазнавати суттєвих флуктуацій. Саме тому кожне конкретне дослідження вимагає прецизійного врахування локальних особливостей навколишнього середовища.

Інтенсивність сонячної радіації I_b , яка надходить під прямим кутом на поверхню, залежить від широти і може бути знайдена за формулою: [4,10]:

$$I_b = \frac{Q_0 \cdot \sin h}{\sin h + c} \quad (1.1)$$

де h – висота сонця в азимуті для Кропивницького - 48° північної широти в задану годину доби, град; c – експериментально визначений коефіцієнт прозорості атмосфери; Q_0 – інтенсивність загальної сонячної радіації за сонячної погоди, Вт/м².

Для широти $48-50^\circ$ ця величина визначається за формулою:

$$I_b = Q_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot \frac{\sin h}{\sin h + c} \quad (1.2)$$

де r_0 – середня відстань, що проходить сонячне світло до Землі, м; r – відстань між Землею і Сонцем в кожний період року, м.

Середнє значення інтенсивності сонячної радіації I_{cp} , визначається за формулою:

$$I_{\text{cp}} = I_{\text{в}} \cdot \cos \theta \quad (1.3)$$

де θ – кут між потоком випромінювання і перпендикуляром до поверхні.

Сучасна наука розробила унікальні методики дослідження фотоенергетичних потоків, кожна з яких має принципові особливості та специфічні сфери застосування.

Магістральними напрямками фотометричних досліджень постають чотири базові методологічні підходи:

Калориметричний метод являє собою найбільш природній спосіб безпосередньої трансформації сонячної енергії в теплову. Принципова особливість цього підходу полягає в максимально точній реєстрації енергетичних перетворень через безпосередню взаємодію з радіаційним потоком.

Фотоелектричні методики базуються на використанні фотоефекту - унікального фізичного явища перетворення електромагнітного випромінювання в електричні імпульси. Означений підхід дозволяє здійснювати надпрецизійні вимірювання з мінімальною похибкою.

Фотографічний метод ґрунтується на хімічній взаємодії світла з реєструючими матеріалами, що дає змогу фіксувати найтонші нюанси радіаційного випромінювання. Технічна реалізація передбачає використання спеціалізованих реєструючих систем.

Візуальні методики дозволяють здійснювати експрес-оцінку фотоенергетичних параметрів через безпосереднє спостереження та якісну інтерпретацію.

Інструментальний арсенал фотометрології включає цілу низку унікальних приладів, таких як радіометри, актинометри, піранометри.

3.3. Аналіз сонячних систем теплопостачання

Активні системи сонячного теплопостачання репрезентують пріоритетний напрямок практичної реалізації фото потенціалу. Найпростішим та водночас найефективнішим способом використання сонячної енергії постає її пряме перетворення в теплову форму.

Сучасна фотоенергетика демонструє надзвичайно динамічний розвиток, охоплюючи принципово різні технологічні підходи, які можуть пов'язані з фотоелектричним перетворенням, фотобіологічними технологіями або хімічними методами трансформації енергії.

Перманентне вдосконалення технологій характеризується послідовним підвищенням оптичних та фотоелектричних властивостей фотоперетворювачів. Кожен наступний технологічний цикл демонструє принципово нові можливості щодо підвищення ефективності перетворення сонячної радіації.

Енергетична інженерія формує складну галузь технічних рішень, що має високі темпи розвитку. Основним технічним рішенням перетворення сонячної радіації в енергетичний потік постають фотоколектори - інженерні пристрої, здатні трансформувати електромагнітне випромінювання в теплову енергію.

Розвиток технологій налічує декілька десятиліть перманентних досліджень та технічних удосконалень. Сучасний світовий ландшафт фотоенергетики характеризується надзвичайно диференційованим підходом до конструктивних рішень, що охоплюють широкий спектр технічних можливостей.

Класифікація фотоколекторів являє собою складну систему, що враховує різноманітні параметри:

За температурним режимом виокремлюють:

- низькотемпературні системи (до 100°C);
- середньотемпературні системи (до 200°C);
- високотемпературні системи (понад 200°C).

За принципом взаємодії з фотопотоком розрізняють:

- плоскопоглинаючі конструкції;
- концентруючі фокусні системи.

Принципова відмінність означених підходів полягає в механізмах акумуляції та трансформації сонячної радіації. Поглинаючі колектори працюють з природним світловим потоком, тоді як фокусні системи здійснюють попередню концентрацію та перерозподіл променевої енергії.

Переважно використовуються плоскі системи, що характеризуються:

- здатністю працювати з прямим та розсіяним випромінюванням;
- конструктивна простотою;
- відносно невисокою собівартістю.

Технологічні особливості сучасних фотоколекторів передбачають використання селективно-поглинаючих покриттів з унікальними фізико-хімічними властивостями.

Водночас, технології плоских фотопоглиначів характерні невисокий коефіцієнт корисної дії та значна залежність динаміки сонячного випромінювання впродовж доби.

Лідером у впровадженні фототехнологій постає Китайська Народна Республіка, яка акумулює значний науково-технічний потенціал у сфері альтернативної енергетики.

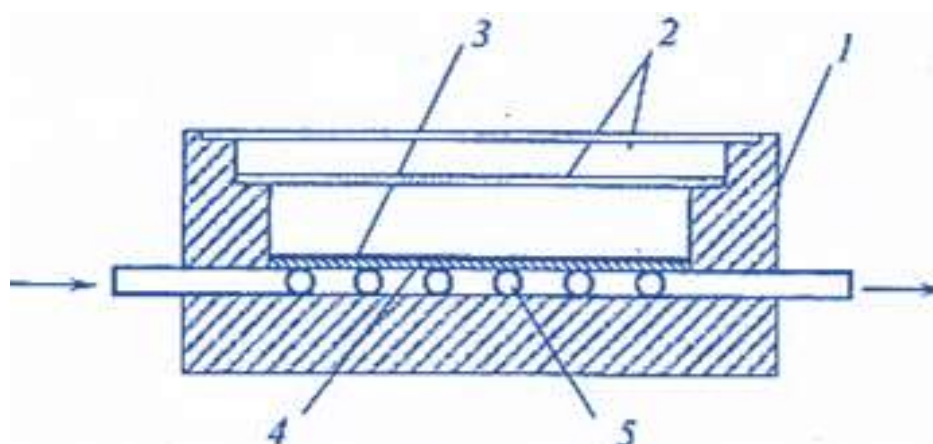


Рис. 1.2. Конструкція плоского фотоколектора:

1–корпус; 2 – скляний екран; 3 – селективно-поглинаюче покриття; 4 – мідний тепловідвідник (пластина); 5 – з'єднуючі трубки

Для досягнення максимальної ефективності роботи сонячного колектора (СК) його встановлюють у такий спосіб, щоб поверхня отримувала якомога більше сонячного випромінювання протягом дня. Рекомендований кут нахилу СК становить на $10\text{--}15^\circ$ менше, ніж географічна широта регіону, що дозволяє забезпечити стабільний нагрів теплоносія до температури $50\text{--}60^\circ\text{C}$. Використання кожного квадратного метра поверхні сонячного колектора дозволяє щорічно економити від 120 до 180 кг умовного палива.

Нагріта поверхня колектора передає тепло металевій основі — теплопоглиначу, коефіцієнт поглинання якого може досягати 90%. Від теплопоглинача тепло передається теплоносію, що циркулює через спеціально інтегровані трубки. Найкращими матеріалами для виготовлення теплопоглиначів є мідь та алюмінієві сплави, завдяки їх високій теплопровідності та надійності. Конструктивні варіанти теплопоглинальних панелей варіюються залежно від умов експлуатації, економічних вимог та інших факторів.

Додатково, нанесення на поверхню теплопоглинача скломалевого покриття значно підвищує його довговічність, забезпечуючи ефективну роботу системи впродовж тривалого періоду. Різноманіття конструкцій та матеріалів дозволяє адаптувати системи сонячного теплопостачання під конкретні експлуатаційні умови, забезпечуючи енергоефективність і зниження витрат на традиційні енергоресурси.

Для збільшення продуктивності теплопоглиначів важливим є розширення їхньої поверхні через підвищення шорсткості та загальної площі, що дозволяє досягти більшої абсорбційної здатності, створити турбулентність у повітряному потоці (якщо теплоносієм є повітря) і покращити контактну взаємодію теплоносія з теплопоглиначем. На сьогодні оприлюднено чимало досліджень, присвячених аналізу та вдосконаленню конструктивних рішень для сонячних колекторів.

Одним із популярних варіантів є сонячний колектор, у якому теплопоглинач виконаний у вигляді реєстра, утвореного з паралельно розташованих полімерних трубок. Така конструкція дала можливість суттєво зменшити собівартість колектора без значних втрат ефективності.

Прозоре покриття у сонячних колекторах відіграє важливу роль, забезпечуючи захист абсорбуючої поверхні від пилу й механічних ушкоджень, а також зменшуючи тепловтрати шляхом обмеження конвекції та інфрачервоного випромінювання. Зазвичай для цього застосовується листове скло. Одним із ключових параметрів якості такого скла є його прозорість, яка визначається коефіцієнтом пропускання τ .

Для сонячних колекторів використовують скло зі зниженим вмістом заліза й солей, що забезпечує високий коефіцієнт пропускання ($\tau = 0,90\text{--}0,95$). Проте плоске скляне покриття має недолік: його ефективність змінюється залежно від кута падіння сонячних променів.

Серед поширених матеріалів застосовується скло Centros Solar Glas і Diamat, які демонструють коефіцієнти пропускання 96% і 91% відповідно. Ці матеріали є одними з найефективніших і широко використовуються в сучасних фотоколекторах.

Сучасні тенденції вибору захисного покриття для сонячних колекторів зводяться до підвищення ефективності збору сонячного випромінювання без необхідності зміни кутів нахилу обладнання. Часто замість традиційного плоского скла використовуються прозорі оболонки з набором скляних призм, які фокусують світло та збільшують кількість поглинутого випромінювання. Однак таке рішення має недоліки, зокрема, складність у виробництві призм, що збільшує вартість колектора. Крім того, подібна конструкція збільшує вагу пристрою, що негативно позначається на його довговічності та надійності.

Ефективність прозорих покриттів для фотоколекторів також покращується завдяки нанесенню тонких плівок на їх поверхню. Застосовуються технології хімічної обробки скла для зниження його відбивних властивостей. Наприклад, необроблене скло має відбивну здатність щодо сонячного випромінювання на

рівні 0,0434 (при коефіцієнті заломлення 1,526). Хімічне травлення дозволяє знизити цей показник удвічі – до приблизно 0,02. Унаслідок цього коефіцієнт пропускання скла зростає з 0,92 до 0,96, що значно покращує теплові характеристики плоских сонячних колекторів. Проте обробка великих площ скла є трудомісткою та дорогою, що суттєво збільшує загальну вартість колекторів.

Особливу ефективність демонструють колектори з вакуумованими приймачами. У таких пристроях прозоре покриття виконується у вигляді скляних трубок, всередині яких розташовані трубчасті теплопоглиначі із селективним покриттям. Завдяки вакуумному простору між прозорими трубками і поглинаючими елементами значно зменшуються тепловтрати в навколишнє середовище, а поглинена енергія майже повністю передається теплоносію. Крім того, кругла форма прозорого покриття мінімізує втрати тепла через конвекцію.

Для подальшого підвищення ефективності вакуумних колекторів трубки часто поміщають у фокусуючі жолоби, що спрямовують сонячне випромінювання на теплопоглинаючі елементи. Тривають також розробки, спрямовані на вдосконалення конструкцій прозорих компонентів, аби досягти максимальної ефективності і надійності роботи сонячних систем.

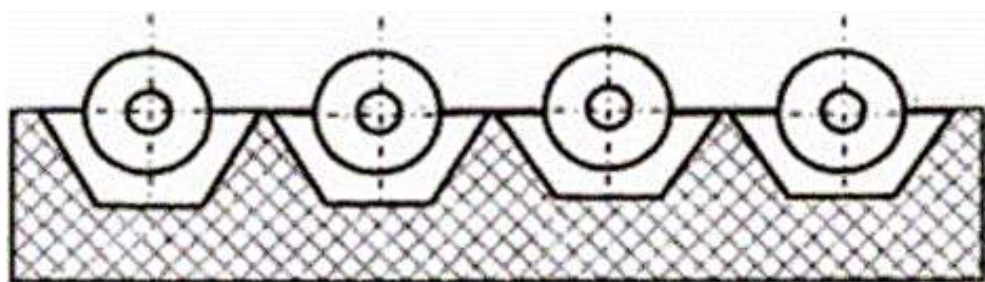


Рис. 1.3. Поперечний переріз трубного теплового фотоколектора

Трубчасті сонячні колектори відзначаються високим коефіцієнтом утилізації сонячної енергії та демонструють стабільну роботу навіть у похмуру погоду. Крім того, вони мають низьку залежність ефективності від положення відносно сонця та кута нахилу випромінювання. Однак їхнім основним недоліком

є знижений оптичний коефіцієнт корисної дії (ККД) та висока собівартість, обумовлена складністю виробничих процесів.

Теплова труба являє собою вакуумований герметичний пристрій у формі труби або сплющеного каналу, частково заповненого рідким теплоносієм. У зоні випаровування, при надходженні теплової енергії, рідина випаровується, утворюючи пару, яка переміщується в конденсаційну область, де знову переходить у рідкий стан, повертаючись до випарника. Як робочі рідини використовуються дистильована вода, ацетон або холодоагенти для роботи при низьких температурах.

Найбільш поширені на сьогодні трубчасті колектори з мідними тепловими трубками, які вирізняються високою надійністю та тривалим терміном експлуатації. Проте одним із суттєвих недоліків є недостатньо якісний контакт між оболонкою теплової труби та теплопоглинальною поверхнею. Для вирішення цієї проблеми пропонується застосування алюмінієвих теплових труб. Технологія виготовлення таких труб дозволяє отримувати циліндричну оболонку одночасно з плоскою теплопоглинальною поверхнею. Це спрощує конструкцію, знижує собівартість виготовлення сонячного колектора, а також покращує його гідравлічні та теплотехнічні характеристики.

У фотосистемах найчастіше застосовується вода як теплоносій, однак вона має низку недоліків. Зокрема, вода сприяє корозійним процесам, містить солі, що відкладаються на внутрішніх поверхнях теплообмінних труб, утворюючи накип. Також у теплій воді активно розмножуються мікроорганізми, які погіршують ефективність теплообміну. Важливим недоліком є те, що вода замерзає при низьких температурах, і відновлення таких систем потребує значних фінансових витрат.

Застосовують спеціалізований рідкий теплоносій, який містить суміш гліцерину, води, глюконату кальцію та борної кислоти (в пропорції 1:1), а також консервуючі добавки на основі сульфату міді чи бензойної кислоти. Цей склад дозволяє отримати теплоносій з низькою температурою замерзання, високою

температурою кипіння, екологічною безпекою та низькою займистістю. Подібні розчини ідеально підходять для використання в фотосистемах.

Повітряні сонячні колектори (СК) також знаходять широке застосування. Вони використовують потік повітря як теплоносії і відрізняються різноманітними конструкціями абсорбуючих поверхонь та методів обдування. Поглинальні елементи можуть бути виготовлені з плоских, оребрених або гофрованих металевих листів, напівпрозорих скляних пластин, пористих матеріалів або об'ємних сіток. Повітряні колектори є економічнішими за рідинні аналоги і не потребують додаткових заходів для захисту від замерзання. Найефективніше у таких системах застосовувати гофровані металеві листи як абсорбери, адже вони забезпечують високу поглинальну здатність та значну площу контакту з повітряним потоком.

Для підвищення тепловіддачі в таких колекторах часто використовують турбулізатори, які встановлюють між прозорим покриттям і теплопоглиначем. Вони забезпечують перемішування повітряного потоку, збільшуючи ефективність теплопередачі. Існують також конструкції, де абсорбуючий елемент виконаний у вигляді гофрованої пластини, схожої на плісировану тканину, з отворами для проходження повітря в місцях перетину. Це дозволяє не тільки збільшити площу абсорбера, але й сприяти турбулізації повітряного потоку, що покращує теплообмін.

Середній коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного колектора складає близько 70 % і значною мірою залежить від зовнішньої температури, інтенсивності потоку сонячного випромінювання та рівня нагрівання води, необхідного для роботи колектора [5].

Ефективність сонячного колектора, що позначається як η , визначається співвідношенням між тепловими втратами, які характеризуються коефіцієнтом тепловтрат K_k та ефективним оптичним ККД η_0 [5, 6].

$$\eta = \eta_0 - K_k \cdot (T_{\text{вх}} - T_3) / I_{\text{в}} \quad (1.4)$$

де I_b - інтенсивність сонячного потоку, що спрямовується на поверхню сонячного колектора, вимірюється у $\text{Вт}/\text{м}^2$; K_k - коефіцієнт тепловтрат, що відображає втрати енергії у колекторі, визначається у $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{вх}}$, T_z - температурні показники позначають відповідно температуру теплоносія на вході в колектор та температуру навколишнього середовища, вимірювані в Кельвінах.

На ефективність роботи сонячного колектора значний вплив мають зовнішні фактори, такі як вітер, пил та затінення. При кутах нахилу колектора в діапазоні $0-50^\circ$ забруднення може призводити до втрати до 5 % продуктивності [7]. Коли сонячне випромінювання падає під кутом, відмінним від перпендикулярного, конструктивні елементи можуть блокувати частину радіації, що також знижує ККД системи.

Для досягнення максимальної ефективності сонячного колектора важливо оптимально налаштувати його кути встановлення, що дозволить максимізувати кількість поглинутої енергії [3, 4, 5, 11]. Дослідження показують, що зміна азимуту чи кута нахилу поверхні на $\pm 30^\circ$ незначно впливає на загальну кількість зібраної енергії [11, 12]. Однак, поєднана зміна цих параметрів відносно напрямку сонячного випромінювання суттєво позначається на продуктивності (рис. 1.5) як окремого колектора, так і всієї фотосистеми [13, 17, 19].

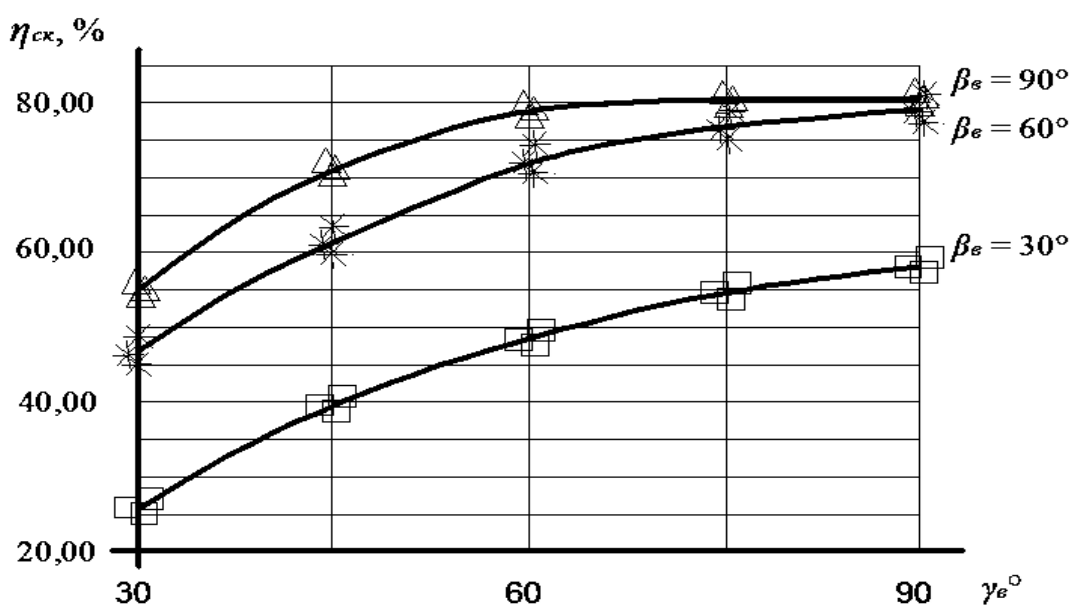


Рис. 1.4. Продуктивність плоского сонячного колектора в залежно від кутів падіння теплового потоку (γ_v) і за інтенсивності випромінювання (β_v).

Для більш ефективного використання сонячної енергії застосовуються сонячні колектори із потрійною орієнтацією [19]. Вони забезпечують додатковий збір енергії в ранкові години та дозволяють накопичувати більше теплової енергії до полудня. Крім того, такі конструкції подовжують період збору сонячної енергії у порівнянні з колекторами, орієнтованими виключно на південь.

На рис. 1.5 показано залежність інтенсивності потоку сонячної енергії (I_c) при її поглинанні системою потрійно орієнтованих сонячних колекторів.

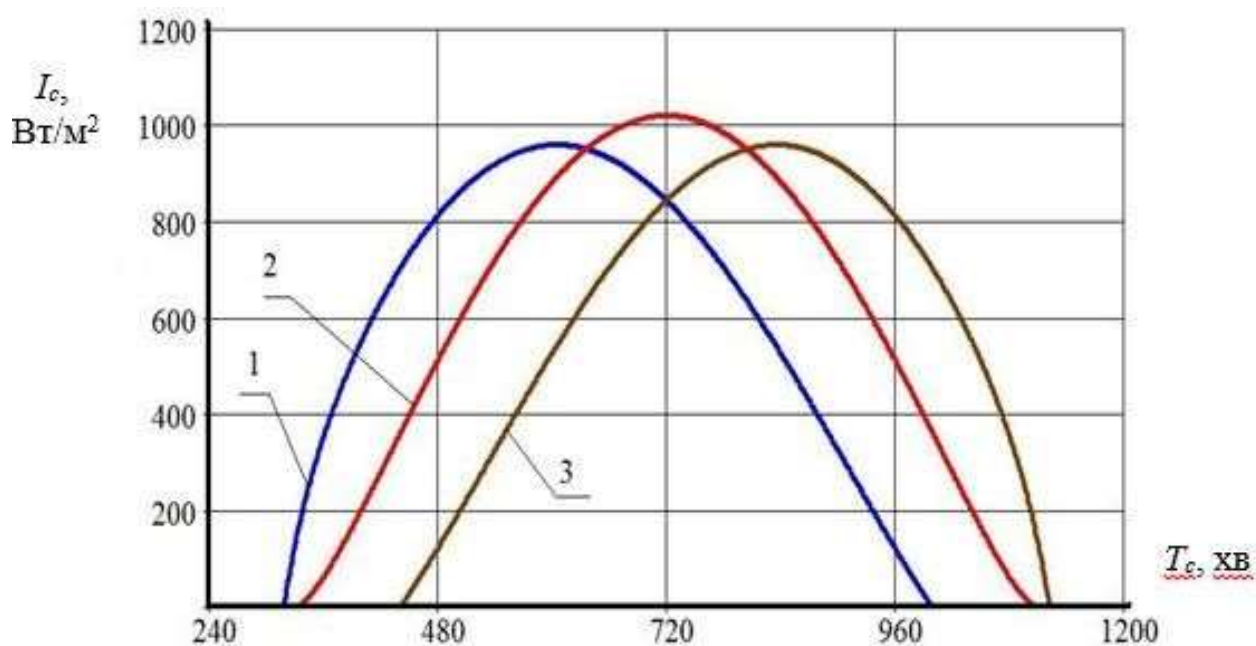


Рис. 1.5 Зміна інтенсивності сонячного випромінювання в системі фотоколекторів з потрійною орієнтацією.

1 – фотоколектор, орієнтований на схід; 2 – фотоколектор, спрямований на південь; 3 – фотоколектор із західною орієнтацією.

При аналізі різних матеріалів, використовуваних для виготовлення теплопоглиначів, було встановлено, що зі збільшенням товщини теплопоглинача та його коефіцієнта теплопровідності ефективність роботи колектора підвищується [19]. На коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного колектора значний вплив має температура теплоносія на вході в колектор: чим вона нижча, тим зменшуються тепловтрати і збільшується ККД. Зі збільшенням витрат теплоносія ККД сонячного колектора спершу зростає до певного порогу, після чого

стабілізується, вказуючи на існування оптимального діапазону витрат теплоносія [19].

Ефективність роботи сонячного колектора істотно зростає при використанні на поверхні селективно-поглинального матеріалу, який здатний ефективно поглинати видиму частину сонячного спектру та майже не випромінювати в інфрачервоній області [16, 15]. Селективні покриття для теплопоглиначів повинні мати високий коефіцієнт поглинання, низьку емісію, стабільні оптичні характеристики, витримувати короткочасне перегрівання та забезпечувати високу корозійну стійкість.

Найбільш розповсюдженим типом селективного покриття є тонкоплівкові матеріали на металічній основі, які ефективно поглинають як видиме світло, так і інфрачервоне випромінювання. До таких покриттів належать покриття з чорного нікелю та чорного хрому, що наносяться за допомогою електрохімічних методів. Покриття з чорним хромом є найперспективнішим для досягнення необхідних оптичних властивостей і високої термічної стабільності, однак воно має високу вартість. Виготовлення селективних поверхонь потребує більших витрат порівняно з традиційним фарбуванням теплопоглиначів у чорний колір. Зважаючи на це, а також на невеликий коефіцієнт поглинання при низьких температурах, використання таких покриттів не є доцільним для теплопоглиначів, які працюють при температурах нижче 60°C [10].

Також запропоновано використання селективного покриття на основі чорного алюмінію, яке отримується шляхом реактивного розпилювання алюмінію у вакуумі в суміші з киснем та аргоном [16]. Дослідження показали, що це покриття дозволяє підвищити ККД сонячного колектора на 18-22%, а коефіцієнт поглинання перевищує 95%.

На сьогоднішній день широко використовуються сонячні колектори, оснащені системами, що автоматично слідкують за рухом Сонця [21]. Було запатентовано сонячний колектор, оснащений механізмом для добового обертання, що працює за допомогою годинникового механізму [16]. Для того, щоб здійснювати слідкування за Сонцем, колектор оснащений двома

регулювальними пристроями: перший автоматично коригує кут нахилу скла протягом дня, а другий змінює кут нахилу кожні шість місяців. Обидва пристрої виконано у вигляді ексцентриків, закріплених на валах, що розташовані на рухомому кронштейні між основою та рамою скла. Це дозволяє протягом року підтримувати оптимальне положення колектора для максимальної ефективності отримання сонячного випромінювання.

Попри всі переваги фотоколекторів з концентраторами, довготривала та ефективна експлуатація таких систем стикається з низкою проблем, зокрема, окисленням, забрудненням і зносом дзеркальних поверхонь. Тому більш раціональним рішенням є використання вдосконалених плоских сонячних колекторів.

Існують дослідження, що показують, що для системи сонячних теплопостачальних технологій з плоскими колекторами достатньо здійснювати кілька переорієнтацій колекторів протягом дня для досягнення максимальної ефективності в зборі сонячної енергії [12, 15].

Крім того, доцільно збільшити площу поглинання теплообмінної пластини, використовуючи конструкцію у вигляді півсферичних лунок [8]. Це значно підвищує ефективність сонячного колектора.

Запатентовано сонячний колектор, корпус якого має напівсферичну форму, а абсорбер виконаний у вигляді гофрованої труби, що розміщується спіралеподібно в корпусі, контактуючи з його внутрішньою поверхнею. Як теплоносієм використовується рідина, фізико-хімічні властивості якої сумісні з матеріалом труби з точки зору захищеності [8]. Це сприяє підвищенню ККД колектора завдяки зниженню теплового напору. Однак, такі колектори виявляються неефективними протягом дня в цілому, з огляду на специфіку використання сонячної енергії в різні періоди доби [11].

Одним з популярних напрямків є використання сонячних колекторів з полімерних матеріалів, що дозволяє знизити масу та вартість як самого колектора, так і фотосистеми загалом, завдяки заміні металів у конструкції на більш легкі і дешеві матеріали.

Існує велика кількість полімерів, які можна використовувати для виготовлення конструкції плоского сонячного колектора, серед яких поліпропілен, полікарбонат, полісульфон, поліамід, аморфний поліамід, волокнисті пластики, полівінілхлорид, поліметилпропілен та акрил.

Рекомендується використовувати полімерний сонячний колектор, який виготовляється з плити, що має сотову структуру. Як абсорбер та прозоре покриття в такому колекторі застосовується полімерна плита [20]. Така конструкція включає два прозорі покриття, що значно знижує загальний коефіцієнт теплових втрат. Хоча характеристики таких колекторів на 7-14% гірші порівняно з традиційними моделями, їх мала вага та знижена вартість роблять їх перспективними для використання.

Додатково ефективним є виробництво сонячних колекторів на основі багат шарових стільникових полікарбонатних плит [19], оскільки полікарбонат має високу стійкість до різних хімічних речовин, кислот і солей. Стільникові плити полікарбонату складаються з паралельних листів, розділених поперечними перегородками, що утворюють міцну і легку структуру.

Експериментальні дослідження товщини захисного прозорого покриття для полімерного сонячного колектора показали, що використання покриття товщиною понад 40 мм є неекономічним [19]. Вплив вітрових навантажень на ефективність таких колекторів показав, що при швидкості вітру від 1 до 5 м/с ефективність полімерного сонячного колектора знижується менше, ніж у традиційного, відповідно на 20% і 33%.

Також застосовуються безтрубні сонячні водонагрівачі лоткового типу [10]. Їх особливістю є поперечне розташування укорочених перегородок через один ряд, що забезпечує зигзагоподібний рух води. Це дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії сонячного колектора, зменшити час нагріву води та знизити вартість конструкції.

Враховуючи невідповідність між часом надходження сонячної енергії та її споживанням, виникає необхідність у застосуванні акумуляторів тепла [7, 8, 9, 11, 14]. Динаміка потоку сонячної енергії протягом доби наведена на рис. 1.7.

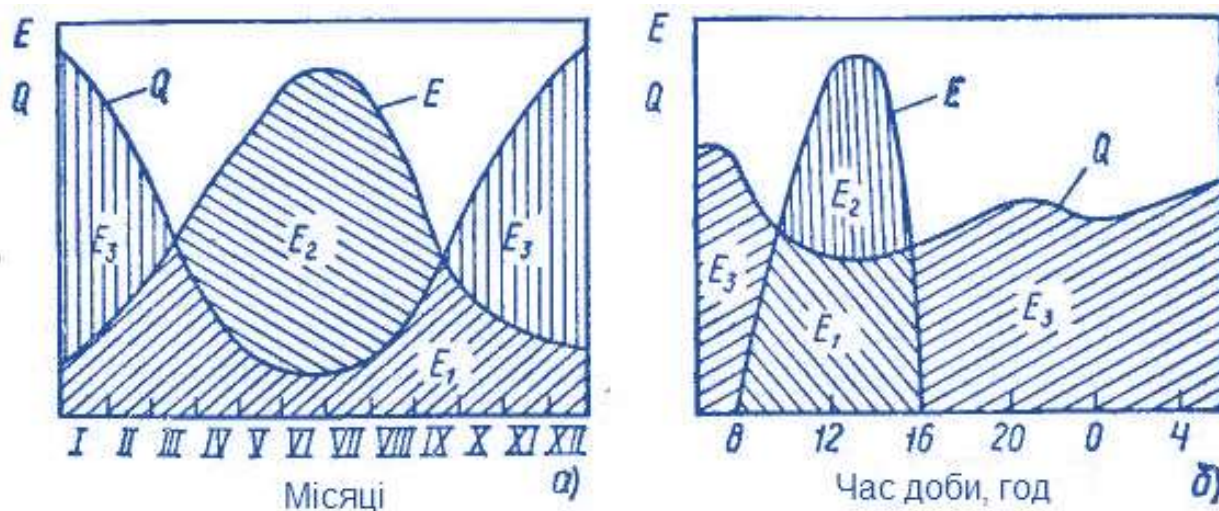


Рис.1.7. Динаміка використання сонячної енергії [11]:

E – кількість використаної сонячної енергії; Q – теплове навантаження об'єкту

Найбільш поширеними є водяні накопичувачі теплової енергії [20]. Ці пристрої можуть працювати як за природною, так і за механічною циркуляцією. В системах сонячного теплопостачання з повітряним теплоносієм часто застосовуються пористі теплоаккумулятори [20]. У таких пристроях тепло зберігається у великій масі дрібного каміння при постійному провітрювання теплоносієм. Пористі аккумулятори є дешевшими за водяні, але вони займають втричі більше простору і їх складніше інтегрувати в інтер'єр приміщення.

Значну популярність також мають ґрунтові накопичувачі тепла [21], де акумулювання теплової енергії відбувається завдяки високій теплоємності засипки (піску, каменю тощо), що забезпечує поступову зміну температурних характеристик. Перевагою таких систем є відносно низькі витрати на їхнє спорудження. Проте, вони мають суттєві теплові втрати, що значною мірою залежать від розмірів, форми аккумуляторів, а також температурних показників і теплоізоляційних властивостей ґрунту.

Найбільш компактними є теплоаккумулятори, що використовують фазовий перехід [12, 19]. В таких пристроях енергія зберігається у вигляді прихованої

теплоти при переході речовини з одного стану в інший або при поліморфному переході кристалічної структури.

Для підвищення енергоефективності теплових сонячних колекторів розроблені колектори з фотоелектричними панелями, які дозволяють генерувати електричну енергію, достатню для живлення циркуляційного насоса. Однак, головним недоліком для таких систем є складність конструкції та їх висока вартість.

3.4. Фототермальні системи пасивного типу

Фототермічні конструкції з пасивною асиміляцією сонячної радіації представляють собою інженерні рішення, архітектурні компоновки яких ґрунтуються на методиці природної термічної циркуляції. Для транспортування теплової енергії не задіюються технологічні агрегати та механізми. У фототермальній пасивній споруді сама архітектурна структура виконує функцію фотоакумулятора. Світлова радіація, що потрапляє на огорожувальні поверхні, світлопрозорі конструкції, дахові площини та інші архітектурні елементи, забезпечує термічне перетворення.

Геліотермічні пасивні системи можуть мати відкриту та закриту архітектурну конфігурацію. У відкритих модифікаціях фотоенергія проникає безпосередньо в інтер'єрний простір, а в закритих варіантах – променевий потік поглинається спеціалізованим теплосприймаючим елементом.

Переваги фототермальних пасивних систем полягають у простоті технічної реалізації та економічній доцільності. Також їм притаманні певні конструктивні обмеження: складність термічної трансляції в просторово віддалені приміщення, нестабільність та значні флуктуації теплонадходжень, що вимагає впровадження додаткових інженерних рішень щодо сонцезахисту в літній період та мінімізації радіаційних втрат у зимовий та нічний часові інтервали.

Для оптимізації термічного балансу архітектурної споруди північна геометрична проекція повинна мати мінімальну висотну характеристику, бути позбавленою світлопрозорих отворів, з подвійними буферними просторами. Меридіональну орієнтацію виконують максимальної висоти з повною світлопрозорістю. Передбачають посилену термоізоляційну конструкцію. Для нівелювання нерівномірності фототермічних надходжень частину світлопрозорої поверхні використовують для природної освітленості, інший сегмент – для нагрівання темнопігментованих стінових панелей, розташованих за світлопрозорим бар'єром. Завдяки природній конвекційній циркуляції відбувається тепловідведення від стінових панелей та додаткова термічна активізація повітряного середовища приміщення.

Матеріали з високою здатністю акумуляції та збереження теплової енергії включають: бетонні підлогові плити, кам'яні огорожувальні конструкції та інші будівельні субстанції. Вони становлять базові елементи в архітектурних спорудах з пасивною фотоенергетичною концепцією.

Для запобігання надмірного теплового навантаження в літній період використовують фотозахисні архітектурні елементи, що перешкоджають потраплянню сонячної радіації на світлопрозорі поверхні.

До пасивних фототермальних систем належать теплично-парникові комплекси, фотоакумулятори, резервуари для термічної обробки рідинних середовищ, інсоляційні веранди та зимові сади. Рациональне впровадження таких систем забезпечує економію 30-40% від традиційних витрат теплової енергії.

Визначальним компонентом фотоенергетичних пасивних систем виступає акумуляція термічної енергії. Теплоакумулюючий пристрій не має обов'язкового приєднання до фотоколекторного елемента. Його можна розташувати автономно всередині споруди. Теплоаккумулятор здатен розміщуватися під підлоговою конструкцією в міжповерхових плитах або у внутрішніх перегороджувальних площинах.

Тепловий агент через міжповерхові конструкції або стінові елементи транслює термічну енергію рідинному середовищу, що локалізоване поруч з акумуляторами у великогабаритних резервуарах. За можливості теплоакумуючий пристрій має бути розташований у приміщенні, яке підлягає температурній корекції – обігріву або охолодженню.

Рациональна геометрична відстань між світлопрозорим огородженням та теплоакумуючою стіною повинна становити 50-125 мм.

3.5. Комбіновані фототермічні системи енергозабезпечення

Геліотермальні перетворювальні системи призначені для трансформації сонячної радіації у теплову субстанцію, її термічної акумуляції та подальшої дистрибуції споживачеві. Архітектурно-інженерних схемних рішень таких фотосистем існує надзвичайно багато, проте всі вони повинні складатися з ключових функціональних елементів: фотопоглинаючого пристрою, термоакумуючого резервуару та теплоспоживаючої підсистеми.

У сучасній інженерній практиці спостерігається значна варіативність схемних компонувань комбінованих фототермальних систем, особливо в контексті архітектурних об'єктів з пасивним енергозабезпеченням.

При проєктуванні фототермальних установок з використанням фотоколекторних панелей значна частка фінансових витрат припадає безпосередньо на фотоперетворюючі елементи. Збільшення їхньої світлоприймальної площі не лише забезпечує вищий коефіцієнт заміщення сонячної енергії, але й спричиняє технічне ускладнення та здорожчання фотоустановки.

Підвищення функціональної ефективності фотоколекторних систем можливо досягнути шляхом оптимізації технічних рішень та зменшення експлуатаційної вартості. Саме тому багато дослідників пропонують

впроваджувати комбіновані фототермічні системи з інтегрованими технологічними рішеннями.

Геліоенергетичні установки доцільно інтегрувати з інноваційними енергоощадними системами теплопостачання. До найперспективніших інженерних рішень можна зарахувати гібридні системи, що складаються з фотоводонагрівної та теплонасосної підсистем.

Теплонасосна підсистема використовує низькопотенційні теплові режими ґрунтового або техногенного походження та регенерує їх до високотемпературного стану через зворотний термодинамічний цикл з використанням електромережевої енергії.

Такий комплексний підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність фототермальних систем та оптимізувати процеси перетворення відновлюваної сонячної енергії в теплову субстанцію.

Геліоколекторні системи дають можливість функціонувати в режимі максимальної термічної продуктивності практично впродовж цілого календарного року. У низькотемпературний період, коли фотоенергетичного потенціалу недостатньо для необхідного рівня термічної активації рідинного середовища, інтелектуальний контролер системи активує теплонасосний агрегат, який доводить температуру до попередньо заданих параметрів. Для компенсації піково-навантажувальних режимів може застосовуватися додатковий електротермічний перетворювач.

Існують гібридні фототермічні системи без теплоакумуючого резервуару, що дозволяють редукувати експлуатаційну вартість. Водночас такі інженерні рішення мають певні технологічні обмеження: складність синхронізації теплоносія в теплообмінних пристроях, необхідність ускладнення автоматизованої системи контролю та управління вимірною технікою і запірно-регулювальною арматурою. Паралельно набувають поширення альтернативні фото-біопаливні теплозабезпечувальні системи.

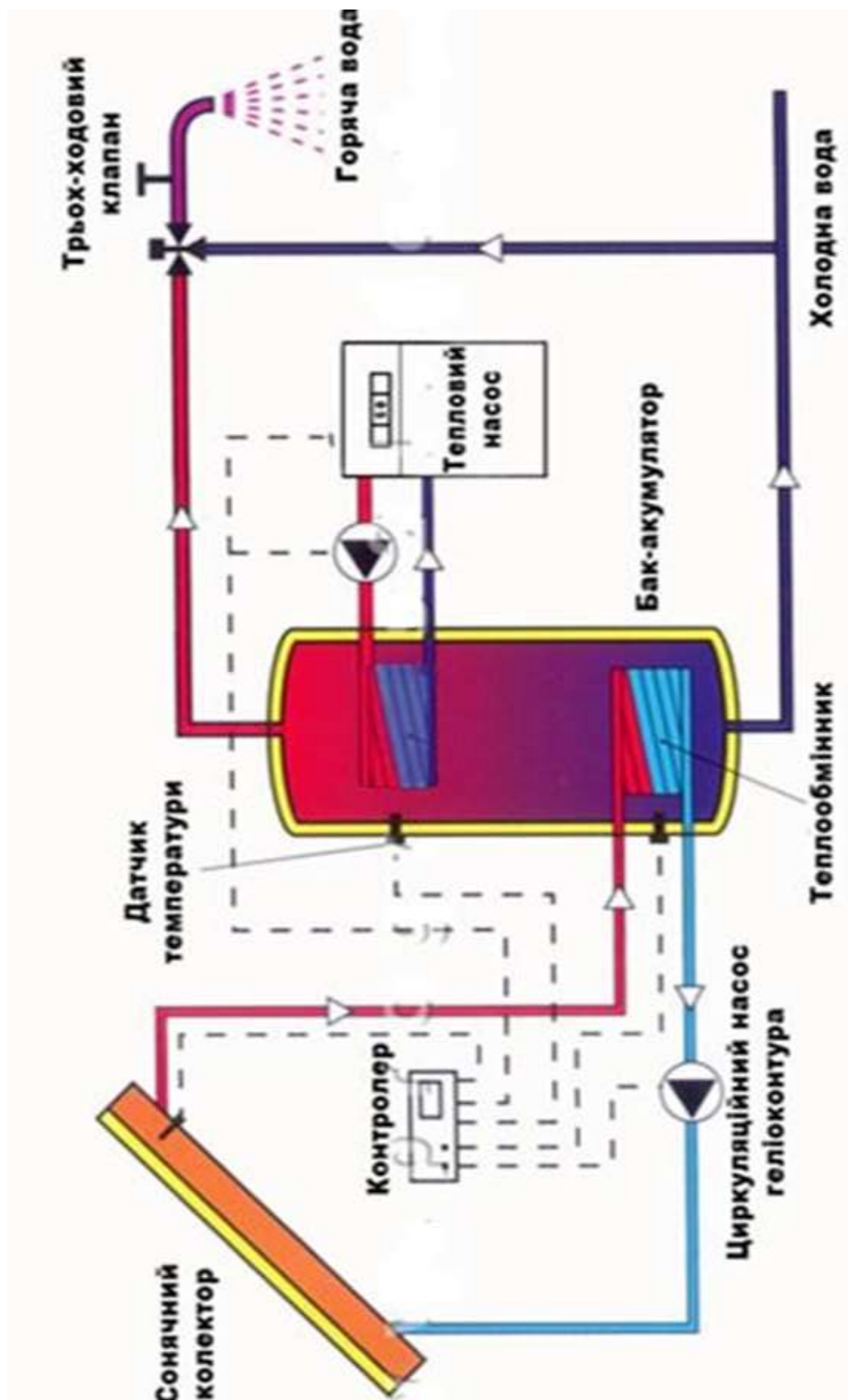


Рис. 1.8 Узагальнена схема комбінованої системи тепlopостачання

Широкого промислового впровадження набули комбіновані фотоенергетичні системи, побудовані на фотоперетворювальних модулях та фотоколекторних елементах – когенераційні фотоелектротермічні агрегати, які симультанно здійснюють трансформацію сонячної радіації в теплову та електричну субстанції. Базовими конструктивними елементами модульної системи виступають фотоелектрична панель, теплопоглинаючий пристрій, резервуар з тепловим агентом та світлопрозора захисна оболонка.

На сучасному інженерно-технічному етапі впроваджуються комбіновані фотоустановки з параболічними концентраторами потужністю 10-40 кВт. Коефіцієнт корисної дії таких фототехнологічних систем становить близько 27%, що перевищує функціональні характеристики традиційних фотоелектричних перетворювачів. Для виробництва фотоелементів застосовується надчистий кремній з високим рівнем хімічної чистоти.

Поширена система комбінованого фототермічного забезпечення, що базується на явищі стратифікації рідинного середовища. Об'єм теплоакumuлюючого резервуару умовно розділено на чотири секційні простори з уніфікованою довжиною теплообмінного елемента, інтегрованого безпосередньо в акумулюючий бак.

Принципова особливість розробки полягає у виключенні понаднормативних витрат теплоносія від фотоколекторного перетворювача, що суттєво підвищує загальну ефективність фототермічної системи. Науковцями запропоновано використання гібридних котелень, де в теплопостачальну систему інтегровано фотоустановки. За такого інженерного рішення для паливної інфраструктури потужністю 300 кВт впровадження фотоустановки потужністю 100-300 кВт забезпечує редукцію річного споживання природного газу на 64,7 тис. м³ та суттєве зменшення обсягу димогазових викидів.

Розроблені геотермальні фотосистеми, де джерелами термічної енергії слугують фотоколектор, теплонасосний агрегат та геотермальне джерело.

Застосування такої інтегрованої схеми гарантує стабільне теплозабезпечення інфраструктурних об'єктів в умовах варіативного дебету свердловин.

Геліоенергетичний потенціал також може бути використаний для холодозабезпечувальних систем, де термодинамічний цикл реалізується через сонячну радіацію. Існують абсорбційні охолоджувальні системи неперервної та періодичної дії. Проведені наукові дослідження демонструють, що розроблення спеціалізованих охолоджувальних систем на фотоенергетичній основі дозволяє знизити робочі температурні режими генератора та підвищити коефіцієнт корисної дії внаслідок оптимізації енергетичного транспортування від колектора до генератора.

3.6. Методологічні підходи до дослідження фотоколекторних систем

Сучасний науково-технічний прогрес налає широкий спектр методологічних підходів до вивчення фотоколекторних перетворювачів, які базуються на комплексі математичних моделей та теоретико-експериментальних концепціях.

Існують численні стандартизовані підходи до дослідження фотоколекторних систем та методик вимірювання фотоенергетичного потенціалу. Вітчизняна інженерна школа також розробила власні нормативно-технічні стандарти для випробування фотоперетворювальних установок.

Методологія дослідження фотоколекторів охоплює два магістральних напрямки: лабораторні та натурні випробування, які можуть реалізовуватися в стаціонарному та нестаціонарному режимах.

Стаціонарні дослідницькі методики плоских фотоколекторів традиційно ґрунтуються на класичній математичній моделі Хоттеля та інших. Принципова особливість цієї моделі полягає в нівелюванні впливу перехідних термодинамічних процесів нагрівання та охолодження на загальну ефективність фотоперетворювача.

Методологія передбачає визначення миттєвого коефіцієнта корисної дії фотоколектора через співвідношення його теплопродуктивності до густини фотопотоку в площині колекторної системи.

Запропоновані методології дають змогу здійснювати комплексну оцінку ефективності фотоколекторних перетворювачів з високим рівнем достовірності та технологічної обґрунтованості.

ККД сонячного теплового колектора визначається:

$$\eta = F' \left[(\tau\alpha) - \frac{U_L \cdot (T_m - T_3)}{S} \right] \quad (1.5)$$

де F' – коефіцієнт термічної ефективності фотопоглиняючої поверхні, що відображає інтенсивність теплообмінних процесів у фотоколекторному перетворювачі; $(\tau\alpha)$ – приведена інтегральна поглинаюча спроможність фотоколектора, яка визначає рівень трансформації сонячної радіації в теплову субстанцію; U_L – сумарний коефіцієнт теплових втрат, що вимірюється у $\text{Вт} \cdot \text{м}^2/\text{К}$ та характеризує термічні деградаційні процеси в фотоперетворювальній системі; T_m – середньомасова температура теплоносія, виражена в кельвінах, яка відображає інтенсивність внутрішньо-системних теплофізичних перетворень; T_3 – температура навколишнього середовища, що визначається у кельвінах та впливає на загальну ефективність фотоколекторної установки; S – густина фотопотоку, що вимірюється у $\text{Вт}/\text{м}^2$ та характеризує інтенсивність сонячного випромінювання.

$$\eta = F' (\tau\alpha) - \frac{a \cdot (T_m - T_3)}{S} - \frac{b \cdot (T_m - T_3)^2}{S} \quad (1.6)$$

Для комплексної оцінки ефективності фототехнічних систем визначення миттєвого коефіцієнта корисної дії (ККД) сонячних колекторів є критично важливим науково-технічним завданням. Експериментальні дослідження

передбачають застосування двох принципових методологічних підходів: лабораторного та натурного.

Лабораторна методика характеризується використанням спеціалізованого розрахункового апарату, де введено коригувальні коефіцієнти a і b , котрі комплексно відображають температурну залежність теплових втрат в фотоустановці. Математичний апарат дозволяє здійснювати точну оцінку енергетичних перетворень в фотоколекторі.

$$\eta = F'(\tau\alpha) - \frac{a \cdot (T_m - T_s)}{S} - \frac{b \cdot (T_m - T_s)^2}{S} \quad (1.7)$$

де a і b – уточнюючі коефіцієнти, що залежать від теплових втрат колектора від температури.

Основним критерієм оцінки результативності фотоколектора є інтегральний коефіцієнт корисної дії. Цей показник відображає співвідношення теплової продуктивності до обсягу сонячної енергії, що надходить на робочу поверхню фотоустановки.

Визначальними параметрами при розрахунках виступають: теплова потужність колектора, щільність сонячної радіації та площа теплопоглинальної поверхні. Такий методологічний підхід дозволяє здійснювати комплексну оцінку енергетичної ефективності фототехнічних перетворювачів з високим ступенем точності.

Показник ефективності сонячних колекторів визначається:

$$\eta = \frac{Q_k}{(E_k \cdot A)} \quad (1.8)$$

де Q_k – теплова потужність колектора, Вт; E_k – обсяг сонячної енергії, яка приходить на 1 м² площі поверхні колектора, Вт/м²; A – площа поверхні теплопоглинач в колекторі, м².

3.7. Аналіз інтеграції фотоенергетичних систем у архітектурно-будівельні конструкції

Комплексний аналіз інтеграції фотоенергетичних систем у архітектурно-будівельні конструкції виявляє низку суттєвих технічних та економічних викликів. Традиційні фотоколектори характеризуються високою вартістю, складністю виробничих процесів та обмеженою ефективністю перетворення сонячної радіації в теплову енергію.

Принципові обмеження класичних фототехнічних рішень полягають у геометричних та масових параметрах. Плоскі прямокутні поверхні великогабаритних колекторів створюють додаткове конструктивне навантаження та спричиняють складнощі архітектурної інтеграції в існуючу забудову.

Інноваційні інженерні рішення передбачають трансформацію елементів будівельних об'єктів – дахів, зовнішніх стін житлових, адміністративних, промислових споруд – на інтегровані фотоенергетичні системи.

Головна перевага таких конструктивних рішень полягає в комплексному енергетичному менеджменті. Багатофункціональні огороження забезпечують симультанне виконання низки технологічних завдань: акумуляцію сонячної радіації, утилізацію теплоти витяжного повітря, реалізацію процесів гарячого водопостачання, кондиціонування та теплоенергетичної підтримки.

Особливого поширення набувають інтегровані настінні фотоколектори, які синхронно виконують функції огорожувальних конструкцій та сонячних перетворювачів. Серед простих та ефективних технічних рішень – організація контрольованого пропускання теплоносія безпосередньо через поверхню даху.

Представлений підхід демонструє розвиток технологій в напрямку створення адаптивних, енергоощадних та технологічно досконалих архітектурно-будівельних систем, здатних максимально ефективно трансформувати сонячну енергію в корисну теплову потужність.

Ось перефразований текст з позиції інженера-енергетика:

Інноваційний фотопрофіль сучасних теплових колекторів представляє складну інженерну конструкцію (рис.1.8). Конструктивні особливості передбачають наявність спеціалізованої теплосприймальної поверхні, складної системи каналізації для рідинних та повітряних теплоносіїв та елементів міжмодульної фіксації.

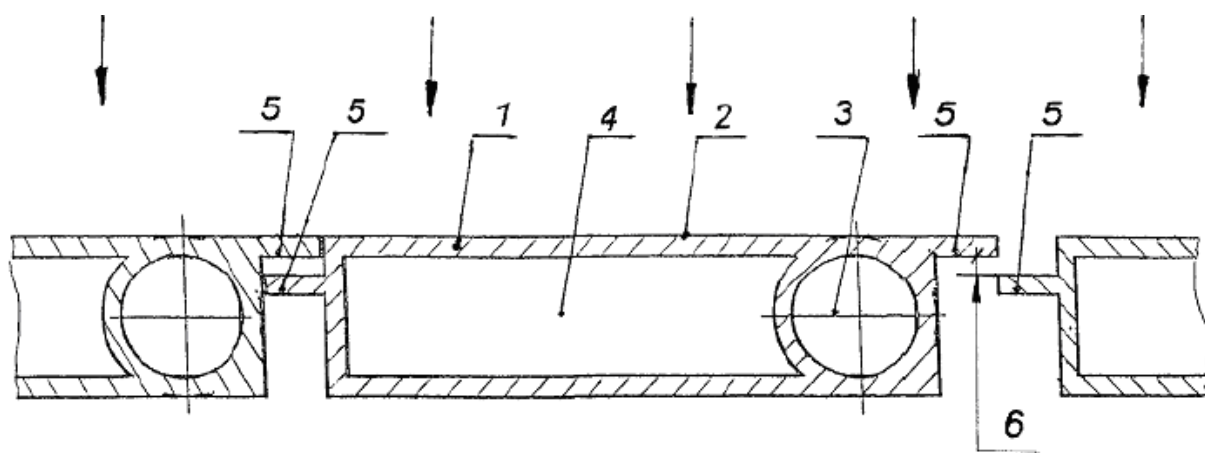


Рис. 1.8. Вид фотопрофілю у розрізі[66]:

1 – одиночний елемент фотопрофілю; 2 – теплопоглинальний шар; 3 – труба для теплоносія; 4 – порожнина з повітрям або область з теплоакумулювальною речовиною; 5 –кріплення

Принцип енергетичного перетворення базується на унікальній фізичній взаємодії елементів конструкції. Процес нагріву теплоносія відбувається внаслідок поглинання сонячної радіації спеціалізованою теплопоглинальною поверхнею. Теплова енергія трансформується через корпусний контур до теплоакумулювальної субстанції та безпосередньо до циркуляційних трубопроводних магістралей.

Особливістю є можливість акумуляції теплової енергії в проміжних середовищах. За відсутності прямої сонячної радіації система здатна підтримувати температурний режим завдяки попередньо накопиченому тепловому потенціалу теплоакумулювальної речовини.

Інтегрована конструкція забезпечує симультанне продукування теплової та електричної енергії. Впровадження систем повітряного та водяного охолодження фотоелектричних модулів суттєво підвищує загальну енергетичну ефективність фототехнічної системи.

Архітектурно-інженерна концепція передбачає максимальну адаптивність до існуючих будівельних конструкцій. Геліопрофіль може бути безпосередньо інтегрований у каркас споруди, що виключає додаткове навантаження на несучі елементи та розширює можливості архітектурного планування.

Найбільш перспективним напрямком вважається використання скатних покрівель, особливо металевих гофрованих поверхонь з південною орієнтацією. Висока теплопровідність металевого покриття забезпечує ефективну передачу акумульованої теплової енергії до циркуляційних контурів.

Запропоноване рішення дозволяє реалізувати автономні та комбіновані схеми теплопостачання з максимальною ефективністю використання сонячної радіації.

РОЗДІЛ 2

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Теоретичні дослідження комбінованої системи сонячного теплопостачання репрезентують фундаментальний науково-технічний підхід до вивчення складних термодинамічних процесів перетворення сонячної радіації в корисну теплову енергію. Представлена методологія базується на комплексному математичному моделюванні функціонування фотоенергетичної системи з інтегрованою фотопокрівлею.

Концептуальною особливістю дослідження є розробка аналітичного апарату, здатного всебічно описати процеси акумуляції, трансформації та дисипації теплової енергії в складних фототехнічних системах. Принципове завдання полягає у детальному теоретичному аналізі механізмів тепловіддачі за різних зовнішніх кліматичних умов, зокрема при варіативних швидкісних режимах повітряних потоків.

Методологія дослідження передбачає комплексний аналіз термоакумуляційних характеристик фотопокрівлі. Принципова мета полягає у встановленні закономірностей трансформації сонячної радіації в корисну теплову енергію з урахуванням складних фізико-технічних процесів тепломасообміну.

Запропонований науковий підхід створює теоретичне підґрунтя для подальшого вдосконалення фотоенергетичних технологій, зокрема в напрямку підвищення ефективності акумуляції та перерозподілу теплової енергії в складних інженерних системах.

2.1. Модель системи теплопостачання із фотопокрівлею

Математична модель енергетичного балансу фотопокрівлі являє собою складну функціональну залежність, що описує перерозподіл сонячної радіації між

різними енергетичними потоками. Ключовим методологічним підходом є декомпозиція сукупної сонячної енергії на складові компоненти: корисну теплову потужність та різноманітні канали теплових втрат.

Базове рівняння енергетичного балансу відображає фундаментальні закономірності перетворення фотоенергетичної системи. Воно інтегрально враховує: інтенсивність вхідного сонячного випромінювання, корисний тепловий потік, переданий теплоносію, сумарні теплові втрати через конвективні, радіаційні та кондуктивні механізми, а також акумульовану теплову потужність.

Енергетичний баланс фотопокрівлі визначається

$$Q_{\text{сон}} = Q_U + Q_L + Q_{\text{ак}} \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{сон}}$ – потужність сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню даху, Вт; Q_U – тепловий потік, переданий теплоносію в системі фотопокрівлі (корисно використана енергія); Q_L – теплові втрати фотопокрівлі в навколишнє середовище через конвекцію, випромінювання, а також теплопровідність через нижню та бічні стінки конструкції, Вт; $Q_{\text{ак}}$ – кількість тепла, накопичена баком-акумулятором, Вт.

Комплексна оцінка ефективності фотопокрівлі потребує глибокого аналізу енергетичних трансформацій та термоакумуляційних характеристик інтегрованої фототехнічної системи. Фундаментальним методологічним підходом є всебічне дослідження механізмів поглинання, перерозподілу та дисипації сонячної радіації в складних будівельно-енергетичних комплексах.

Первинним чинником акумуляції теплової енергії виступає інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню покрівельного матеріалу. Подальший перебіг термодинамічних процесів характеризується складною системою теплообміну, яка включає множинні канали трансферу та розсіювання теплової потужності.

Принципова схема теплоенергетичних перетворень передбачає послідовну декомпозицію сонячної радіації за різними фізичними механізмами. Зокрема, відбуваються процеси конвективного та радіаційного тепловідведення в навколишнє середовище, теплопередачі через теплопоглинальні контури та системи циркуляції теплоносія.

Додаткові канали теплових втрат включають дисипацію через теплоізоляційні шари, стінки теплоакумулювальних ємностей та комунікаційні трубопроводи. Визначальним чинником внутрішньосистемних теплообмінних процесів виступає температурний градієнт, що генерує природну циркуляцію теплоносія в контурах фотопокрівлі. Унікальність запропонованого інженерного рішення полягає в максимальній інтеграції фотоенергетичної системи в архітектурно-будівельну конструкцію. Завдяки використанню сучасних матеріалів та конструктивних рішень досягається вискоєфективний режим акумуляції корисної теплової енергії в спеціалізованих теплонакопичувачах.

Представлений науково-технічний підхід демонструє еволюційні тенденції розвитку фотоенергетичних технологій, створюючи теоретичне підґрунтя для розробки інноваційних систем сонячного тепlopостачання з максимальною енергетичною ефективністю.

Експериментальне дослідження фотоенергетичної системи базується на використанні типорозмірного технічного рішення, що максимально наближене до промислових стандартів фототехнічних колекторів. Принципові конструктивні параметри експериментальної установки репрезентують усереднені інженерні підходи до проектування сонячних теплоакумулювальних систем.

Геометрія дослідного зразка передбачає застосування циркуляційних трубопроводів з внутрішнім діаметром 25 мм, що є уніфікованим рішенням для широкого спектра фотоколекторних конфігурацій. Робоча площа експериментальної установки становить 0,2 м², що забезпечує коректність порівняльних досліджень.

Теплоакумулювальна ємність експериментальної системи розрахована з дотриманням галузевих нормативів – 77 літрів води на 1 м² колекторної поверхні. Такий підхід гарантує максимальну репрезентативність отриманих результатів відповідно до усталених технічних стандартів.

Системою теплоізоляції передбачено використання екструдованого пінопласту диференційованої товщини: 50 мм для бокових поверхонь та 100 мм під теплопоглинальним шаром. Додаткові трубопровідні комунікації захищені теплоізоляційним шаром товщиною 20 мм, що мінімізує непродуктивні тепловтрати.

Геометрія експериментальної установки враховує специфіку гофрованого покрівельного листа, що дозволяє моделювати надходження теплового потоку як на горизонтальні площини, так і на суміжні бокові грані під кутом 30°. Такий інженерний підхід максимально наближує лабораторні умови до реальних експлуатаційних режимів.

Крок між трубками циркуляційного контуру становить 75 мм, що повністю корелює з профілем гофрованого теплопоглинача та відповідає оптимальним параметрам, апробованим у різних типах фотоколекторів.

Параметри термодинамічного експерименту встановлені для типових літніх умов: початкова температура теплоносія – 13°C, температура навколишнього середовища – 20°C. Дослідження проводилося з урахуванням метеорологічних характеристик липня, що забезпечує максимальну репрезентативність отриманих результатів.

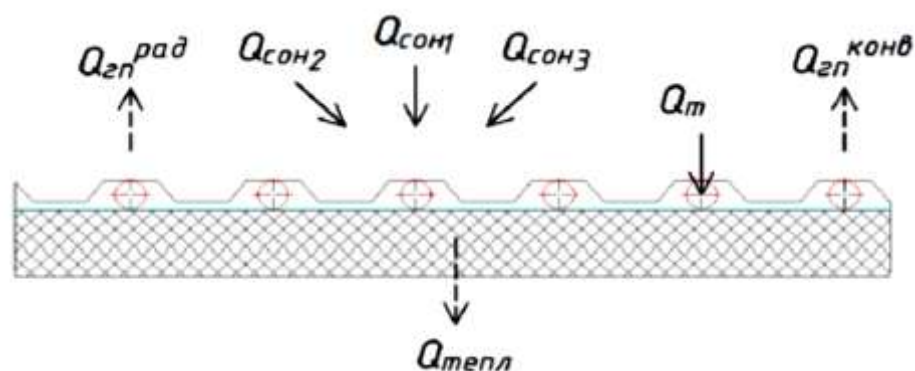


Рис. 2.1 Розподіл теплових потоків в сонячній тепловій покрівлі

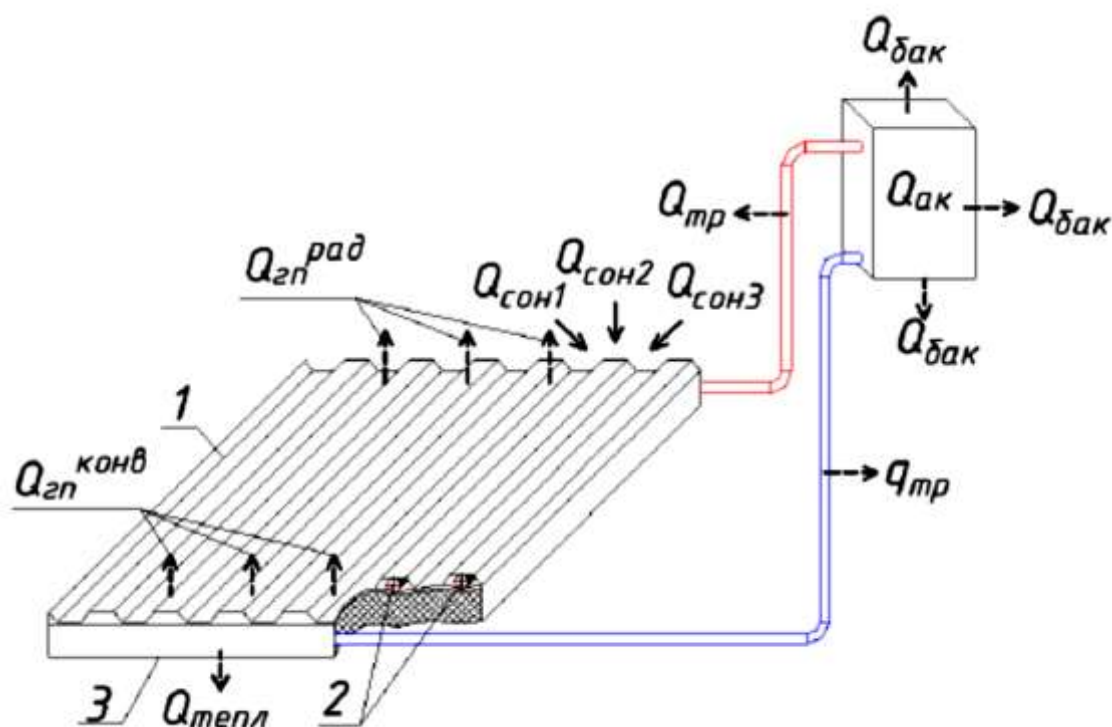


Рис. 2.2 Розподіл теплових потоків в системі теплової покрівлі
1- покрівля; 2- труби з теплоносієм; 3 – утеплюючий матеріал

Методологія дослідження передбачає низку спрощень, що принципово впливають на інтерпретацію експериментальних результатів. Ключовими виступають наступні фундаментальні припущення:

Температурний режим теплоносія в циркуляційному контурі фотопокрівлі розглядається як квазістаціонарний, тобто відносно незмінний у досліджуваному часовому інтервалі. Такий методологічний підхід дозволяє мінімізувати похибки при математичному моделюванні теплоенергетичних процесів.

Просторовий розподіл сонячної радіації приймається рівномірним по всій поверхні покрівельного матеріалу. Це принципове припущення створює теоретичне підґрунтя для коректної оцінки інтегральних теплоенергетичних характеристик фототехнічної системи.

Оптичні характеристики поверхонь фотопокрівлі розглядаються як константні та незалежні від спектральних параметрів сонячного випромінювання. Такий підхід суттєво спрощує математичний апарат дослідження, залишаючи його придатним для адекватної оцінки теплофізичних процесів.

Тепловтрати через бокові поверхні фотоконструкції вважаються мінімальними та такими, що не справляють суттєвого впливу на загальний енергетичний баланс системи. Це дозволяє зосередити увагу на принципових механізмах теплообміну.

Математична модель передбачає інтегральну оцінку сонячного теплового потоку з урахуванням особливостей геометрії гофрованого покрівельного листа. Розрахункова схема включає аналіз теплонадходжень як по горизонтальних, так і по похилих гранях конструктивних елементів.

Інтегральна оцінка сонячного теплового потоку:

$$Q_{\text{сон}} = h \cdot (F_1 I_{\text{в1}} + F_2 I_{\text{в2}} + F_3 I_{\text{в3}}) \quad (2.2)$$

де h – коефіцієнт поглинання енергії покрівельним матеріалом;

F_i – площа поглинання, м²; $I_{\text{в}}$ – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м².

Коефіцієнт поглинання енергії покрівельним матеріалом становить 0,98 [19].

Інтенсивність випромінювання сонця $I_{\text{в}}$, Вт/м², яке надходить на гофровану кривлю впродовж дня, з урахуванням прямої та розсіяної сонячної радіації визначається:

$$I_{\text{в}} = \int_0^{24} \left(G_b \cdot \cos \theta + \frac{G_d (1 + \cos \theta)}{2} \right) dt \quad (2.3)$$

де G_b , G_d – значення прямої та розсіяної сонячної радіації [5], Вт/м²; θ – кут між напрямком потоку випромінювання та перпендикуляром до площини теплопоглинач, °.

Часовий кут ω визначається:

$$\omega = \left(\frac{1}{15} \right) \cdot (t_{\text{solar}} - 12) = \left(\frac{1}{15} \right) \cdot (t_{\text{zone}} - 12) + \omega_{\text{eq}} + (\varphi - \varphi_{\text{zone}}) \quad (2.4)$$

де t_{sol} , t_{zon} – сонячні і декретні години, год; φ_{zon} – довгота Сонця у полудень ($t_{\text{sol}} = t_{\text{zon}}$), град; $\omega_{\text{eq}} = 0$ – поправний коефіцієнт, як правило приймається рівним 0.

Трансмісійні втрати теплоти від поверхні покрівельного матеріалу:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{конв}} = \alpha_{\text{гп}} \cdot F_{\text{гп}} \cdot (t_{\text{гп}} - t_3) \quad (2.5)$$

де $\alpha_{\text{гп}} = 5,8 + 11,6V$ – коефіцієнт тепловіддачі від матеріалу покрівлі до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $F_{\text{гп}}$ – площа фотопоглинача, м²; $t_{\text{гп}}$ – температура теплопоглинача, °С; t_3 – температура навколишнього середовища, °С; V – швидкість вітру на рівні покрівлі, м/с.

Втрати теплоти випромінюванням:

$$Q_{\text{гп}}^{\text{рад}} = \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}} \cdot c_0 \cdot F_{\text{гп}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{гп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.6)$$

де $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{гп}}$ – приведений ступінь чорноти матеріалу покрівлі; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·°С⁴) – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла; $T_{\text{н}}$ – температура небосхилу, °С; $T_{\text{гп}}$ – температура теплового поглинача, °С.

Ефективна температура небосхилу визначається:

$$t_{\text{н}} = 0,0552 \cdot t_3^{1,5} \quad (2.7)$$

Кількість теплоти, що передається до теплоносія

$$Q_{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гп}}} + \frac{\delta_{\text{гп}}}{\lambda_{\text{гп}}} + R_{\text{ІК}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в1}}}} \cdot l \cdot (t_{\text{гп}} - t_{\tau}) \quad (2.8)$$

де $\alpha_{\text{гп}}$, $\alpha_{\text{в1}}$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні фотопокрівлі та теплопоглинача до трубок з теплоносієм, Вт/(м²·К); $\delta_{\text{гп}}$ – товщина теплопоглинача, м; $\lambda_{\text{гп}}$ – коефіцієнт теплопровідності теплопоглинача, Вт/(м·К);

R_{lk} –термічний опір теплопередачі контуру циркуляції, $m \cdot K / W$. l – довжина трубопроводів;

Втрати теплоти через теплоізоляцію фотопокрівлі, W :

$$Q_{\text{тепл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{31}} + \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \cdot F_b \cdot (t_{\text{т}} - t_{\text{з}}) \quad (2.9)$$

Втрати теплоти в трубопроводах до баку-накопичувача:

$$Q_{\text{тр}} = l \cdot \frac{(t_{\text{т}} - t_{\text{з}})}{R_K} \quad (2.10)$$

де R_K –термічний опір теплопередачі труб

Втрати теплоти баком-накопичувачем, W :

$$Q_{\text{бак}} = K_{\text{бак}} \cdot F_{\text{бак}} \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{з}}) \quad (2.11)$$

де $K_{\text{бак}}$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції баку-акумулятора, $W/(m^2 \cdot K)$; $F_{\text{бак}}$ – площа баку-акумулятора, m^2 ; $t_{\text{бак_тепл}}$ – температура теплоносія, $^{\circ}C$.

Кількість енергії, що буде накопичена баком-акумулятором:

$$Q_{\text{ак}} = \frac{m \cdot c \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{п}})}{\tau} \quad (2.12)$$

Система рівнянь, що буде описувати теплофізичні процеси в системі теплового сонячного колектору представлена (2.13).

Теоретичне дослідження температурної динаміки фотоенергетичної системи базується на комплексному математичному моделюванні теплофізичних процесів у контурі фотопокрівлі. Розв'язання системи балансових рівнянь дозволило здійснити прецизійну реконструкцію термодинамічних перетворень у теплосприймальному контурі металевої поверхні.

$$\left\{ \begin{aligned}
 Q_{\text{сон}} &= h \cdot (F_1 I_{\text{в1}} + F_2 I_{\text{в2}} + F_3 I_{\text{в3}}) \\
 Q_{\text{гп}}^{\text{конв}} &= \alpha_{\text{гп}} \cdot F_{\text{гп}} \cdot (t_{\text{гп}} - t_3) \\
 Q_{\text{гп}}^{\text{рад}} &= \varepsilon_{\text{гп}}^{\text{гп}} \cdot c_0 \cdot F_{\text{гп}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{гп}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] \\
 Q_{\tau} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гп}}} + \frac{\delta_{\text{гп}}}{\lambda_{\text{гп}}} + R_{\text{лк}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в1}}}} \cdot l \cdot (t_{\tau} - t_3) \\
 Q_{\text{тепл}} &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{з1}}} + \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \cdot F_b \cdot (t_{\text{гп}} - t_{\tau}) \\
 Q_{\text{тр}} &= l \cdot \frac{(t_{\tau} - t_3)}{R_K} \\
 Q_{\text{бак}} &= K_{\text{бак}} \cdot F_{\text{бак}} \cdot (t_{\text{бак}} - t_3) \\
 Q_{\text{ак}} &= \frac{m \cdot c \cdot (t_{\text{бак}} - t_{\text{п}})}{\tau}
 \end{aligned} \right. \quad (2.13)$$

Методологія дослідження передбачає всебічний аналіз температурної еволюції теплоносія в умовах варіативної інтенсивності сонячної радіації. Принциповою особливістю дослідження є вивчення температурних трансформацій у період максимальної фотоактивності – з дев'ятої ранку до сьомої вечора.

Математичний апарат експериментальної моделі враховує складну кореляцію між інтенсивністю сонячного випромінювання, швидкісними характеристиками повітряних потоків та температурною динамікою теплоносія. Графічна інтерпретація результатів відображає нелінійні закономірності теплоенергетичних перетворень (рис. 2.3).

Ключовою методологічною інновацією виступає здатність моделі відтворювати фототехнічну систему з урахуванням множинних зовнішніх чинників. Особливу увагу приділено вивченню впливу вітрових навантажень на інтенсивність тепломасообмінних процесів.

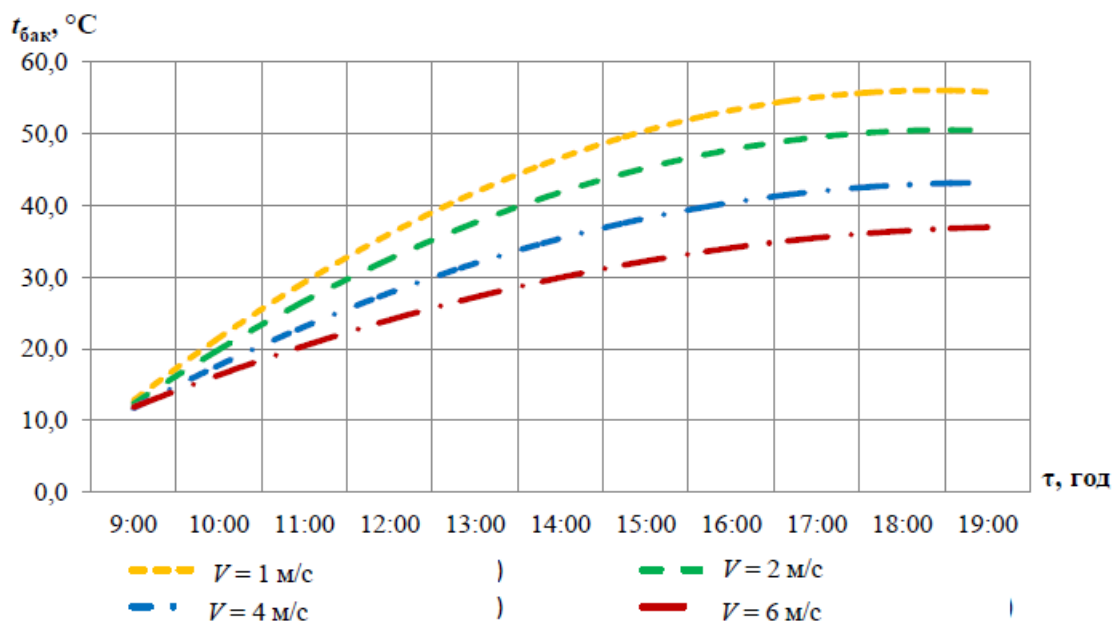


Рис. 2.2. Градація рідини в резервуарі-накопичувачі при зміні теплового струменя протягом світлового циклу та інтенсивності вітряного переміщення.

Застосовуючи показники досягненої температури в ємності-резервуарі, з'являється спроможність обрахувати обсяг акумульованого тепла технологічною системою постачання фотоустановкою та здійснити експертизу результативності її функціонування. Підсумки калькуляції питомого термічного потенціалу комплексу теплозабезпечення з фотопокриттям представлено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Денна кількість теплоти та енергетична ефективність системи сонячного теплопостачання

$\tau, \text{ год}$	$V = 1,5 \text{ м/с}$		$V = 2,5 \text{ м/с}$		$V = 3,5 \text{ м/с}$		$V = 4,5 \text{ м/с}$	
	$Q_{ак}, \text{ кДж/м}^2$	$\eta, \%$	$Q_{ак}, \text{ кДж/м}^2$	$\eta, \%$	$Q_{ак}, \text{ кДж/м}^2$	$\eta, \%$	$Q_{ак}, \text{ кДж/м}^2$	$\eta, \%$
9:00	0	63	0	53	0	39	0	29
10:00	2107		1474		621		452	
11:00	3912		3099		2003		1071	
12:00	6350		5293		3867		2655	
13:00	9118		7786		5986		4456	
14:00	10894		9383		7344		5611	
15:00	11767		10168		8012		6178	
16:00	12068		10440		8242		6373	
17:00	12249		10602		8380		6491	
18:00	12368		10710		8472		6569	
19:00	12368		10710		8472		6569	

У процесі комплексного інженерного дослідження теплоенергетичних характеристик фотосистеми встановлено низку принципових закономірностей функціонування теплоакумулювального обладнання. За умов помірної динаміки атмосферного переміщення повітряних мас (1-2 м/с) температурний режим теплоносія в накопичувальному резервуарі сягає критичної позначки 50-55°C, водночас при інтенсифікації вітрового потоку до 4-6 м/с спостерігається суттєве зниження температурних показників до діапазону 36-43°C.

Паралельно проведений розрахунково-аналітичний аналіз демонструє кореляційну залежність коефіцієнта корисної дії фотоустановки від швидкісних характеристик вітрового потоку. За помірних вітрових умов ККД сонячної системи теплопостачання коливається в межах 63-53%, тоді як при підвищеній вітровій активності технічні параметри знижуються до 39-29%. Відповідно, питома акумульована теплова енергія змінюється в діапазоні від 12376 до 10710 кДж/м² та від 8472 до 6569 кДж/м².

2.2. Аеродинамічний вплив на теплообмінні процеси фотоустановки

На результативність функціонування фотопокрівлі, крім інтенсивності сонячного потоку та тривалості опромінення, впливають додаткові чинники, серед яких для реальних умов експлуатації такої сонячної системи теплопостачання (ССТ) залишається маловивченим вплив вітрової динаміки.

Сучасні дослідження вітчизняних та закордонних науковців підтверджують критичну важливість врахування аеродинамічних характеристик при проектуванні фотоустановок. Зокрема, у фаховому виданні "Renewable Energy" представлено комплексне дослідження впливу вітрового навантаження на ефективність сонячних колекторів, де експериментально доведено зниження теплової продуктивності на 15-22% при швидкості вітру понад 4 м/с.

Особливої значущості набуває отримання кількісних параметрів щодо теплоенергетичної деградації поверхні фотопокрівлі в статичних умовах без

вітрового впливу та за умов різної інтенсивності атмосферного переміщення повітряних мас [4; 5]. Визначення та аналіз цих показників дозволить суттєво підвищити точність прогнозування теплотехнічних характеристик фотоустановок в натурних експлуатаційних режимах.

Комплексний аналіз математичного моделювання аеродинамічних процесів у фотоенергетичних системах виявив принципово важливу закономірність: навіть за умов помірної вітрової активності (швидкість повітряного потоку 2 м/с), коефіцієнт тепловіддачі фотопокрівлі зазнає суттєвого зростання - практично вдвічі від базового значення.

Сучасні дослідження вітчизняних та зарубіжних науковців підтверджують складність та багатофакторність впливу вітрового навантаження на теплоенергетичні характеристики фотоустановок.

Результати математичного моделювання слугують переконливим аргументом на користь необхідності проведення системних експериментальних досліджень, спрямованих на деталізацію впливу вітру на енергетичну ефективність фотопокрівлі в складних системах теплопостачання.

РОЗДІЛ 3

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ СОНЯЧНОЇ ПОКРІВЛІ

У межах представленого наукового дослідження розкрито методологічний апарат експериментальних випробувань, спрямованих на комплексне вивчення фотопокрівлі з варіативними конструктивними параметрами. Проведено детальну характеристику лабораторних та натурних дослідницьких комплексів, які включають фотоустановки з огороженням та без нього, з альтернативними просторовими схемами розташування теплоакумулювальних елементів у системі сонячного теплопостачання.

Основна мета науково-технічних випробувань полягала у виявленні закономірностей впливу визначальних чинників на енергетичну ефективність фотопокрівлі різної конструктивної модифікації.

3.1. Характеристика фотопокрівлі без захисту з трубковими теплообмінними елементами

Дослідницька установка представляє собою функціональний фрагмент фотопокрівлі, який включає:

- Джерела штучного випромінювання
- Накопичувальний теплоаккумулятор
- Спеціалізований вимірювальний інструментарій
- Систему з'єднувальних комунікацій

Структурну схему та фотографічну документацію експериментальної установки представлено на рисунку 3.1.

Збільшення робочої поверхні теплообміну на 25%

Розширення часового діапазону теплоаккумуляції в ранішні та передвечірні години завдяки нахиленим геометричним площинам

З метою максимізації теплопоглинальної здатності зовнішню поверхню гофрованого листа було пігментовано в інтенсивний чорний колір, що забезпечує оптимальне поглинання електромагнітного випромінювання.

Термодинамічний цикл передачі теплової енергії відбувається за наступною схемою: теплосприймальний елемент акумулює радіаційне випромінювання та трансформує його в теплову енергію, яка через систему циркуляційних трубок передається теплоносію. Завдяки виникненню температурного градієнта та відповідної різниці густинних характеристик теплоносія формується природна циркуляційна течія від фотоустановки до теплоаккумулятивного резервуара.

Для підвищення енергетичної ефективності фотопокрівлі впроваджено низку конструктивних рішень:

- Променевідбивний екран;
- Селективне покриття на зовнішній поверхні теплосприймача;
- Теплоізоляційний шар з пінополістирольного матеріалу товщиною 50 мм;

Комплекс реалізованих технічних заходів створює оптимальні умови для максимальної акумуляції та трансферу сонячної радіації через теплоносії.

З метою мінімізації тепловтрат у системі сонячного теплопостачання всі підвідні комунікації та накопичувальний резервуар обладнано теплоізоляційним захистом з використанням алюмінієвої фольги як променевого редуктора.

Джерелом штучного теплового випромінювання слугував побутовий інфрачервоний випромінювач Alf потужністю випромінювання: 300-1300 Вт/м²

Вимірювання інтенсивності енергетичного потоку здійснювалося актинометром з ціною поділки 0,5 калорій.

Методологічна підготовка експериментального дослідження передбачала формування спеціалізованого документального супроводження відповідно до розробленої методики та деталізованого плану досліджень. Провадився

прискіпливий контроль за параметрами експериментального середовища з метою мінімізації впливу зовнішніх дестабілізуючих чинників: несистемне сонячне випромінювання через світлопрозорі огороження, рівні відбивні поверхні, часткове затінення фотоперетворювача тощо.

Протокол передекспериментальної підготовки включав наступні обов'язкові процедури:

Повне заповнення системи свіжою порцією теплоносія

Деаерація внутрішньосистемного простору

Тестування герметичності при робочому тиску

Діагностика функціональної справності вимірювального інструментарію

У процесі експериментального дослідження здійснювалися інструментальні виміри наступних параметрів:

Інтенсивність енергетичного потоку

Температурні режими теплоносія:

На вхідній ділянці фотопокрівлі

На вихідній ділянці фотопокрівлі

У накопичувальному баці-акумуляторі (трьохточкові заміри по вертикалі)

Характеристики навколишнього повітря:

Температурний режим

Швидкісні параметри (вимірювання термоелектроанемометром TESTO 405 –

V1)

Завершальна стадія експерименту передбачала:

Деактивацію теплових випромінювачів

Припинення циркуляційних процесів

Повне зливання теплоносія

Повторне заповнення системи охолодженням теплоносієм

Науково-методичне забезпечення дослідження включало розроблення матриці повного факторного експерименту (ПФЕ) з урахуванням комплексної взаємодії визначальних чинників.

Принципово важливим аспектом дослідження визначено залежність теплопоглинальної здатності фотоколектора від динаміки зміни кута падіння теплового потоку впродовж світлового дня. Параметром оптимізації обрано коефіцієнт ефективності фотопокрівлі $K_{\text{еф}}$, що репрезентує кореляційний взаємозв'язок між варіативністю кута променевого впливу та загальною результативністю фотоенергетичної установки.

$$K_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{ак max}}}{Q_{\text{ак i}}} \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{ак max}}$ – теплова енергія, що накопичувалась в баку-акумуляторі при прямих кутах падіння теплового потоку; $Q_{\text{ак i}}$ – теплова енергія за інших кутів падіння теплового потоку.

Таблиця 3.1. Матриця планування експерименту

№		χ_0	α	β	$I_{\text{в}}$	$\alpha \beta$	$\alpha I_{\text{в}}$	$\beta I_{\text{в}}$	$\alpha \beta I_{\text{в}}$	$K_{\text{еф}}$
1		+	-	+	-	+	-	+	-	0,21
2		+	+	+	+	-	-	-	+	0,28
3		+	-	-	+	-	-	-	+	0,42
4		+	+	-	-	+	-	+	-	0,49
5		+	-	-	+	+	+	+	+	0,35
6		+	+	-	-	-	+	-	-	0,49
7		+	-	+	-	-	+	-	-	0,77
8		+	+	+	+	+	+	+	+	1,00

Аналітичне узагальнення експериментальних досліджень фототеплової системи репрезентовано просторовою тривимірною графічною інтерпретацією результатів вимірювань за умов варіативної інтенсивності теплового потоку - 300 та 950 Вт/м² представлена на рисунку 3.2.

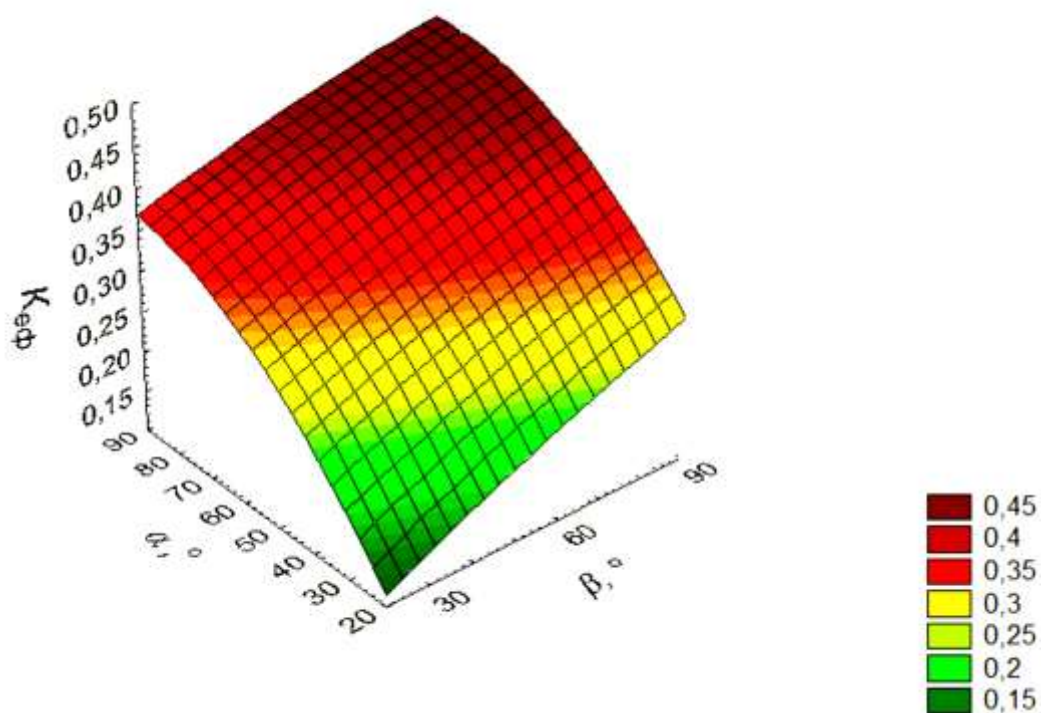


Рис. 3.2. Ефективність фотопокрівлі при інтенсивності теплового потоку
 $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$

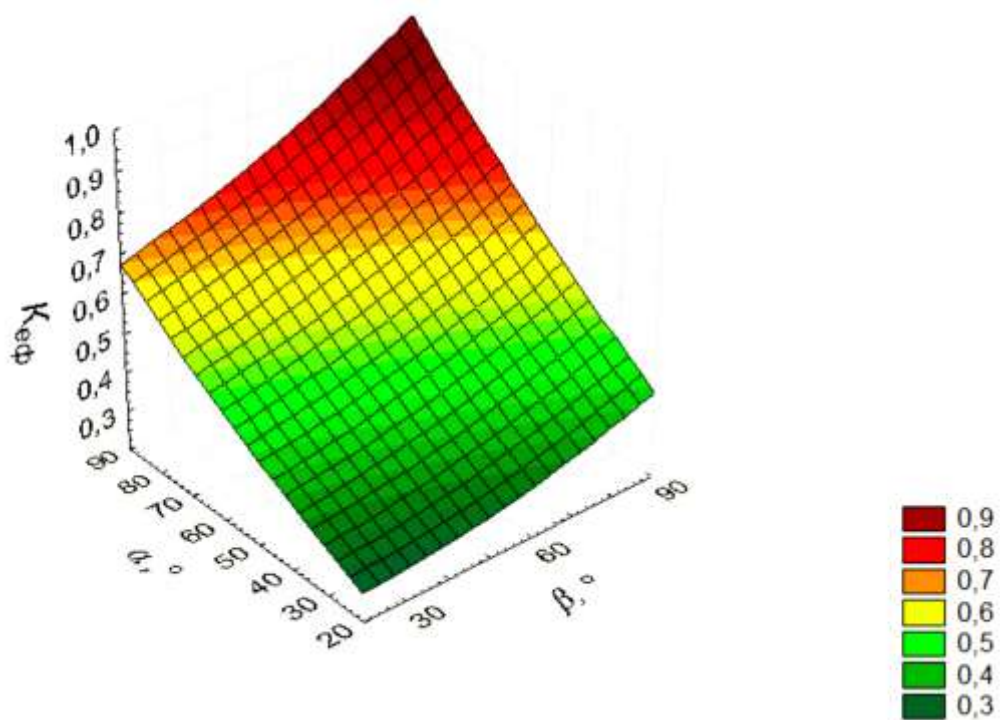


Рис. 3.3. Ефективність фотопокрівлі при інтенсивності теплового потоку
 $I_B = 950 \text{ Вт/м}^2$

На основі аналізу даних, отриманих в експериментальних дослідженнях, представлених на рис. 3.2-3.3, можна зробити висновок, що продуктивність фотопокрівлі без захисного шару в системі теплопостачання з природною циркуляцією знижується на 65% при зміні кутів падіння від 90° до 30° .

Залежність коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із фотопокрівлею зображено на рис. 3.4.

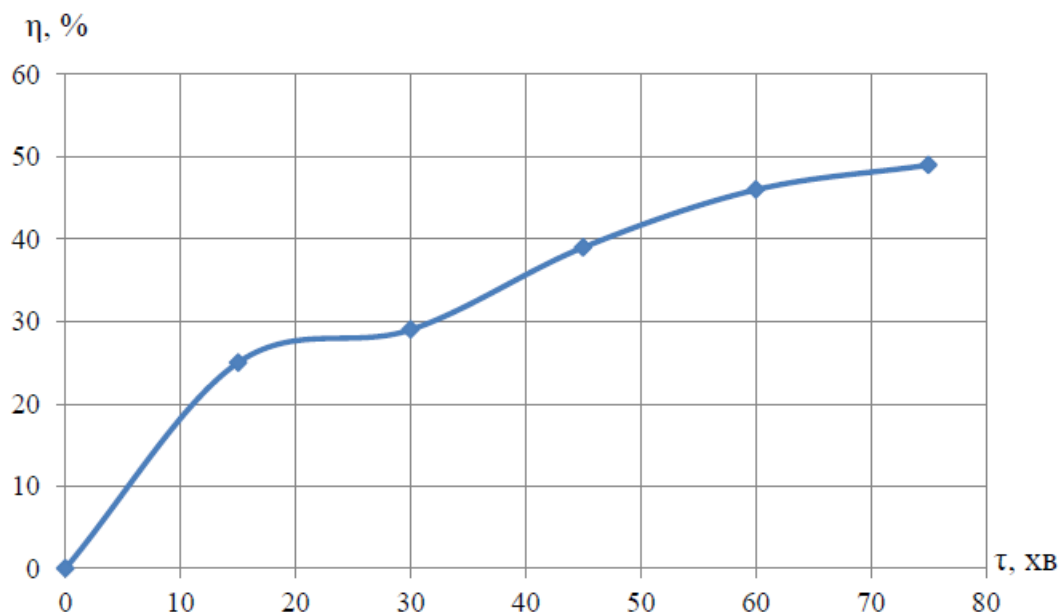


Рис. 3.4. Залежність ККД фотопокрівлі без покриття за інтенсивності теплового потоку $I_b = 600 \text{ Вт/м}^2$

З графіку на рис. 3.4 видно, що ККД фотопокрівлі системи сонячного теплопостачання змінюється від 26% до 48%. При цьому усереднене значення ККД запропонованої фотосистеми становить 39%.

У результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії, що має вид:

$$K_{\text{еф}} = 0,48 + 0,07\alpha + 0,17\beta + 0,15I_b + 0,02\alpha\beta + 0,03\alpha I_b + 0,07\beta I_b + 0,02\alpha\beta I_b \quad (3.2)$$

На основі аналізу регресійних коефіцієнтів можна стверджувати, що ключовий вплив на характер функції відгуку має фактор x_2 (кут між поверхнею теплопоглинача та напрямком проекції теплового потоку у вертикальній площині фотопокрівлі β , і x_3 (інтенсивність теплового потоку I_T). Водночас фактор x_1 (кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині фотопокрівлі α , впливає менше.

На основі експериментальних даних побудовано номограму (рис. 3.5), яка відображає залежність коефіцієнта ефективності фотопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі тепlopостачання K_{ef} від кутів падіння теплового потоку α і β , а також інтенсивності теплового потоку I_T .

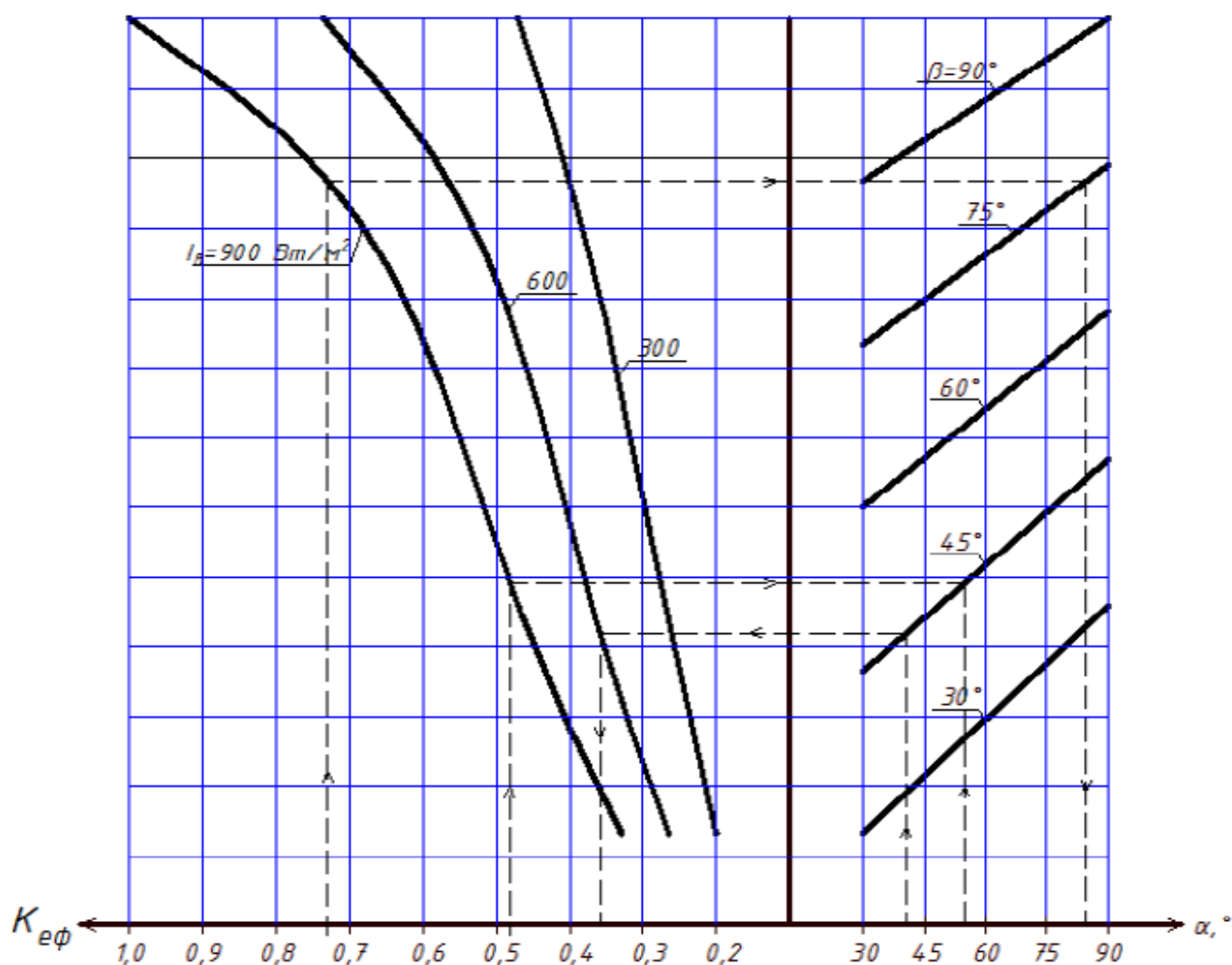


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнту ефективності фотопокрівлі системи тепlopостачання від кутів та інтенсивності теплового потоку.

Графічні залежності, що представлені на рис. 3.5 апроксимуються залежністю:

$$K_{\text{e}\phi} = \left(\begin{aligned} &(513 + 0,458 \cdot I_{\text{B}}) + (22 + 0,038 \cdot I_{\text{B}}) \cdot \beta + 12 \cdot \alpha + \\ &+ (-0,019 + 6,389 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{B}}) \cdot \beta \cdot \alpha \end{aligned} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.3)$$

Аналітичне узагальнення експериментальних досліджень фототеплової системи репрезентовано просторовою тривимірною графічною інтерпретацією результатів вимірювань за умов варіативної інтенсивності теплового потоку - 300 та 950 Вт/м² представлена на рисунку 3.6.

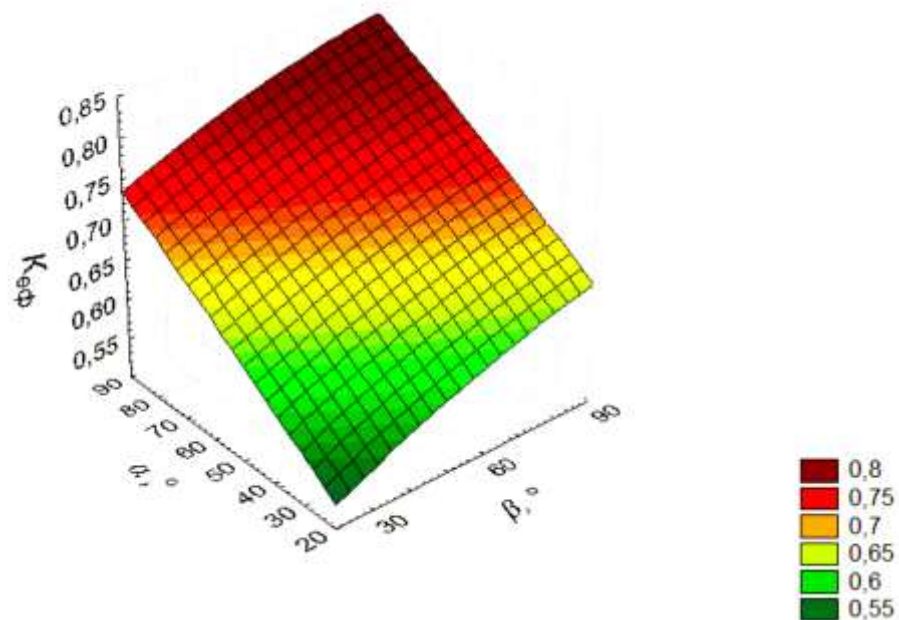


Рис. 3.6. Ефективність фотопокрівлі при інтенсивності теплового потоку
 $I_B = 300 \text{ Вт/м}^2$

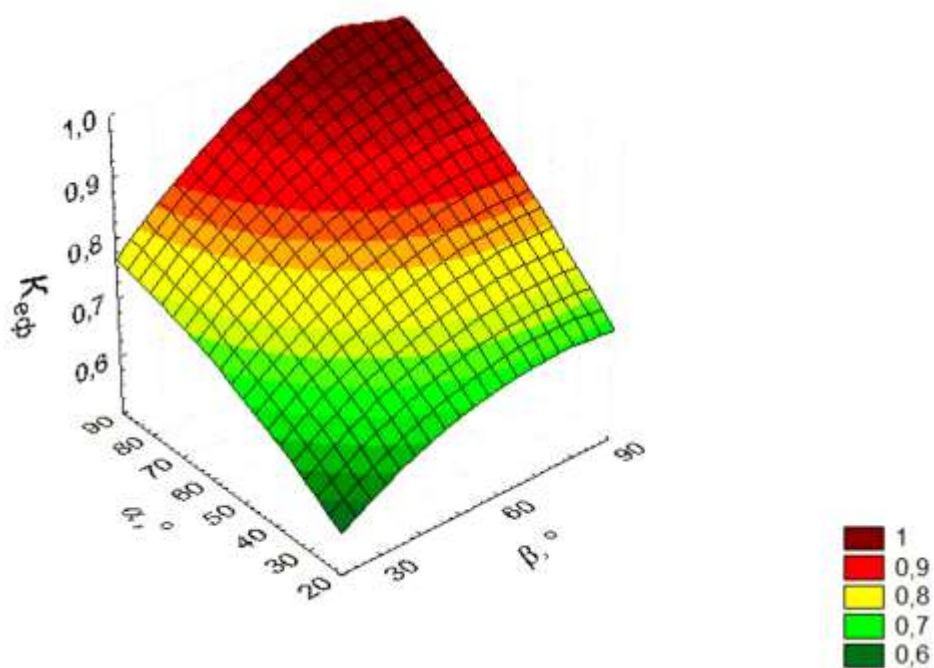


Рис. 3.7. Ефективність фотопокрівлі при інтенсивності теплового потоку
 $I_B = 950 \text{ Вт/м}^2$

На основі аналізу даних, отриманих в експериментальних дослідженнях, представлених на рис. 3.6-3.7, можна зробити висновок, що продуктивність фотопокрівлі без захисного шару в системі теплопостачання з природною циркуляцією знижується на 61% при зміні кутів падіння від 90° до 30° .

Залежність коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із фотопокрівлею зображено на рис. 3.8.

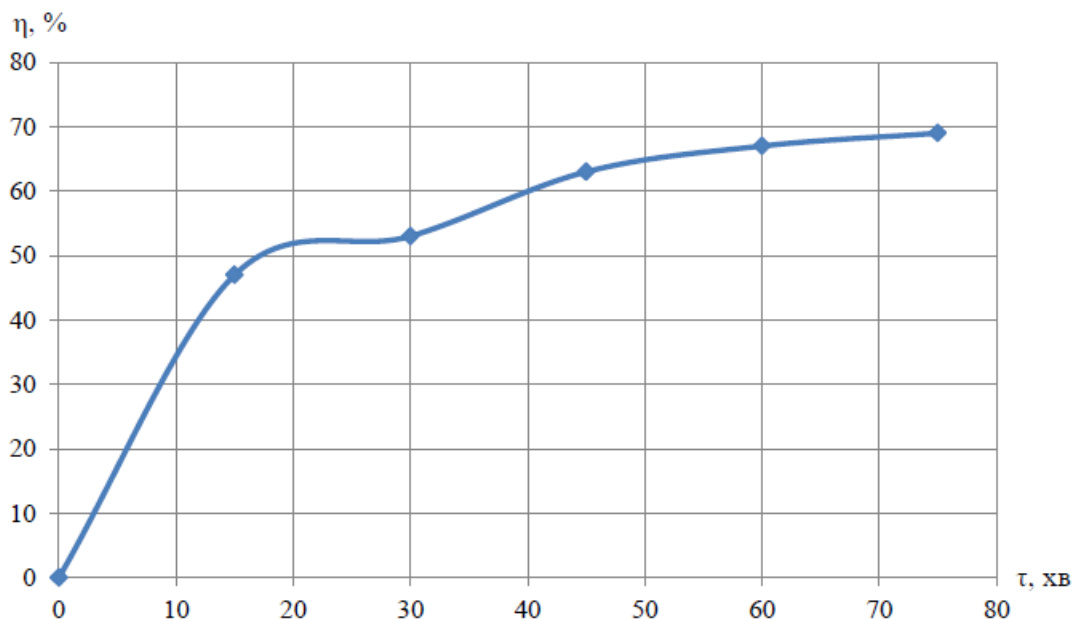


Рис. 3.8. Залежність ККД фотопокрівлі без покриття за інтенсивності теплового потоку $I_b = 600 \text{ Вт/м}^2$

З графіку на рис. 3.8 видно, що ККД фотопокрівлі системи сонячного теплопостачання змінюється від 46% до 71 %. При цьому усереднене значення ККД запропонованої фотосистеми становить 61 %.

У результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії, що має вид:

$$K_{\text{еф}} = 0,761 + 0,054\alpha + 0,091\beta + 0,051I_b + 0,009\alpha\beta + 0,009\alpha I_b + 0,011\beta I_b + 0,014\alpha\beta I_b \quad (3.2)$$

На основі аналізу регресійних коефіцієнтів можна стверджувати, що ключовий вплив на характер функції відгуку має фактор x_2 (кут між поверхнею теплопоглинача та напрямком проекції теплового потоку у вертикальній площині фотопокрівлі β , і x_3 (інтенсивність теплового потоку I_v . Водночас фактор x_1 (кут між поверхнею теплопоглинача та проекцією напрямку теплового потоку у горизонтальній площині фотопокрівлі α , впливає менше.

На основі експериментальних даних побудовано номограму (рис. 3.9), яка відображає залежність коефіцієнта ефективності фотопокрівлі без прозорого покриття у гравітаційній системі тепlopостачання K_{ef} від кутів падіння теплового потоку α і β , а також інтенсивності теплового потоку I_v .

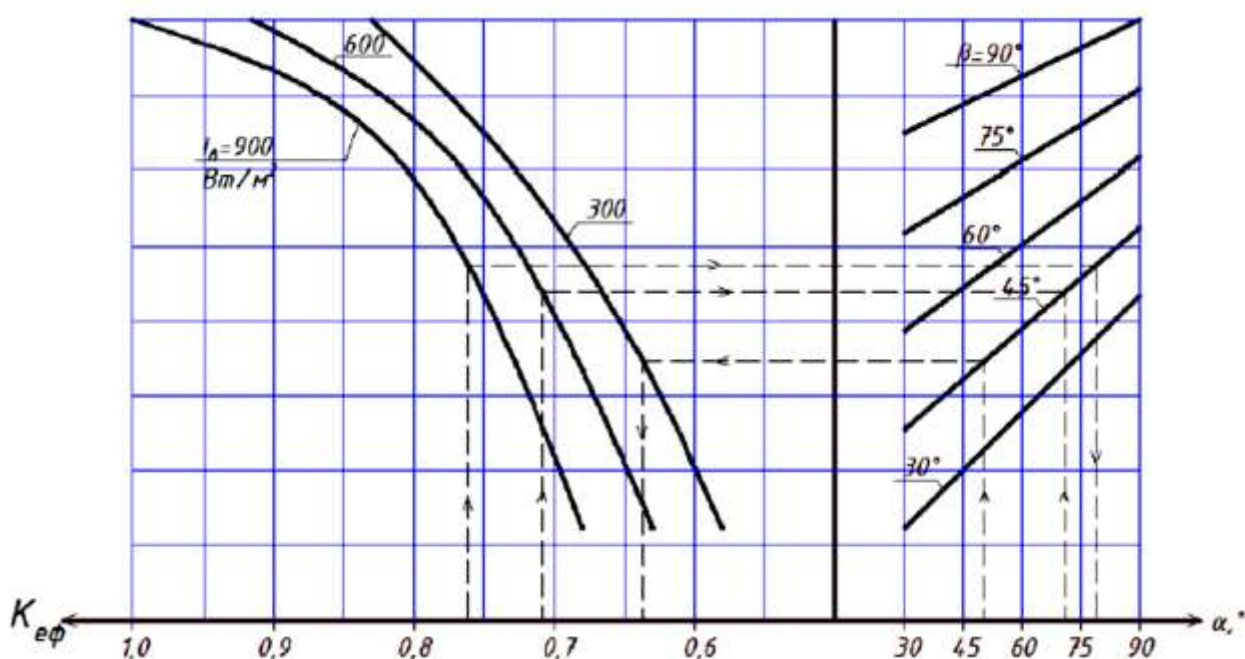


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнту ефективності фотопокрівлі системи тепlopостачання від кутів та інтенсивності теплового потоку.

Графічні залежності, що представлені на рис. 3.9 апроксимуються залежністю:

$$K_{ef} = \left((3625 + 3 \cdot I_v) + (37 - 0,022 \cdot I_v) \cdot \beta + (27 - 0,025 \cdot I_v) \cdot \alpha + (-0,233 + 5,556 \cdot 10^{-4} \cdot I_v) \cdot \beta \cdot \alpha \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.3)$$

3.3. Аналіз результатів ефективності фотопокрівлі в сонячній системі теплопостачання

На основі аналізу змін коефіцієнта корисної дії (ККД) систем теплопостачання з різними типами конструкцій фотопокрівлі, представлених на рис. 3.10, отримано наступні результати.

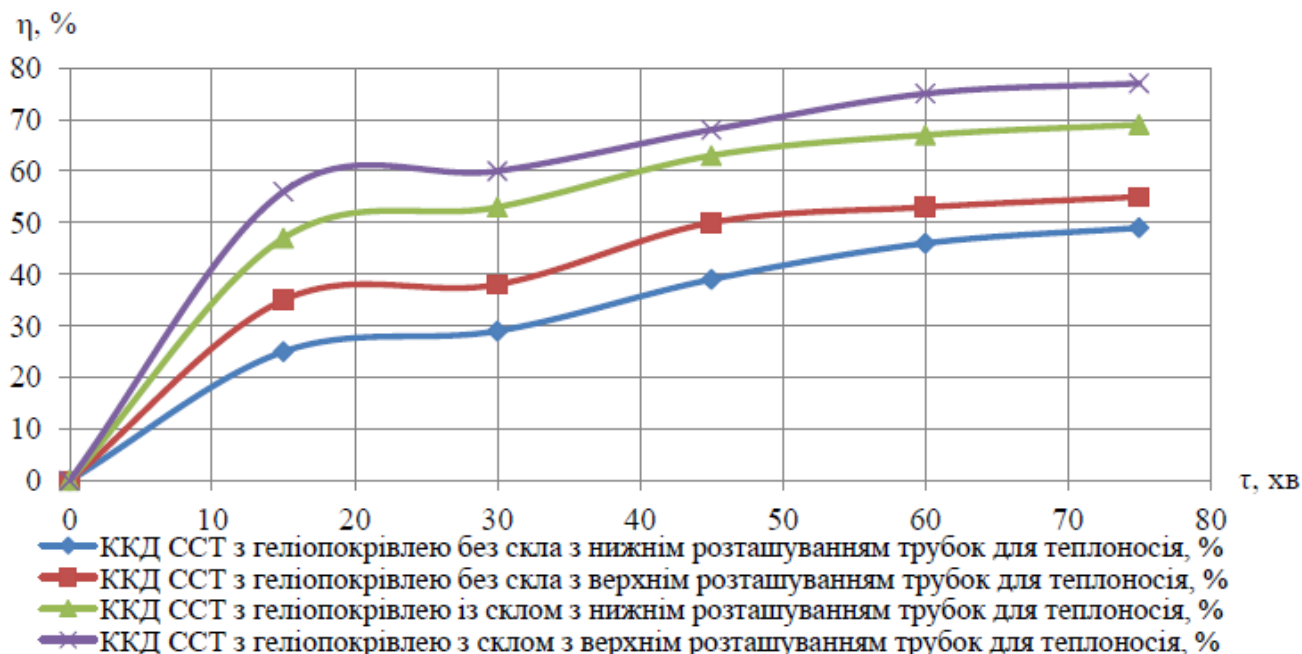


Рис. 3.10 Зміна коефіцієнта корисної дії фотопокрівлі в системі теплопостачання

Ефективність фотопокрівлі, що має прозоре покриття, виявилася в середньому на 21-26% вищою порівняно з ефективністю аналогічної конструкції без прозорого покриття. Крім того, ККД системи сонячного теплопостачання (ССТ) із фотопокрівлею, в якій трубки для теплоносія розташовані у верхній частині конструкції, перевищує ККД ССТ із нижнім розташуванням трубок на 9-11%.

Найвищий ККД серед досліджуваних систем має фотопокрівля із прозорим покриттям і верхнім розташуванням трубок циркуляційного контуру теплоносія, середнє значення якого становить 69%. З огляду на ці результати подальші дослідження та розрахунки виконувалися саме для фотопокрівлі з верхнім розташуванням трубок теплоносія.

РОЗДІЛ 4

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД СИСТЕМ СОНЯНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Представлений розділ присвячується розробці напрямків потенційного впровадження результатів наукового дослідження, реалізованих у випускній роботі, та встановленню економічної результативності застосування фотоогороджувальної конструкції у системі сонячного теплозабезпечення.

Запропоновано інноваційні схемотехнічні рішення ССТ з інтеграцією фотоогороджувальної конструкції. Розроблено авторську методологію калькуляції параметральних характеристик фототехнічної системи сонячного теплопостачання з фотоогороджувальним елементом.

Презентовано комплексне техніко-економічне обґрунтування впровадження диверсифікованих фототехнічних систем теплозабезпечення з фотоогороджувальними конструкціями. Детерміновано період амортизації фотоогороджувальної конструкції в контурі фототехнічної системи теплозабезпечення.

4.1. Характеристика та функціональний принцип ССТ

Традиційний плоский фотоколекторний модуль характеризується підвищеною вартістю та конструктивною складністю. З огляду на технічні обмеження, запропоновано інноваційне інженерне рішення - фотоогороджувальну конструкцію, інтегровану безпосередньо в покрівельну систему будівлі.

Принципова особливість запропонованої фототехнічної системи полягає в застосуванні гофрованого покрівельного матеріалу як конструктивного елементу фотоколектора. Це технічне рішення дозволяє оптимізувати економічні показники, підвищити експлуатаційну надійність та спростити архітектуру фотоперетворювального обладнання.

Конструктивна схема фотопокрівлі передбачає наявність верхнього та нижнього гофрованих покриттів, між якими розташовано трубний контур циркуляційної системи. Трубні елементи жорстко фіксуються до верхнього покриття та інтегруються з патрубковою системою подачі теплоносія.

Технологічні особливості включають нанесення селективного матеріалу на внутрішню поверхню верхнього гофрованого покриття та дзеркального шару на внутрішню поверхню нижнього покриття. Додатково передбачено теплоізоляційний шар для мінімізації теплових втрат.

Функціональний механізм фотоогороджувальної конструкції базується на фізичних принципах перетворення сонячної радіації в теплову енергію. Сонячне випромінювання потрапляє на зовнішню поверхню верхнього гофрованого покриття, де селективний матеріал забезпечує максимальне поглинання теплової енергії з мінімальним рівнем відбиття.

Теплова енергія акумулюється покрівельним матеріалом та передається через трубки циркуляційного контуру, в яких рухається теплоносій. Завдяки температурному градієнту виникає природня циркуляція, що дозволяє транспортувати нагрітий теплоносій до системи споживання.

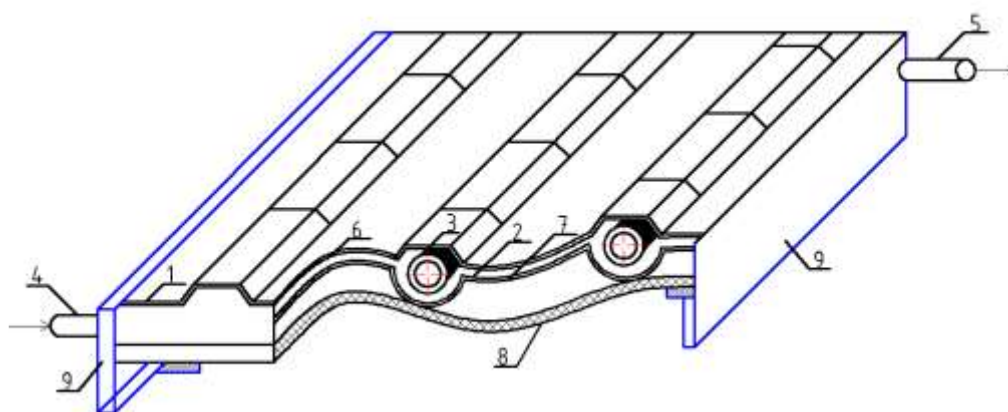


Рис. 4.1. Схема фотопокрівлі з двома гофрованими покриттями

Інноваційним елементом конструкції є дзеркальний шар, який відбиває частину сонячного випромінювання, зокрема інфрачервоний спектр, назад у

систему. Це принципово підвищує ефективність перетворення сонячної енергії порівняно з традиційними фотоколекторними системами.

Запропонована фототехнічна конструкція забезпечує практично повне утилізування теплової енергії сонячного випромінювання. Впроваджений теплоізоляційний шар виконує критичну функцію мінімізації тепловтрат у навколишнє середовище, що підвищує загальну енергетичну ефективність фотосистеми.

Принципова інженерна інновація полягає в унікальному просторово-конструктивному рішенні розміщення трубного контуру теплоносія над геометризованим поглиначем сонячної радіації. Гофрована конфігурація теплопоглинальної поверхні детермінує суттєве збільшення площі абсорбції сонячної енергії, що призводить до підвищення коефіцієнта корисної дії фототехнічної системи.

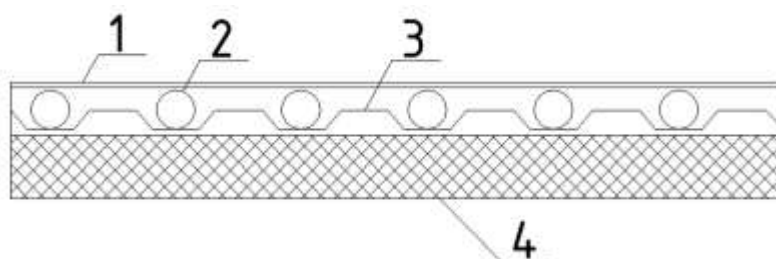


Рис. 4.2. Схема фотопокрівлі з теплопровідними трубками над теплопоглиначем

Функціональний механізм фотопокрівлі базується на фундаментальних фізичних принципах перетворення електромагнітного сонячного випромінювання в теплову енергію. Сонячна радіація через прозору оболонку потрапляє безпосередньо на структуровану поверхню теплопоглиначя та інтегровані трубні елементи теплообмінного контуру.

Внаслідок абсорбції сонячного випромінювання відбувається інтенсивний нагрів робочих поверхонь. Температурний диференціал ініціює природню циркуляцію теплоносія, що забезпечує ефективний теплоенергетичний трансфер від фотоперетворювача до споживача теплової енергії.

Додатковим конструктивним елементом оптимізації теплоенергетичних процесів слугує теплоізоляційний шар, який мінімізує променисті та конвективні тепловтрати, підвищуючи загальну термодинамічну ефективність фототехнічної системи.

Представлене інженерне рішення демонструє високий потенціал раціонального використання фотоенергетичних ресурсів шляхом комплексної інтеграції конструктивних та теплофізичних характеристик фотоперетворювача.

4.2. Техніко-економічні порівняння ефективності використання фотопокрівлі та сонячних колекторів

Інноваційна концепція фотоогороджувальної конструкції передбачає інтеграцію теплопоглинального матеріалу безпосередньо в покрівельну систему будівлі. Це унікальне технічне рішення забезпечує комплексну оптимізацію фототехнічної системи шляхом:

- Редукції економічних витрат на обладнання
- Підвищення експлуатаційної надійності конструкції
- Спрощення архітектонічної схеми фотоперетворювача

Функціональна особливість фотопокрівлі полягає в максимально ефективному використанні теплоакумулювальних властивостей покрівельного матеріалу, що дозволяє трансформувати традиційну огороджувальну конструкцію на активний енергетичний елемент будівлі.

Системні обмеження фотоустановок чітко проявляються в холодний період року. За умов низьких температурних показників зовнішнього середовища та мінімальної інтенсивності сонячної радіації фотоперетворювачі демонструють недостатню автономність у забезпеченні потреб гарячого водопостачання.

З огляду на технологічні особливості, раціональним інженерним рішенням є створення гібридних теплоенергетичних систем. Запропонована концепція комбінованих фототехнічних систем демонструє високу конкурентоспроможність відносно традиційних схем теплозабезпечення. Економічна ефективність

досягається завдяки раціональному поєднанню відновлюваних та традиційних джерел енергії.

Для проведення об'єктивного техніко-економічного аналізу обрано експериментальний об'єкт - двоповерховий громадський будинок, розташований у м. Кропивницькому. Методологія дослідження передбачає порівняльний аналіз фотопокрівлі та класичних сонячних колекторів за інтегральними показниками ефективності.

Тепловий потік на гаряче водопостачання, Вт:

$$Q_{hm} = 1,163 \cdot q_T^h \cdot \rho_t \cdot (55 - t_c) \cdot (1 + k^t) \quad (4.1)$$

де q_T - середня годинна витрата гарячої води за добу, м³/год, ρ_t - густина нагрітої води; k_t - коефіцієнт тепловтрат в трубопроводах ГВП.

Середня годинна витрата гарячої води за добу, м³/год:

$$q_T^h = \frac{q_{um}^h \cdot U}{24 \cdot 1000} \quad (4.2)$$

де q_{um} – норма витрати гарячої води на 1 особу за добу, м³/год,

Теоретична кількість осіб, що постійно перебувають у будинку:

$$U = \frac{F_{\text{заг}}}{f_3} \cdot n \quad (4.3)$$

де $F_{\text{заг}}$ - загальна площа громадського будинку, м²; f_3 - норма площі на одну, м²/людину; n – кількість поверхів будівлі.

Імовірність використання водорозбірних приладів визначалась за формулою:

$$P = \frac{q_{hr,u}^h \cdot U}{3600 \cdot q_0^h \cdot N} \quad (4.4)$$

де $q_{hr u}$, – максимальна витрати гарячої води однією людиною за годину; q_0 – секундна витрата гарячої води однією точкою водорозбору.

Проведено комплексне дослідження теплоенергетичного навантаження системи гарячого водопостачання громадської будівлі. Базові параметри дослідження включають:

Теплове навантаження: $Q = 1,73$ кВт

Частка сонячної енергії: 60% від загального теплового навантаження

Акумуляована річна фотоенергетична потужність: $Q = 33$ ГДж/рік

Дослідження передбачає порівняльний аналіз трьох альтернативних фототехнічних систем гарячого водопостачання:

1. Перший варіант: Німецька фотосистема Viessmann «Vitosol 100F» - Колектори Viessmann: 15,07 м²

2. Другий варіант: Вітчизняна фотосистема Atmosfera «SPK-F2 Plus» - Колектори Atmosfera: 16,18 м²

3. Третій варіант: Інноваційна фотопокрівля - Геліопокрівля: 20,0 м²

Розрахункові параметри фототехнічних систем для забезпечення навантаження 2,9 кВт:

Економічний аналіз базується на визначенні приведених річних витрат станом на жовтень 2024 року. Курс валют зафіксовано на позначці 41,3 грн/долар.

Критерій оптимізації - мінімізація приведених річних витрат. Порівняльний аналіз дозволить ідентифікувати найбільш раціональне технічне рішення в контексті співвідношення "ціна-якість".

Приведені річні затрати на варіанти теплопостачання:

$$\Pi = C + E_n \cdot K \quad (4.5)$$

де C - експлуатаційні річні затрати, тис. грн/рік; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень: $E_n = 0,12$, 1/рік; K – капітальні затрати на систему сонячного теплопостачання, тис.

грн.

Капітальні затрати K на впровадження системи сонячного теплопостачання:

$$K_i = (C_k + C_{об} + C_d + C_m) \cdot A + C_{ак} \cdot V \quad (4.6)$$

де C_k – питома вартість сонячного колектора грн/м²; $C_{ак}$ – питома вартість баку-накопичувача, грн/м³; $C_{об}$ – вартість допоміжного обладнання, грн/м²; C_d – вартість доставки, грн/м²; C_m – вартість монтажу, грн/м²; A – розрахункова площа сонячних колекторів, м²; V – об'єм баку-накопичувача, м³.

Капітальні затрати на ГВП з використанням сонячних колекторів фірми Viessmann: «Vitosol 100F» становлять $K_1 = 110$ тис.грн., фірми Atmosfera: «SPK-F2 Plus» $K_2 = 90$ тис.грн., а вартість системи ГВП з використанням фотопокрівлі $K_3 = 60$ тис.грн.

Річні експлуатаційні затрати визначались за формулою:

$$C = A + P + I + Z \quad (4.7)$$

де A – амортизаційні відрахування, тис. грн/рік; P – затрати на поточний ремонт, тис. грн/рік; I – інші затрати, тис. грн/рік, Z – заробітна плата обслуговуючого персоналу, тис. грн/рік;

Сумарні відрахування на амортизацію, капітальний ремонт прийняті в розмірі 8% річних від капітальних затрат

Затрати на поточний ремонт прийняті в розмірі 8% річних від капітальних затрат, тис. грн/рік:

Заробітна плата обслуговуючого персоналу, тис. грн/рік:

$$Z = N_{роб} \cdot C_{год} \cdot T \quad (4.8)$$

де $N_{\text{роб}}$ – середня кількість робітників, які обслуговують систему ГВП; $C_{\text{год}}$ – середньогодинна заробітна плата одного робітника з нарахуваннями 27 грн/год; T – кількість робочих годин за місяць.

Інші витрати приймаються в розмірі 30% від суми амортизаційних відрахувань, витрат на поточний ремонт і заробітну плату, тис. грн/рік:

При порівнянні було вбрано варіант з найменшим значенням приведених затрат:

$$P_i = C_i + E_n \cdot K_i \Rightarrow \min, \quad (4.9)$$

Термін окупності визначався за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_i}{E_i}, \quad (4.10)$$

де K_i – капіталовкладення в запропоновану теплопостачання, тис. грн; E_i – річна економія коштів, тис. грн/рік.

Таблиця 4.1 Техніко-економічні показники варіантів теплопостачання

Показник	Сонячні колектори		Геліопокрівля
	Viessmann: Vitosol 100F	Atmosfera: SPK-F2	
Необхідна площа фотополя, м ²	15,00	16,00	20,00
Капітальні затрати, тис.грн/м²	15,76	11,88	6,20
Відрахування на амортизацію, капітальний ремонт і повне відновлення A , тис.грн/(рік·м ²)	1,26	0,96	0,50
Затрати на поточний ремонт P , тис.грн/(рік·м ²)	0,48	0,36	0,18
Затрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу $З$, тис.грн/(рік·м ²)	4,16	3,88	3,12
Інші затрати I , тис.грн/(рік·м ²)	1,76	1,56	1,14
Експлуатаційні затрати C, тис.грн/(рік·м²)	7,66	6,76	4,94

Показник	Сонячні колектори		Геліопокрівля
	Viessmann: Vitosol 100F	Atmosfera: SPK-F2	
Приведені річні затрати P, тис.грн/(рік·м²)	10,02	8,54	5,88
Річна кількість теплоти з фотоустановки Q , ГДж/м ²	4,34	4,06	3,26
Питомі приведені річні затрати P_n, тис.грн/(рік·ГДж)	4,62	4,20	3,60
Термін окупності, років	12,1	10	6,2

Термін окупності системи теплопостачання із використанням фотопокрівлі, який становить 6.2 роки.

Проведене дослідження виявило вражаючі результати економічної ефективності фототехнічної системи з інтегрованою фотопокрівлею. Порівняльний аналіз переконливо демонструє технологічні та економічні переваги інноваційного рішення над традиційними фотоколекторними системами.

Кількісні показники підтверджують високий потенціал фотопокрівлі: питомі приведені витрати становлять 3,60 тис. грн/(ГДж·рік), що на 19% нижче від аналогічних витрат класичних сонячних колекторів. Більше того, термін окупності запропонованої системи скорочується практично вдвічі порівняно зі стандартними фотосистемами.

Отримані результати не просто констатують технічну можливість - вони переконливо доводять економічну доцільність широкомасштабного впровадження фотопокрівлі в системи сонячного теплопостачання. Інноваційна технологія демонструє вагомий потенціал трансформації підходів до енергозабезпечення будівель, поєднуючи функції огорожувальної конструкції та активного фотоперетворювача.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел і патентних досліджень дозволив виявити як переваги, так і недоліки існуючих сонячних теплопостачальних систем (ССТ). Також було доведено економічну доцільність комбінованих систем теплопостачання, зокрема тих, що поєднують сонячний колектор зі скатною покрівлею будівель.

2. Розроблено конструкцію фотопокрівлі, яка є складовою частиною ССТ, із використанням профільно гофрованого металевого матеріалу як теплопоглинача для покрівлі. Це рішення дозволяє знизити вартість системи та забезпечити високу енергетичну ефективність.

3. Створена покращена математична модель для вловлювання сонячної енергії через фотопокрівлю, що дозволяє визначити термоаккумуляційні властивості системи та взаємозв'язок температури теплоносія в акумуляційному баці з інтенсивністю теплового потоку протягом дня та швидкістю вітру. Дослідження показали, що збільшення швидкості вітру до 5 м/с змінює коефіцієнт тепловіддачі від 2,1 до 9,3 Вт/(м²·К).

4. Проаналізовано вплив ключових факторів на ефективність фотопокрівлі. Експериментально отримано залежність змін ефективності ССТ в залежності від кутів падіння теплового потоку (α , β) та його інтенсивності. Результати показали, що при зниженні кутів падіння теплового потоку з 90° до 30° і інтенсивності потоку з 950 Вт до 300 Вт, ефективність фотопокрівлі зменшується в середньому на 39%, тоді як для звичайного плоского сонячного колектора це зменшення складає 61%.

5. Встановлено, що в ССТ із фотопокрівлею розташування трубок для циркуляції теплоносія над гофрованим теплопоглиначем забезпечує на 8-10% вищий коефіцієнт корисної дії (ККД), ніж під ним. Додатково, використання прозорого покриття підвищує ККД на 15-25%.

6. В рамках експерименту отримано залежності ефективності ССТ від швидкості і напрямку повітряного потоку. Встановлено, що ефективність фотопокрівлі з прозорим покриттям знижується на 35% при впливі повітряного

поток, тоді як без прозорого покриття – на 45%. Більший вплив на ефективність має швидкість повітряного потоку, тоді як його напрямок має менше значення.

7. Проведено техніко-економічне порівняння фотопокрівлі та традиційних сонячних колекторів у складі ССТ. Питомі приведені затрати на систему теплопостачання з фотопокрівлею становлять 3,60 тис. грн/(ГДж·рік), що на 19% менше, ніж витрати на систему з плоскими сонячними колекторами. Термін окупності системи теплопостачання з фотопокрівлею є майже вдвічі коротшим порівняно з терміном окупності традиційних фотоколекторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сектор сонячної енергетики України: поточний стан та нові виклики. Всеукраїнський діловий інформаційно - аналітичний журнал про сучасне будівництво. URL: <https://profbuild.in.ua/uk/vsi-statti-zhurnala-prof-build/5933-sektor-sonyachnoji-energetiki-ukrajini-potochnij-stan-ta-novi-vikliki> (дата звернення: 08.12.2024).
2. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / [О. Адаменко, В. Височанський, В. Льотко, М. Михайлів]. – Івано-Франківськ : Полум'я, 2000. – 208 с.
3. Будівельна кліматологія: ДСТУ – Н Б В. 1.1-27:2010. – [Чинний від 2011-11-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123с.
4. Возняк О. Т. Combined solar collector / О. Т. Возняк, С. П. Шаповал, О.М. Пона, І.І. Венгрин // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" ["Теорія і практика будівництва"].– Л. : В-во НУ «ЛП», 2014. – № 781. – С. 212-215.
5. Возняк О. Т. Основи наукових досліджень у будівництві : навч. посібн. / О. Т. Возняк, В. М. Желих. – Л. : В-во НУ "ЛП", 2003. – 176 с.
6. Гальчак В. Альтернативні джерела енергії : навч. посіб. / В. Гальчак, В. Боярчук. – Л.: Арал, 2008. – 135 с.
7. Гершкович В. Ф. Теплова помпа у багатоповерховому житловому будинку. Це на перспективу чи вже сьогодні? / В. Ф. Гершкович // Ринок
8. Гурин В. Н. Разработка эффективного селективного покрытия и конструкции солнечного теплового коллектора с рекомендациями по его использованию / В. Н. Гурин, И. О. Яшков, Д. В. Гурин // АСУ и приборы автоматики : всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х. : Изд-во ХНУРЭ, 2012. – Вып. 158. – С. 68–72.
9. Гурин В.Н. Разработка конструкции солнечного теплового

колектора и рекомендации по его использованию / В.Н Гурин, Д.В Гурин//т. XI, Вісник МСУ, технічні науки. – 2008. – №1 – С. 15-20.

10. Джамаль Камаль Хусейн. Комбіновані системи тригенерації з використанням сонячної енергії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / Джамаль Камаль Хусейн. – О., 2008. – 20 с.

11. Дорошенко А. В. Теплофизические основы многофункциональных солнечных систем. Часть I. / Дорошенко А. В. Джамал Камал Хусейн, Хассан Сади Ибрагим, Глауберман М.А. // Физика аэродисперсных систем, Выпуск 48.

– Одесса. – 2011 – С. 5-15.

12. Дорошенко О.В. Сонячні плоскі металополімерні колектори / О.В. Дорошенко, С.С. Титар, Б.Є. Молчанський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №4. – С.32-35.

13. Жуковский С. С. Системы энергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: навч. посіб. для ВЗО / С. С. Жуковский, В.Й. Лабай. – Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. – 259 с.

14. Закалик Л. Технології для енергоощадного будинку / Л. Закалик // Ринок інсталяцій. – 2010. – № 1-2. – С. 59-63.

15. Золотко К. Є. Розробка методик розрахунку та вибір раціональних параметрів систем теплопостачання з плоскими сонячними колекторами:автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.04 "Промислова теплоенергетика" / К. Є. Золотко. – Дніпропетровськ, 1998. –19 с.

16. Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT) : ДСТУ ISO 9806-1:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 56 с. – (Національний стандарт України).

– Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскленних сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995, IDT) : ДСТУ ISO 9806-3:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с. (Національний стандарт України).

17. Концов М.М. Солнечные коллекторы с алюминиевым и полимерным абсорберами / М.М. Концов, Ж.Ф. Дорошенко, О.В. Корейша // Труды Одесского политехнического университета, вып. 2(20). – 2003. – С. 1-5.

18. Корчемний М. А. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. А. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.

19. Кувшинов В. В. Комбинированный фотогелиоколлектор с плоскими концентраторами / Кувшинов В. В., Сафонов В. А. // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2009 – С. 124-129.

20. Кудря С. О. Основы конструирования энергоустановок з відновлюваними джерелами енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. М. Головка. – Ніжин : ТОВ Вид-во Аспект-Поліграф, 2005. – 131 с.

21. Лантух Н. Н. Комбинированная солнечно-электрическая система теплоснабжения [Електронний ресурс] / Н. Н. Лантух, В. С. Щербатый, Г. Н. Агеева. – 2006. – Режим доступу до матеріалу: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/487/>.

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ

Освітлення території підприємств, допоміжних приміщень і окремих робочих місць повинно відповідати нормативним вимогам.

Робоче освітлення повинно забезпечувати освітленість на робочих поверхнях не нижче нормативної.

Аварійне освітлення повинно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість не менше ніж 5 % від нормативної. За системи загального освітлення рівень аварійного освітлення повинен бути не менше ніж 2 лк всередині приміщень.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати освітленість на підлозі основних проходів, на землі та на східцях сходів не менше ніж 0,5 лк.

Кріплення світильників робочого та аварійного освітлення повинно бути надійним, а розташовані вони повинні бути так, щоб забезпечити безпеку та зручність їх обслуговування. Обслуговування світильників з переносних драбин, з вантажопідіймальних кранів, зі спеціальних пересувних вишок повинно бути безпечним.

Обслуговування світильників освітлення будівель з вантажопідіймальних кранів необхідно здійснювати не менше ніж двома працівниками за нарядом-допуском з дотриманням вимог техніки безпеки.

Проектною документацією та інструкціями, що затверджені роботодавцем, повинні бути передбачені заходи з обслуговування світильників для постійного забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Під час зміни технологічного процесу, заміни або перестановки устаткування на окремій ділянці цеху освітленість цієї ділянки необхідно привести у відповідність з чинними нормативно-правовими актами.

У процесі експлуатації освітлювальних установок необхідно періодично проводити такі види обслуговування:

не менше ніж один раз на рік перевіряти рівень освітленості в контрольних точках і рівень загальної освітленості приміщень;

- перевіряти наявність у світильниках скла, ґрат, сіток, справність світильників спеціального виконання тощо в строки, визначені особою, відповідальною за електрогосподарство;
- виконувати очищування ламп і освітлювальної арматури для приміщень з інтенсивним пиловиділенням - 4 рази на місяць, для приміщень з незначним виділенням пилу, кіптяви - 2 рази на місяць;
- не менше ніж один раз у квартал перевіряти справність аварійного та евакуаційного освітлення.

Під час засклення ліхтарів будівель віконним склом необхідно під засклення встановлювати горизонтальні металеві сітки шириною не менше ніж 0,7 м при вертикальному склінні, а при нахилому та горизонтальному ширина сіток повинна визначатися розрахунком з величини горизонтальної проєкції засклених рам.

Світильники, що розташовані на висоті не більше ніж 4,5 м над рівнем підлоги, обслуговують з переносних драбин. Не дозволяється розташовувати світильники над устаткуванням і стрічками конвеєрів. У випадку, коли обслуговування світильників з драбин ускладнено, необхідно облаштовувати спеціальні майданчики. Для обслуговування світильників, розташованих над кранами або кран-балками, на підприємствах, що будуються та реконструюються, необхідно передбачати спеціальні майданчики, що не повинні перешкоджати обслуговуванню та ремонту кранів.

Для запобігання затіненню робочих місць кранами повинно бути передбачено додаткове підкранове освітлення світильниками, що підвішені до нижніх частин ферм кранів.

На висоті монтажу світильників більше 5 м їх обслуговування необхідно проводити з пересувних вишок, кошиків та інших пристосувань.

Пересувні вишки повинні бути обладнані майданчиками з перилами,

виконаними відповідно до вимог пункту 9.2 розділу VII цих Правил. Для доступу на майданчики повинні бути передбачені сходи (скоби).

Вмикання та вимикання рубильників загального освітлення в будівлях цехів, зміна та очищення світильників, арматури та ламп, зміна штепсельних розеток і запобіжників, монтаж проводів може проводити тільки електротехнічний персонал.

Для переносного електричного освітлення необхідно застосовувати світильники напругою не вище ніж 42 В. Під час роботи всередині металевих ємностей, печей, котлів, колодязів, млинів напруга в освітлювальній мережі повинна бути не вище ніж 12 В. У місцях, де в повітрі є або можуть бути вибухонебезпечні гази, пари та пил, для переносного освітлення необхідно застосовувати світильники у вибухозахищеному виконанні напругою не вище ніж 12 В.

Захаращувати світлові прорізи приміщень матеріалами, виробами, інструментом та іншими предметами не дозволяється.

На підприємствах повинні бути розроблені та затверджені роботодавцем інструкції з охорони праці щодо розміщення світильників для забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Основні причини нещасних випадків від дії електричного струму:

- випадковий дотик, наближення на небезпечну відстань до струмопровідних частин, що перебувають під напругою;
- поява напруги дотику на металевих конструктивних частинах електроустаткування (корпусах, кожухах тощо) у результаті пошкодження ізоляції або з інших причин;
- поява напруги на відключених струмопровідних частинах, на яких працюють люди, унаслідок помилкового включення установки;
- виникнення напруги кроку на поверхні землі через замикання проводу на землю.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин, що перебувають під напругою, для випадкового дотику;
- електричний поділ мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням; - застосування малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмопровідних частин застосуванням кожухів, огорож, подвійної ізоляції;
- захист від небезпеки при переході з вищої на нижчу напругу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів - переносних приладів і запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по іншим причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т. п.). Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучих металічних частин, що опинилися під напругою в наслідок замкнення на корпус та по іншим причинам. Захисне заземлення потрібно відрізняти від робочого заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Заземлення блискавкозахисту – навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими

причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підйом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого обладнання).

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час дуже ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах. Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати, працюють люди”, “Не відкривати, працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.
5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Керівник підприємства зобов’язаний забезпечити утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для цього він повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які

мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку;

- забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників;

- затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці;

- встановити такий порядок, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування електроустановок, вели ретельні спостереження за дорученим їм обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням;

- забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки згідно з вимогами ПТЕЕС;

- забезпечити проведення проти аварійних, приймально-здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок згідно з правилами і нормами (ПТЕЕС);

- забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці зобов'язані контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки. Забороняється покладати на енергослужбу обов'язки, що не входять до її професійної компетенції. Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку ПТЕЕС.