

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад.
І.С. Гулого

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

_____ (підпис)

«05» 12 2024 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій БЛАЖЕНКО

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Валентин ПЕТРЕНКО

(ім'я та прізвище)

«05» 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 144 Теплоенергетика

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Теплоенергетика та енергоефективні технології»

на тему: Використання рідинних теплових сонячних колекторів в системах теплозабезпечення будинків

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗТЕ-2-7М

Буджерак Юлія Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник проф. Недбайло Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультант _____

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Рецензент к.т.н. Ткаченко Мирослав Володимирович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Здобувач _____

_____ (підпис)

Київ – 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут

ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь

магістр

Спеціальність

144 Теплоенергетика
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри **TEXT**

В. ПЕТРЕНКО проф. Валентин ПЕТРЕНКО
"01" жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Буджерак Юрій Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Використання рідких кристалів в системі теплозабезпечення будівель*
керівник роботи *Гербішко Євдоким Михайлович* Д.Т.Н.С.Н.С.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "01" 10.2024 року № 860-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 03.12.2024 року

3. Вихідні дані до роботи *Система теплопостачання на основі рідкокристалічних елементів на рідкокристалічних елементах в системі енергії у теплому (ЗОРСЕТ), інтенсивність інсоляції $I = 900 \text{ Вт/м}^2$ витрати теплової енергії через електричний $Q = 0,14 = 0,26 \text{ кВт/год}$*

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

1. Аналіз світових досягнень щодо використання інсоляції
2. Розроблення принципових схем теплозабезпечення з використанням сонячних колекторів
3. Розроблення інтегрованих ЗОРСЕТ
4. Визначення теплової ефективності технічних рішень

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація Power Point - 11 слайдів

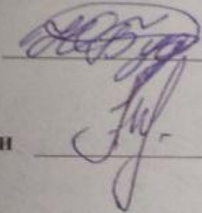
6. Консультанти розділів роботи

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

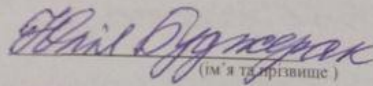
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз інформаційного ресурсу з тематикою роботи	14.10.2024	
2	Розроблення типових схем сценарних планових	28.10.2024	
3	Максимальне моделювання на основі міну з ЗОП СЕТ	13.11.2024	
4	Виконання тематичних носії ЗОП СЕТ	13.11.2024	
5	Техніко-економічний аналіз, формулювання висновків та оформлення роботи	03.12.2024	

Здобувач

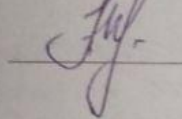


(підпис)

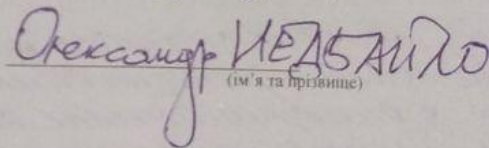


(ім'я та прізвище)

Керівник роботи



(підпис)



(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Метою даного дослідження є наукова демонстрація та розроблення системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі огороджувальних конструкцій з рідинними колекторами, що перетворюють сонячну енергію в теплоту та створення відповідної методики розрахунку його теплотехнічних характеристик за результатами досліджень.

Об'єкт досліджень: системи теплозабезпечення енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову.

Предмет дослідження: теплові процеси та їхні теплофізичні характеристики в системах перетворення сонячної енергії на основі елементів систем сонячного теплопостачання, суміщених із зовнішніми огороджувальними конструкціями енергоефективних будівель і споруд.

Наукова новизна.

На основі аналізу проблем теплозабезпечення енергоефективних будівель сонячними тепловими колекторами, їхньої теплової ефективності, методів розрахунку та характеристик встановлено необхідність і нові напрямки розроблення енергоощадних комбінованих систем сонячного теплопостачання з елементами, інтегрованими в конструкцію зовнішніх огороджувальних конструкцій будівель і споруд.

Практичні результати.

У результаті комплексного теоретичного, експериментального та практичного досліджень запропоновані до впровадження окремі схемотехнічні рішення для огороджувальних конструкцій, що під час їхньої експлуатації мають підвищити загальну енергетичну ефективність будинку.

Ключові слова: система теплозабезпечення, сонячний тепловий колектор, інсоляція, огороджувальні конструкції будівлі.

ANNOTATION

The purpose of this study is the scientific demonstration and development of a heat supply system for energy-efficient buildings based on enclosing structures with liquid collectors that convert solar energy into heat and the creation of an appropriate methodology for calculating its thermal characteristics based on research results.

Object of research: systems of heat supply of energy-efficient buildings based on external enclosures that convert solar energy into thermal energy.

The subject of research: thermal processes and their thermophysical characteristics in solar energy conversion systems based on elements of solar heat supply systems combined with external enclosing structures of energy-efficient buildings and structures.

Scientific novelty.

On the basis of the analysis of the problems of heat supply of energy-efficient buildings with solar heat collectors, their thermal efficiency, calculation methods and characteristics, the need and new directions for the development of energy-saving combined solar heat supply systems with elements integrated into the design of external enclosing structures of buildings and structures have been established.

Practical results.

As a result of a complex theoretical, experimental and practical study of heat processes in the elements of the solar heat supply system, a solution to the scientific and technical problem of energy-efficient heat supply of buildings with a combined system based on external enclosing structures that transform solar energy into heat was developed.

Keywords: heating system, solar thermal collector, insolation, building envelope.

ЗМІСТ

ВСТУП . . . . .	.6
1 ІСТОРИЧНИЙ РОЗВИТОК І СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ З ДОСЛІДЖЕНЬ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ІНСОЛЯЦІЇ	.7
1.1 Визначення інсоляції та загальні поняття процес . . . . .	.7
1.2 Дослідження сонячної радіації. Основні розрахункові методики	.10
1.3 Прилади для вимірювання надходження сонячної радіації на поверхню . . . . .	.14
1.4 Аналіз недоліків існуючих приладів для дослідження інсоляції	.19
1.5 Можливість використання сонячної енергії для потреб теплозабезпечення . . . . .	.20
1.6 Параметри сонячної активності . . . . .	.22
2 СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ . . . . .	.29
2.1 Світовий та вітчизняний досвід використання сонячних систем	.29
2.2 Типові схеми систем теплозабезпечення з використанням сонячних колекторів . . . . .	.31
2.3 Висновки та рекомендації щодо впровадження сонячних установок	38
3 ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ, ЩО ІНТЕГРОВАНІ В ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ . . . . .	.39
3.1 Розвиток проектування об'єктів, що використовують системи сонячного теплопостачання в складі огороджувальних конструкцій	.39
3.2 Аналіз потенціалу сонячної енергії, що надходить на територію України . . . . .	.40
3.3 Математичне моделювання теплових процесів в елементах геліопокриття . . . . .	.46

4 ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛОТУ . . . . .	.52
4.1 Експериментальна установка з дослідження ефективності геліопокриття із тепловим акумулятором . . . . .	.52
4.2 Результати експериментальних досліджень геліопокриття . . . . .	.55
4.3 Комплексні експериментальні дослідження теплової ефективності геліостіни із теплопоглиначем . . . . .	.59
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛОВУ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ . . . . .	.68
5.1 Вплив орієнтації геліоколектора по відношенню до горизонту . . . . .	.68
5.2 Напрямки практичного застосування представлених в роботі результатів досліджень . . . . .	.72
6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ- ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОТУ . . . . .	.78
ВИСНОВКИ . . . . .	.81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ . . . . .	.84

ВСТУП

Україна стоїть перед безпрецедентними проблемами в паливно-енергетичному комплексі, які впливають з дефіциту енергетичних ресурсів і, як наслідок, – з підвищеної залежності від їхнього імпорту. Сьогодні в світі відбуваються зміни у способах формування енергетичної позиції країн: надається пріоритет підвищенню енергоефективності та використанню відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Впровадження цих заходів є однією із прерогатив тотального формування світової енергетики. Це визначає для України принципово нові економічні та технологічні завдання і потребує пошуку та впровадження на практиці новітніх рішень у галузі архітектури та будівництва. Одним із перспективних способів вирішення цих проблем є впровадження енергоефективних будівель. Тому для України важливо інтенсифікувати процеси з розвитку енергоефективного будівництва та збільшення частки альтернативних джерел енергії, зокрема сонячної, яка на території України має значний потенціал.

Використання сонячної енергії для теплопостачання енергоефективних будівель є перспективним напрямком у галузі архітектури та будівництва. У випадку малоповерхових будинків необхідна площа для розміщення геліоколекторів на їхньому покритті може бути достатньою, проте у випадку будинків середньої і високої поверховості ця площа може не відповідати потребам. З огляду на світові тенденції в архітектурі будівель, зокрема США, Китаю, ОАЕ де набувають поширення будівлі зі скляними фасадами та динамічним дизайном, доцільно шукати нові технологічні рішення використання систем сонячного теплопостачання (ССТ) для таких будівель з урахуванням плями та архітектури забудови, а також окремо варто звернути увагу на застосування систем сонячного теплопостачання, елементи яких інтегровані в конструкції зовнішніх огорожень.

1 ІСТОРИЧНИЙ РОЗВИТОК І СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ З ДОСЛІДЖЕНЬ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ІНСОЛЯЦІЇ

1.1 Визначення інсоляції та загальні поняття процесу

Велика кількість наукових літературних джерел надають різну змістовність терміну інсоляція. Розглянемо найрозповсюдженіші в загальному використанні та розумінні визначення. Інсоляція (від лат. In - «всередину» + sōl - «сонце») - опромінення поверхонь сонячним світлом (сонячною радіацією), потік сонячної радіації на поверхню або опромінення поверхні та простору паралельним пучком променів, що надходять з напряду, в якому видно в даний момент центр сонячного диска.

Сонячне випромінювання, з іншого боку, відноситься до всього випромінювання, що випускається сонцем, яке являє собою електромагнітні коливання різних довжин хвиль. З гігієнічної точки зору особливий інтерес становить оптична частина сонячного світла в діапазоні 280-2800 нм. Довші хвилі - це радіохвилі, коротші - гамма-випромінювання, а іонізуюче випромінювання затримується у верхніх шарах атмосфери, зокрема в озоновому шарі, і тому не досягає поверхні Землі. Сонячна радіація є основним джерелом енергії для всіх фізико-географічних процесів, що відбуваються на поверхні Землі та в атмосфері.

Сонячна радіація враховується при проектуванні та будівництві будівель. Це опромінення приміщень та прилеглих до них територій прямим сонячним світлом, характеризується тривалістю та вимірюється в годинах. Забезпечення необхідної інсоляції створює в житлових приміщеннях для людини необхідні санітарно-гігієнічні норми комфорту.

Інсоляція житлових будівель виконує водночас 2 функції, це:

- забезпечення необхідного рівня освітлення, адже, як відомо, згідно різних нормативних документів з техніки безпеки для кожного окремого типу приміщення існують певні критерії щодо освітленості приміщення за рахунок природного, а не штучного світла, що повинні дотримуватись за для створення комфортних умов праці співробітників чи для умов життя і т.д. Адже, як попередньо було висвітлено в літературі, не всяке штучне освітлення має позитивний вплив на психологічний стан людини, а тим паче дитини;

- забезпечення енергією, що завдяки спеціальним приладам може бути трансформована в електричну енергію та теплоту для забезпечення потреб пов'язаних з опаленням приміщень та \ чи гарячим водопостачанням.

В даній роботі наділяється увага тепловому впливу інсоляції, тому надалі під цим терміном будемо розуміти друге визначення.

Інсоляцію поділяють на: астрономічну, ймовірну і фактичну.

Астрономічна інсоляція визначається обертаннями Землі навколо Сонця і власної осі, нахиленої під кутом $23,5^\circ$ до екліптики. Земному спостерігачеві вона представляється гармонійним коливанням положення сонячної паралелі відносно небесного екватора з періодом в 365 діб і кутовим фазовим зсувом (схилянням Сонця).

Ймовірна інсоляція залежить від стану атмосфери і хмарного покриву. Тривалість такої інсоляції на території України становить близько 50% тривалості астрономічної інсоляції і визначається, в основному, висотою стояння Сонця.

Фактична інсоляція завжди відрізняється від ймовірної та може бути визначена лише натурними спостереженнями. Фактична інсоляція залежить від орієнтації та конфігурації забудови, віконних прорізів, положення розрахункового приміщення, балконів і лоджій.

Також в роботі досліджується вплив сонячної радіації на поверхні огорожувальних конструкцій приміщень, тому слід визначити чітку грань між приміщеннями, спорудами та будівлями.

Приміщення - це простір, огорожений конструкцією з усіх боків, тобто

стінами (включно з вікнами і дверима), стелею (перекриттям) і підлогою. Простір під горищем або огорожений сітчастою захисною конструкцією не є приміщенням.

Будівля - це вид споруди, що складається з несучих та огорожувальних конструкцій або пов'язаних між собою (несучих та огорожувальних) конструкцій, які утворюють надземний або підземний майданчик для розміщення або проживання людей чи розміщення обладнання, тварин, рослин або предметів.

До будівель належать житлові будинки, пансіонати, готелі, ресторани, торговельні будівлі, промислові будівлі, вокзали, адміністративні будівлі, медичні та освітні заклади. До господарських будівель належать допоміжні (нежитлові) приміщення, такі як сараї, комори, гаражі, літні кухні, майстерні, туалети, підвали, навіси, котельні, бойлерні та підстанції.

Будівля - будівельна система, пов'язана із землею і виконана з будівельних матеріалів, напівфабрикатів, устаткування і машин у результаті будівельно-монтажних робіт. На рис. 1.1 зображено яка доля сонячного випромінювання потрапляє на приміщення та з яких компонент вона складається.

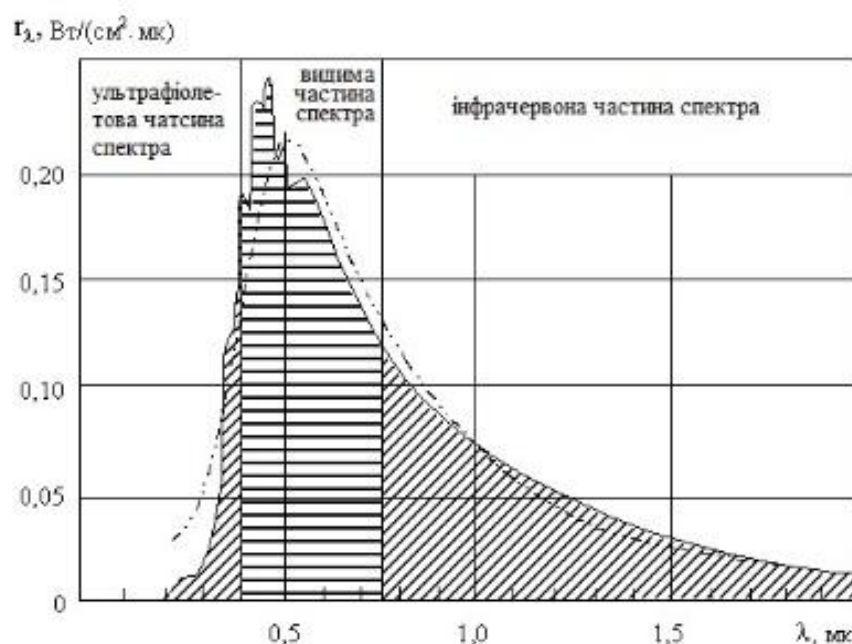


Рисунок 1.1 – Спектральна густина сонячного випромінювання

У роботі також використовується термін альbedo (від пізньолатинського albedo - білизна, від латинського albus - білий). Альbedo - це фізична величина, що характеризує здатність поверхні або космічного тіла відбивати і розсіювати випромінювання (світло).

У загальному випадку альbedo - це відношення потоку випромінювання, відбитого (розсіяного) в усіх напрямках поверхнею, до потоку вхідного випромінювання.

Загалом, регулювання і розрахунок сонячної радіації є, мабуть, найсерйознішою світлотехнічною, економічною, соціальною та юридичною проблемою на сьогодні. У міру того як землекористування і будівництво переходять до ринкового підходу, вимоги до норм інсоляції будівель стали одним з основних чинників, що стримують інвесторів, землевласників і орендарів від спроб надмірної щільності міської забудови з метою отримання максимального прибутку. Тому вивчення та оцінка впливу сонячної радіації є важливим аспектом розв'язання багатьох наявних проблем енергопостачання.

1.2 Дослідження сонячної радіації. Основні розрахункові методики

Будь-які проблеми, що виникають під час визначення умов сонячної радіації, можуть бути вирішені за допомогою різних методів розрахунку або вимірювання:

- аналітичними;
- графічними;
- енергетичними;
- інструментальними.

Нарисна геометрія і тріангуляція можуть бути використані для розв'язання всіх задач з вивчення сонячної радіації, оскільки сонячні промені поширюються по прямій лінії і координати сонця відомі протягом дня і в будь-яку пору року. Однак через свою трудомісткість і малопомітність аналітичні методи не знайшли широкого застосування в практиці проектування будівель. Найпоширенішим є графічний метод, за допомогою якого розраховується

сонячна радіація. Основна перевага перед аналітичними методами - наочність, що важливо для архітекторів, оскільки дає загальне уявлення про сонячну радіацію об'єкта. Графічні методи можна розділити на два типи: геометрична побудова архітектурних креслень і використання графіків сонячної радіації. Залежно від складності міського плану і розташування будівель, проєктувальники можуть використовувати будь-який із графічних методів під час розрахунку й оцінки сонячної радіації ділянки або території.

Не існує універсального графіка, який можна було б використовувати для розв'язання всього спектра завдань з оцінки сонячної радіації для ділянки або регіону. Одні графіки зручні для визначення тривалості сонячної радіації на ділянці та розрахунку пристроїв захисту від сонячної радіації, інші дають змогу визначити не тільки характер сонячної радіації об'єкта, а й його затінення, що дає змогу будувати тіньові оболонки та вивчати затінення і тривалість сонячної радіації в міських умовах. Не зупиняючись на перевагах і недоліках різних графічних методів оцінювання умов сонячної радіації, слід зазначити, що під час розрахунку сонячної радіації для груп будівель, складних архітектурних комплексів, реконструкції історично цінних будівель тощо наочним і досить точним є метод моделювання містобудівної ситуації за допомогою моделей будівель (рис. 1). Використання моделей будівель дає найповніші та найпереконливіші результати під час дослідження як затінення, так і пропускання сонячної радіації в усі приміщення та зони території. На перший погляд, перевірити результати дослідження сонячної радіації досить складно, оскільки існує безліч методів оцінки умов сонячної радіації. Органам, що здійснюють управління будівельною діяльністю, було б простіше використовувати стандартний (єдиний) метод обстеження сонячної радіації. Звісно, можна і потрібно вдосконалювати окремі методи обстеження сонячної радіації, але немає необхідності затверджувати якийсь із них як «основний». Необхідно подумати, чи не стане якийсь метод розрахунку сонячної радіації, наприклад графічний, після офіційного затвердження як стандарту своєрідним гальмом для використання інших методів (інструментальних, комп'ютерних тощо). Очевидно, що інструментальні методи дослідження сонячної радіації з

використанням відповідного лабораторного обладнання (геліодон, соларскоп, штучне сонце) малодоступні для архітекторів і дизайнерів у невеликих містах України. Сьогодні дедалі більшого поширення набувають методи автоматизованого проєктування (останніми роками 90% проєктної документації, що подається на експертизу, підготовлено з використанням програм комп'ютерного проєктування), які дають змогу моделювати просторову область забудови та спостерігати за процесом затінення одного об'єкта іншим. Це можна зробити. Є й інші програми для комп'ютерного розрахунку сонячної радіації. Наприклад, СІПІС: Соляріс (розроблена в Росії, 2005). Однак через недостатню точність цього методу і відсутність легалізованих (і дуже дорогих) пакетних програм для розв'язання цих завдань як метод дослідження було обрано експериментальне дослідження. Згідно з результатами метеорологічних спостережень за останні десять років в Україні на рік припадає 100÷200 сонячних днів в залежності від регіону. Середньорічна сумарна падаюча сонячна радіація на 1 м² поверхні, на території України знаходиться в межах від 1000 кВт·год/м² на півночі країни до 1400 кВт·год/м² в АР Крим.

Найбільша кількість сонячної енергії надходить на площину, що є перпендикулярною до напрямку сонячних променів. Для отримання оптимального куту під яким сонячний промінь може потрапляти на поверхню сонячного колектора використовуються механізми, що переміщують колектор за сонцем одночасно відносно двох осей, синхронно і аналогічно переміщенню сонця у вертикальному та горизонтальному напрямках. Такі пристрої значно ускладнюють установку, знижують надійність та збільшують її вартість. Тому здебільшого колектори встановлюють нерухомо під оптимальним, протягом року, кутом, або змінюють кут нахилу колектора посезонно. Отже, важливо знати оптимальний кут нахилу колектора до горизонту для отримання максимальної кількості енергії протягом всього року.

Інтенсивність сонячного випромінення Q , яка надходить на поверхню, має три складові: пряму радіацію $Q_{\text{пр}}$, дифузну складову $Q_{\text{диф}}$ та відбиту радіацію $Q_{\text{від}}$. В загальному вигляді інтенсивність сонячної радіації, що надходить на похилу поверхню, може розраховуватись за формулою (1.1)

$$Q_{ГК} = Q \cdot \left[(1 - \Psi_{\text{diff}}) \cdot \cos j + \Psi_{\text{diff}} \frac{1 + \cos \beta_{ГК}}{2} + r_a \frac{1 - \cos \beta_{ГК}}{2} \right] \quad (1.1)$$

Аналіз зміни інтенсивності сонячної радіації, яка надходить на похилу поверхню за деякий період часу, показує, що найбільше значення енергії, що надходить на колектор у сонячні дні, досягається в тому випадку, коли кут його установки відносно горизонту розрахований за формулою (1.2)

$$\beta_{ГК} = \varphi - \Delta_{ср} \quad (1.2)$$

При цілорічній експлуатації системи $\Delta_{ср} = 0$. Отже, оптимальне значення кута нахилу геліоколектора відносно горизонту при встановленні нерухомо протягом року [2]

$$\beta_{ГК} = \varphi \quad (1.3)$$

У зимовий період року $\Delta_{ср} < 0$, $\beta_{ГК} > \varphi$, а в літні місяці, навпаки $\Delta_{ср} > 0$, $\beta_{ГК} < \varphi$.

Але при використанні даних по сонячній радіації, взятих із кліматичних довідників та нормативних документів [1, 2], не враховуються хмарність та радіаційні властивості атмосфери цієї місцевості, які не піддаються розрахункам. Самі ж дані кліматичних довідників, у зв'язку зі змінами клімату, на сьогоднішній день потребують уточнення. Тому, при розрахунку та встановленні дорогого обладнання для перетворення енергії сонячного випромінення в теплову, виникає потреба в точних значеннях наземної сонячної радіації, яка надходить під різними кутами нахилу до горизонтальної поверхні землі.

1.3 Прилади для вимірювання надходження сонячної радіації на поверхню

Протягом багатьох років була створена велика кількість різних прямих та непрямих приладів для визначення сонячної радіації, та її інтенсивності. Одним з перших таких приладів був піргеліометр.

Піранометр (від грец. Πῦρ (púr) - вогонь, ἥλιος (hélios) - сонце та μέτρον (metréon) - вимірюю) - це абсолютний термометр, що вимірює кількість прямої сонячної радіації, яка падає на поверхню, що піддається сонячному випромінюванню.

Принцип дії ґрунтується на вимірюванні кількості тепла, що виділяється під час поглинання сонячної радіації.

Прилади, що вимірюють кількість сонячної радіації, яка досягає земної поверхні, мають такі конструктивні різновиди:

1) Геліограф Джорджа Стокса.

Цей прилад був створений ірландським фізиком Джорджем Стоксом 1881 року. Фотографію приладу показано на рис. 1.2. Прозора скляна сфера, на яку спрямовуються сонячні промені на шматку картону. Картон градуїований і повторює форму сфери.

Концентроване сонячне світло пропалює на картоні лінійний слід уздовж шляху сонця. За цими слідами можна визначити безхмарну погоду, тобто час (тривалість), протягом якого сонячне проміння потрапляє на поверхню кулі, не затуманену хмарами, та інтенсивність сонячного світла. Сьогодні такий прилад називається геліографом.

2) Піранометр Гворсона.

Вимірювання прямої сонячної радіації практикується в Радянському Союзі з 1870 року: 1892 року російський фізик професор Орест Гворсон розробив теорію абсолютного вимірювання сонячної радіації за допомогою піранометра і теорію відносного вимірювання за допомогою актинометрії.



Рисунок 1.2 – Фотографія геліографа Стокса

Вимірювання сонячної радіації піргеліометром проводилось за допомогою двох мідних пластин, одна з яких нагрівалася сонячними променями, значення температури якої фіксувались терморезисторами, а по другій пластині протікав струм, який вимірювався гальванометром. Ці прилади використовувалися в Павлівській обсерваторії близько 10 років, але були крихкими і складними у використанні.

У 1896 році шведський геофізик Кнут Ангстрем створив абсолютний компенсаційний піргеліометр (рис. 1.3), а в 1905 році Міжнародна метеорологічна конференція запатентувала цей прилад як еталон.

В наш час в науковій літературі можна зустріти його ще під назвою пергеліометр Гворсона – Ангстрема, адже обидва вчені займались дослідженнями приладів для вимірювання інсоляції, але кожен окремо.

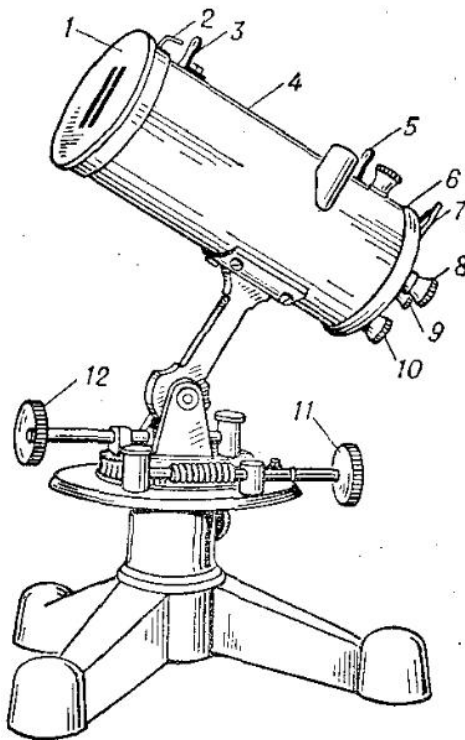


Рисунок 1.3 – Зображення піргеліометра Гворсона - Ангстрема

Компенсаційний піргеліометр Ангстрема, як зазначалось раніше, є найбільш поширеними та розповсюдженими у використанні (понад 70 років). Використовується в якості еталонного приладу. Піргеліометр Ангстрема — двоканальний прилад. Приймач складається з двох тонких (0,01 x 2 x 20 мм.) манганінових пластин, що попередньо були затемнені платиново-камфорною черню ($a = 0,98$) та закріплених у виїмках ебонітової рамки. Посередині цих плоских пластин розміщені спаї манганін-константанові термомпари. Приймач розміщується в нижній частині труби. У верхній частині труби закріплена штора, що забезпечує почергове затемнення однієї з пластин.

Електрична схема приладу складається з перемикача, за допомогою якого затінена полоса вмикається до напруги та обігрівається струмом до тієї ж температури, що й пластина, що обігрівається сонцем. Про це судять по нульовим показам гальванометра.

Головними джерелами виникнення систематичних похибок абсолютних вимірювань є: похибка визначення коефіцієнта поглинання, похибка визначення площі поверхні та опору приймача; крайовий ефект, обумовлений наявністю різницею площини приймаючих пластин при радіаційному та

електричному обігріванні; потрапляння долі сонячної радіації на затінену полосу знизу; залежність чутливого елемента від координати на приймачі.

Загальна похибка вимірювань за допомогою піргеліометра Ангстрема складає $\pm 0,7...1,1$ %.

Діапазон вимірювань таких піргеліометрів доволі широкий (від 40 до 1400 Вт/м^2).

1) Водоструминний піргеліометр Аббота.

У США еталонним приладом є водоструминний піргеліометр Чарльза Аббота з конструктивними поправками радянського вченого В.М. Шульгіна.

Датчиком цього піргеліометра є поміщена під сонячне світло затемнена камера, що омивається потоком води. Така ж камера, але затінена (тобто сонячне світло не потрапляє на її поверхню), нагрівається електричним струмом так, щоб температура вихідних з цих камер потоків води була однаковою (ця температура потоків вимірювалася термоелементами).

2) Сучасні прилади для вимірювання інсоляції.

У сучасних піргеліометрів як сенсор використовуються термобатарей - ряд послідовно сполучених термоелементів (напівпровідникові елементи, що використовують термоелектричні явища).

Актинометр (від грец. *Ακτίς* актіно - промінь і *μέτρον* - міра) - вимірювальний прилад, що служить для вимірювання інтенсивності електромагнітного випромінювання, переважно видимого і ультрафіолетового світла. У метеорології застосовується для вимірювання прямої сонячної радіації.

Актинометрія вивчає також прилади, що вимірюють кількість променевої теплоти, що випромінюється в небесний простір (Пульє, 1838). Найбільше значення має Актинометр, винайдений Пульє, загалом він складається з:

- циліндричної срібної судини, кришка якої напрямлена перпендикулярно до сонячних променів; посудину наповнений водою з зануреним у неї кулькою дуже чутливого термометра;
- кришки, що сприймає промені. Вона закопчена (покрита сажею) для більшого їх поглинання.

З підвищенням температури води в певний час обчислюють кількість поглиненого теплоти відомою площиною в даний час. До цього потрібно ще додати ту теплоту, що сприймає поверхня через радіацію. Щоб її знайти, встановлюють актинометр так, щоб сприймаюча поверхня була напрямлена до тої сторони неба, де нема сонця, і за зниженням температури обчислюють втрачену кількість теплоти.

Піранометр (грец. πῦρ + ἄνω + μέτρον - вогонь + верх + міра) в актинометрії - це прилад, що використовується для вимірювання кількості сонячної радіації, що досягає поверхні (рис. 1.4). Прилад спеціально розроблений для вимірювання щільності потоку сонячного випромінювання (ват на квадратний метр).

Стандартні піранометри не потребують джерела живлення. Залежно від вимірюваного діапазону частот у піранометрах використовують термомпари з чорною фарбою або фотодіоди як датчики для виявлення сонячної енергії.



Рисунок 1.4 – Три різні конструкції піранометричних приладів

Датчик розміщується під прозорий скляний купол або пластиковий ковпак для захисту від впливу зовнішніх факторів.

Піранометри застосовуються в метеорології, кліматології, а також при проектуванні та орієнтації таких установок, як сонячні батареї чи колектори.

1.4 Аналіз недоліків існуючих приладів для дослідження інсоляції

На сьогоднішній день існує велика кількість різноваріантних конструкцій приладів для вимірювання радіаційної складової опромінення будівель та споруд. Безперечно кожний з цих приладів має як свої переваги так і свої недоліки і повинен використовуватись саме в тих умовах та для тих цілей яких він був сконструйований задля отримання найбільш точних результатів дослідження. В даній роботі метою було дослідити саме інтенсивність інсоляції, що надходить на горизонтальні, вертикальні та похилі поверхні протягом довгого періоду часу для кліматичних умов широти міста Києва. Саме тому в якості вирішення поставленої мети було вирішено розробити спеціальні конструкції піранометрів. До недоліків існуючих піранометрів у порівнянні з ними можна віднести наступні:

- існуючі прилади не можуть виміряти кількість сонячної радіації, що падає на поверхні будівель, звернені в різні боки по всьому світу;
- показники сильно залежать від кліматичних умов навколишнього середовища;
- відсутня система примусового охолодження і тепловий дренаж з використанням вологопоглинальних матеріалів (наприклад, силікагелю), що значно знижує точність вимірювань.

В основу роботи вимірювача сонячної радіації покладено задачу вдосконалення вимірювання сонячної радіації, яка усуває перераховані недоліки, підвищує якість тривалого безперервного контролю інтенсивності сонячної радіації, яка досягає поверхні землі, та дає змогу накопичувати виміряні дані щодо надходження сонячної енергії на поверхню будівель і споруд.

Це завдання розв'язується шляхом розроблення двох піранометрів унікальної конструкції: перший здатний оцінювати інтенсивність сонячної радіації, що досягає оболонки будівлі, а другий - сонячну радіацію, що падає під кутом до горизонту.

1.5 Можливість використання сонячної енергії для потреб теплозабезпечення

Комунальна теплоенергетика України споживає більше 30% загальної кількості палива, що витрачається народним господарством країни. Причому, житлово-комунальне господарство (ЖКГ) і його енергетична складова знаходяться в критичному стані - це матеріальна зношеність всього обладнання і його моральна застарілість. Модернізація комунальної теплоенергетики більше ніж назріла (аварії в Алчевську, Дніпропетровську і т.д.) і вона вже була повинна відбутися. І тут виникає небезпека вибору рішення, що веде по суті до нераціонального та безперспективного результату - до традиційних схем на основі АЕС, ТЕС, котелень, міських теплотрас, в той час як світова спільнота йде по принципово іншим шляхом - із зростаючим використанням нетрадиційних технологій і енергоресурсів.

Слід враховувати, що модернізацію існуючої комунальної теплоенергетики України доводиться вирішувати в умовах далеко не таких комфортних, як півстоліття тому, а саме при:

1. Жорсткій світовій екологічній кризі, що вимагає переходу до безвідходних і низькопотенційних енерготехнологій. До безвідходних технологій в буквальному сенсі, тобто таких, що не виробляють будь-яких побічних речовин, в тому числі і продуктів згоряння будь-якого, навіть, на перший погляд, ідеального водневого палива, не кажучи вже про багатокomпонентні газові та тверді композити - біогаз, вугілля, деревина, їх похідних і т. і.

2. Енергетичній кризі, що пов'язана із вичерпанням і здорожчанням газу, нафти, що призводить енергозалежні країни крім усього ще й до додаткових зовнішньополітичних проблем. Причому, в силу екологічної кризи, подальша орієнтація на ці традиційні енергоджерела безперспективна, що не всі усвідомлюють.

Розглянемо можливі варіанти. Навіть якщо ігнорувати загальносвітові проблеми, відображені вище, то централізоване теплопостачання стає

збитковим вже при ціні газу 350 доларів за тисячу кубометрів. Перехід до електроопалення проблематичний хоча б через зношеність систем електропередачі як магістральних, так і розподільчих мереж. ККД виробництва електроенергії на вугільних ТЕС і АЕС близько 30 - 35%, не кажучи вже про проблеми викидів в атмосферу продуктів згоряння і утилізації відпрацьованого ядерного палива. Все це обговорюється не тільки в спеціальних виданнях, а й стає відомим із засобів масової інформації [6]. Тому іншого шляху, як розробка безвідходних енерготехнологій на основі нетрадиційних джерел немає.

Всі види нетрадиційної енергетики породжені Сонцем. Використання енергії вітру раціонально в гористій малонаселеній місцевості через наявність аеродинамічного шуму вітроагрегатів. Недолік геотерміки в труднощах зворотного закачування проміжного теплоносія, який до того ж виявляється сильно мінералізованим, що ускладнює роботу теплообмінного обладнання. Біогаз, як уже зазначалось, не можна віднести до безвідходних видів енергії. Скрізь доступним енергоджерелом, що відповідає найжорсткішим екологічним вимогам, є сонячне випромінювання.

Якщо говорити про теплову форму сонячної енергії, то можливі два варіанти її використання: 1) за допомогою спеціальних пристроїв (сонячних колекторів); 2) шляхом вилучення безпосередньо з верхніх шарів ґрунту. У першому випадку відбувається пряма дія випромінювання на приймач, а в другому - опосередкований вплив радіації в формі акумульованої в ґрунті енергії. Ясно, що тепловий потенціал в першому випадку буде істотно вище. Якщо приводити конкретні цифри, то в середніх широтах земної кулі (де розташовується Україна) застосування ординарних сонячних колекторів дозволяє отримати температуру до 60°C, а при безпосередньому вилученні з ґрунту в холодний період року - в середньому не більше 0°C. Підвищити потенціал енергії можна тепловими насосами. Однак і тут не можна розраховувати на кінцеві температури, що перевищують 60 - 65°C. Теплоносій з такими низькопотенціальними параметрами найбільш раціонально використовувати в комунальній сфері - для опалення приміщень (наприклад, за найбільш гігієнічною схемою «тепла підлога») і для гарячого водопостачання. З

огляду на значну частку комунального теплоспоживання в загальному енергетичному балансі, переорієнтування ЖКГ на використання сонячної енергії фактично зніме основні проблеми енергетичної кризи в Україні.

1.6 Параметри сонячної активності

Єдина загальноприйнята методика розрахунку сонячної радіації, що діє на сонячні колектори, відсутня. Незважаючи на принципову можливість строго теоретичного визначення цієї величини, використовуючи астрономічні відомості про Сонце, з інженерної точки зору все ж слід спиратися на стійкі емпіричні дані. До таких належать авторитетні відомості про помісному розподілі сонячної радіації, наприклад, наведені в довідниках для України [1, 2]. Причому коло літературних джерел може бути розширений тільки в разі повного узгодження з концепціями цих робіт і наведеними в них даними. Нижче пропонується розрахункова методика, побудована на суворому дотриманні цього принципу.

Почнемо з розрахунку падаючої радіації. Загальноприйнято, що горизонтальна поверхня сприймає пряму радіацію з інтенсивністю $e_{s\leftrightarrow}$ і розсіяну радіацію з інтенсивністю $e_{d\leftrightarrow}$

$$e_{\leftrightarrow} = e_{s\leftrightarrow} + e_{d\leftrightarrow}. \quad (1.4)$$

Величина e_{\leftrightarrow} іменується сумарною радіацією. Якщо приймач розташований похило, то це відбивається, на значеннях e_s для прямої радіації і розсіяної e_d

$$e_{\beta} = e_s \sin \beta + e_{d\leftrightarrow} \cos \beta, \quad e_{d\beta} = e_{d\leftrightarrow} \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (1.5)$$

де β - кут нахилу поверхні відносно горизонтальної площини, $e_{s\uparrow}$ - інтенсивність прямої радіації на вертикальну площадку. Крім того, на похилу поверхню

чинить додатковий вплив і відбивна здатність земної поверхні, що визначається як

$$\dot{a}_{o\beta} = A\dot{a}_{\leftrightarrow} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1.6)$$

де альbedo поверхні A залежить від характеристики поверхні [3]. Таким чином, результуюча дія сонячної радіації на похилу поверхню буде

$$\dot{a}_{s\beta} = \dot{a}_{s\beta} + \dot{a}_{r\beta} + \dot{a}_{o\beta} = \dot{a}_{s\uparrow} \sin \beta + \dot{a}_{s\leftrightarrow} \cos \beta + \dot{a}_{d\leftrightarrow} \frac{1 + \cos \beta}{2} + (\dot{a}_{s\leftrightarrow} + \dot{a}_{d\leftrightarrow}) \frac{1 - \cos \beta}{2}. \quad (1.7)$$

Тут перші два доданки складають пряму радіацію, третій - розсіяну, четвертий - відбивну, а їх сума - падаючу радіацію. Отже, для обчислення $e_{s\beta}$ необхідно мати дані про пряму радіацію на горизонтальну і вертикальну поверхні, про розсіяну радіації на горизонтальну поверхню і про альbedo A . Останнє зазвичай коливається в межах 0,1 - 0,4 і, як правило, дією відбивної здатності нехтують. Значення $e_{s\uparrow}$, $e_{s\leftrightarrow}$, $e_{d\leftrightarrow}$, змінюються протягом доби, залежать від безлічі погано передбачуваних погодних факторів, а $e_{s\uparrow}$ - ще й від орієнтації вертикальної поверхні. Тому при розрахунках тривалого періоду роботи сонячних колекторів слід спиратися на середньомісячні дані, що наводяться в [4, 5]. Що стосується даних про $e_{s\uparrow}$, то, на відміну від [5], досить докладна інформація міститься в монографії [8]. Причому, що важливо, чисельні значення однойменних величин в [6, 8] практично збігаються.

Альтернативою залежності (1.7) міг бути розрахунковий алгоритм, представлений в нормах проектування [8], який базується на даних роботи [6]. Згідно [5] інтенсивність падаючої сонячної радіації для будь-якого положення сонячного колектора знаходиться за формулою

$$\dot{a}_{s\beta} = P_s \dot{a}_{s\leftrightarrow} + P_d \dot{a}_{d\leftrightarrow} \quad (1.8)$$

де P_s, P_d – коефіцієнти положення сонячного колектора для прямої та розсіяної радіації відповідно. При розрахунку параметрів розсіяної радіації використовується вираз для P_d

$$P_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} = \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right), \quad (1.9)$$

а коефіцієнт для прямої радіації P_s вибирається згідно з таблицею в Додатку 3 норм [2] в залежності від місяця року, широти місцевості і кута нахилу колектора до горизонту. Однак підраховані таким чином значення $e_{s\uparrow}$ для вертикальних поверхонь ($\beta = 90^\circ$) не збігаються з даними, наведеними в [5, 8].

Для північної півкулі оптимальною є південна орієнтація сонячних колекторів з можливими відхиленнями на схід до 20° , на захід - до 30° . Відповідно до загальноприйнятих рекомендацій кут нахилу сонячних колекторів до горизонту β вибирається рівним широті місцевості при цілорічній роботі, в літній період - широті місцевості мінус $10 - 15^\circ$, а в опалювальний сезон - широті місцевості плюс $10 - 15^\circ$. Тут доречно зауважити, що рівняння дозволяє визначити оптимальний кут нахилу розрахунковим шляхом. Перша і друга похідні функції по куту β будуть

$$\begin{aligned} \frac{de_{c\beta}}{d\beta} &= e_{s\downarrow} \cos \beta - e_{s\leftrightarrow} \sin \beta - 0,5e_{d\leftrightarrow} \sin \beta, \\ \frac{d^2 e_{c\beta}}{d\beta^2} &= -e_{s\downarrow} \sin \beta - (e_{s\leftrightarrow} + 0,5e_{d\leftrightarrow}) \cos \beta. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Оскільки друга похідна при $\beta [0, \pi/2]$ завжди негативна, то рішення першого рівняння, прирівняного нулю, дає значення кута, при якому $e_{c\beta}$ буде найбільшим. Результати розрахунку β для м. Києва ($50,5^\circ$ П.Ш.). При південній орієнтації виявилися наступними (по місяцях року, починаючи з січня): $53,44^\circ$; $50,21^\circ$; $38,47^\circ$; $24,91^\circ$; $16,90^\circ$; $14,06^\circ$; $15,69^\circ$; $23,12^\circ$; $35,43^\circ$; $49,47^\circ$; $50,51^\circ$; $57,18^\circ$. Середнє значення в холодний період (жовтень - березень) дорівнювало $49,9^\circ$, а в теплий (квітень - вересень) - $21,6^\circ$. Середньорічний кут - $35,8^\circ$. Якщо

орієнтуватися на загальноприйнятій рекомендації, то кути повинні бути: для холодного періоду 60 - 65°, для теплого - 35 - 40° при середньорічному - 50°. Розрахунки з урахуванням помісячного зміни зазначених вище кутів нахилу колекторів дали збільшення падаючої радіації на 3% протягом квітня - вересня і на 2% за період жовтень - березень порівняно з даними при незмінному оптимальному середньорічному куті 35°, що цілком зрозуміло. У той же час слід зазначити істотну розбіжність між значеннями оптимального середньорічного кута і загальноприйнятого за рекомендаціями.

Що стосується добової зміни сонячної радіації, то тут можна скористатися даними, наведеними в таблиці 10 довідника [2]. Побудовані добові графіки змін сумарної радіації по місяцях року свідчать про допустимість прийняття синусоїдального характеру зміни цієї величини протягом сонячно активного дня, що розділяють і автори роботи [8]. Там же наведені дані про середню тривалість активного світлового дня [6] і про середню температуру зовнішнього повітря на цьому часовому інтервалі дня для метеостанції Київ, Обсерваторія. За шість «теплих» місяців року (квітень - жовтень) сумарна щільність падаючої радіації складе 916 418 Вт·год/м², а на інші шість «холодних» доводиться 337969 Вт·год/м², що становить 36,9% від першого значення. Таким чином, не слід нехтувати сонячною енергією в холодний період року.

Відповідно до викладеного вище найбільш достовірними характеристиками сонячної активності є відомості про середньомісячні їх показники. Тому і розрахунок передбачуваної теплоти, яка сприймається сонячними колекторами, які працюють протягом тривалого періоду, повинен бути орієнтований на середньомісячні дані. Такий підхід повинен поширюватися і на теплоту, що віддається колектором проміжного теплоносія. Серед ряду методик, що визначають ККД сонячних колекторів $\eta_{с.к.}$, представляється кращою залежність, рекомендована фірмою Viessmann [11]

$$\eta_{\text{с.к.}} = \eta_{\text{с.к.}} - k_1 \frac{T_{\text{с.к.}} - T_{\text{ср}}}{q_{\text{ср}}} - k_2 \frac{(T_{\text{с.к.}} - T_{\text{ср}})^2}{q}, \quad (1.11)$$

де $T_{c,k}$ температура колектору, $T_{вз}$ – температура довкілля, $\eta_{оп}$ – оптичний ККД колектора, q_c – густина теплового потоку, що сприймається колектором, k_1, k_2 – емпіричні коефіцієнти. Наприклад, для колекторів Vitosol типу s/w 2,5 значення $\eta_{оп} = 0,826$, $k_1 = 3,68$ Вт/(м²·К), $k_2 = 0,011$ Вт/(м²·К²). Середньомісячний ККД по визначається середньомісячними значеннями величин, що входять в це рівняння. Середні значення для $T_{вз}$ відомі, а для q_c легко розраховуються з урахуванням тривалості активного світлового дня. Що стосується температури $T_{c,k}$, то вона практично відповідає температурі проміжного теплоносія T_v . Значення останньої можна оцінити, виходячи з таких міркувань.

Якщо здійснюється акумулювання теплоти контактом проміжного теплоносія, наприклад, з ґрунтовим акумулятором [7], то T_v практично не відрізняється від температури на зовнішній стінці теплообмінника T_0 . Різницю між T_v і температурою основної області акумулятора T_{oc} можна оцінити за допомогою залежності

$$T_v - T_{oc} = \frac{q_0 R_0}{\lambda_M}, \quad (1.12)$$

де зазвичай щільність теплового потоку на стінці ґрунтового теплообмінника $q_0 \approx 100$ Вт/м² при його радіусі $R_0 \approx 0,1$ м. Припустимо прийняти майже лінійним характер зміни $T_{oc}(t)$ при акумулюванні тривалістю τ_a . Тоді, знаючи початкову $T_{oc}(0) \approx T_M$ і кінцеву $T_{oc}(\tau_a)$ температури, просто знаходяться середньомісячні її та T_v значення

$$T_{oc}(t_{ср.мес}) = T_{oc}(0) + \frac{T_{oc}(\tau_a) - T_{oc}(0)}{\tau_a} t_{ср.мес}, \quad (1.13)$$

$$T_v(t_{ср.мес}) = T_{oc}(t_{ср.мес}) + \frac{q_0 R_0}{\lambda_1}.$$

де $t_{ср.мес}$ – відлік часу середини місяця від початку акумулювання.

Підставляючи $T_v(t_{ср.мес})$, знаходиться середньомісячний ККД сонячних колекторів. У разі істотного відхилення динаміки зміни $T_v(t_{ср.мес})$ від значень в

результаті детального розрахунку цього процесу відповідно вносяться ітераційні корективи. Якщо енергія, отримана від сонячного колектора, повністю витягується з проміжного теплоносія і його потенціал знижується до вихідного рівня, то температура T_B повинна відповідати T_{B3} . Такий режим характерний при роботі без акумулятора в циркуляційній системі проміжного теплоносія, наприклад, в цілорічних системах гарячого водопостачання з тепловим насосом. В такому випадку ККД виявляється найбільшим і визначається значенням $\eta_{оп}$.

Обчисливши середньомісячний ККД сонячних колекторів $\eta_{с.к.}$ встановлюється середньомісячне $e_{с.к.мес}$ кількість сонячної енергії сприйнятої проміжним теплоносієм. Для аналізу передбачуваної добової динаміки роботи сонячних колекторів в системі з проміжним теплоносієм пропонується такий алгоритм. Розраховується середньоденна корисна продуктивність сонячних колекторів $e_{с.к.д}$

$$e_{н.е.д} = \frac{e_{с.к.мес}}{\tau_{мес}} \eta_{н.е}, \quad (1.14)$$

де $\tau_{мес}$ – число днів у місяці. Знаючи тривалість активного світлового дня τ_c , встановлюється середня щільність теплового потоку, що припадає на одиницю поверхні колекторів $\langle q_{с.к} \rangle$

$$\langle q_{н.е} \rangle = \frac{e_{н.е.д}}{\tau_c}. \quad (1.15)$$

Потім за синусоїдальному закону обчислюється передбачуване максимальне його значення $q_{с.к.мах}$ і записується характер зміни $q_{с.к}(t)$ в інтервалі $[t_H, t_K]$

$$q_{с.к.мах} = \frac{\pi \langle q_{н.е} \rangle}{2}, \quad q_{с.к}(t) = q_{с.к.мах} \sin\left(\pi \frac{t - t_H}{\tau_H}\right), \quad (1.16)$$

де t_H – початок світлового дня і $t_K = t_H + \tau_c$ – його кінець.

Таким чином, запропонований метод визначення інтенсивності впливу сонячної радіації на похилу поверхню і алгоритми розрахунку теплосприйняття її сонячними колекторами.

2 СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

2.1 Світовий та вітчизняний досвід використання сонячних систем

На думку провідних учених у галузі нетрадиційної енергетики, потенціал сонячної енергії на Землі в 50 000 разів перевищує енергоспоживання населення в містах і будинках. Це високоефективне джерело енергії практично невичерпне, а методи перетворення і використання сонячної енергії засновані на екологічно чистих і безпечних процесах.

Про масштаби сучасного використання сонячної енергії для тепlopостачання і теплоспоживання свідчать такі статистичні дані [1, 2]. Загальна площа сонячних колекторів, що перебувають в експлуатації в Європейському Союзі (ЄС), до кінця 2004 року сягнула 13960000 м², а у світі - понад 1500000000 м². Середньорічний приріст площі сонячних колекторів у Європі становить понад 12%, а в деяких розвинених країнах - понад 20-30%. Світовим лідером за кількістю колекторів на одного жителя є Кіпр, де 90% будинків обладнано системами сонячного опалення, за ним ідуть Ізраїль, Греція та Австрія. Європейські країни є безперечними лідерами в розробці та впровадженні новітніх технологій для сонячних систем опалення, проте вони значно відстають від Китаю в плані введення в експлуатацію нових сонячних теплових установок.

За експертною оцінкою, що проведена в 2005 році, Європейською Федерацією промисловості сонячних теплових установок (ESTIF) техніко-економічний потенціал використання сонячних колекторів в системах теплопостачання тільки в країнах ЄС складає понад 1,4 млрд. м², що здатні виробляти більш 680000 ГВт·год теплової енергії за рік. Зараз в Європі функціонує 1110 сонячних систем теплопостачання з площею колекторів від 2400 до 8040 м², 220 систем з площею колекторів від 1000 до 1250 м² та 25 з площею колекторів від 500 до 1000 м².

Плани використання цих систем на найближчу перспективу передбачають впровадження та встановлення в цьому регіоні 100000000 м² колекторів до 2020 року.

В Російській Федерації за останні десять років за технологією ВАР «ІНСОЛАР-ІНВЕСТ», що спеціалізується в цій області розробки проектів та за участю Міністерства оборони Російської Федерації, розроблені та побудовані окремі об'єкти, на яких ефективно використовуються системи сонячного опалення такі, як «Енергоощадний дім» в мікрорайоні Нікуліно-2 міста Москви, «Енергоавтономна школа» в селищі Петрівське Ярославської області [15].

В Україні розробкою та впровадженням систем сонячного теплопостачання займаються Київський зональний проектний науково-дослідний інститут з громадянського будівництва (КиївЗНДІГБ), Інститут відновлювальної енергетики НАН України (ІВЕ НАН України), Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ НАН України) та інші науково-виробничі організації. Інститутом КиївЗНДІГБ були створені нормативної бази застосування геліоустановок, розроблені типові та експериментальні зразки проектів, проводяться роботи щодо створення нового та підвищення енергоефективності існуючого обладнання. КиївЗНДІГБ розробив низку загальних схем пасивного та активного сонячного обігріву будівель, які містять у собі комплекс архітектурних та конструктивних рішень для використання їх у будівництві нових та модернізації старих об'єктів будівництва. ІВЕ НАН України та ІТТФ НАН України розробляють схемні рішення систем децентралізованого сонячного теплопостачання. Особливостями вказаних

систем є комплексне вирішення питань опалення в умовах міської забудівлі та окремих будинків типа котеджу, створення великих геліоструктур значної теплової потужності для опалення промислових споруд.

За оцінкою фахівців вищезгаданих організацій очікується, що найбільш широке впровадження отримають системи гарячого водопостачання об'єктів сезонного функціонування (пансіонати, бази відпочинку та туризму), а також індивідуальних помешкань та будівель.

Відмінною рисою всіх запропонованих схем є відносна простота їх конструктивного виконання та використання, невелика матеріалоємність та капітальні затрати на спорудження, а також висока ефективність перетворення та використання сонячного випромінювання для потреб споживачів. Розрахунки свідчать про значну економію кількості органічного палива та значне покращення екологічного стану території, особливо в умовах міського будівництва.

2.2 Типові схеми систем теплозабезпечення з використанням сонячних колекторів

Сонячні системи теплопостачання та опалення для житлових, комерційних, промислових і технічних процесів є найбільш розвиненою сферою сонячних технологій. Існує безліч технічних і схемних рішень, розрахунків, конструкцій і способів монтажу. Системи опалення розрізняють на пасивні, активні та комбіновані.

До найбільш простих можна віднести установки з ємкісними водопідігрівачами, які застосовують для будинків з невеликим тепловим навантаженням. Для будівель із значним тепловим навантаженням застосовують системи з великими площинами поверхонь колекторів та акумуляторами великої ємності.

Сонячні системи гарячого водопостачання для житлових і промислових приміщень набули найбільшого поширення як в Україні, так і за кордоном. Це пов'язано з тим, що системи гарячого водопостачання не пред'являють таких

жорстких вимог до надійності, як системи опалення, у багатьох випадках можуть використовуватися автономно і мають значні економічні переваги. Крім того, в регіонах, розташованих на південь від 50° пн. ш., річна витрата тепла на підігрів води в будинках і побутових будівлях сягає 40 - 70%. Тому використання фотоелектричних установок може призвести до значної економії викопного палива за відносно низьких витрат.

У Бухаресті діє велика установка із сонячними тепловими колекторами загальною площею 5 000 м², встановлена на дахах 45 будівель [13]. Загальна ємність акумуляторів становить 200 м³. Насоси, теплообмінники та інше обладнання встановлено на спеціальних станціях. В установці використовується двоконтурна система (рис. 1). Перший контур створюється за допомогою теплової мережі. Влітку в нього надходить 50 % енергії, необхідної для нагрівання води.

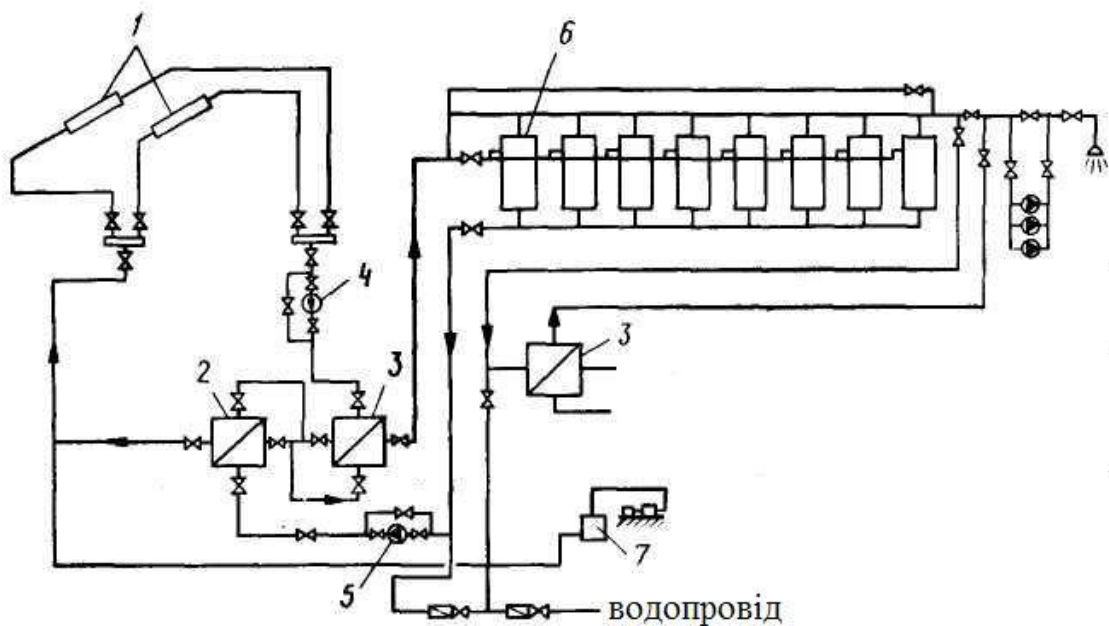


Рисунок 2.1 – Принципова спрощена схема системи гарячого водопостачання мікрорайону в м. Бухарест

1 – сонячні колектори на будинках; 2 – теплообмінники сонячного контуру; 3 – теплообмінники дублера; 4 – насос сонячного контуру; 5 – насос для подачі холодної води; 6 – баки-акумулятори; 7 – розширювальна ємність.

На курорті Мамайя експлуатується декілька систем гарячого водопостачання комплексу готелів. Сонячні колектори загальною площею понад 2,5 тис. м² встановлені на плоских дахах будівель, а також виконані у вигляді сонцезахисних навісів над стоянками автівок. Системи двоконтурні (рис. 2.2) [14]. Насоси та теплообмінники розміщені у спеціальних тепловпунктах, поблизу яких встановлені вертикальні напірні акумулятори загальною місткістю близько 1000 м³. Дублюючим джерелом теплоти є котельня на рідкому паливі.

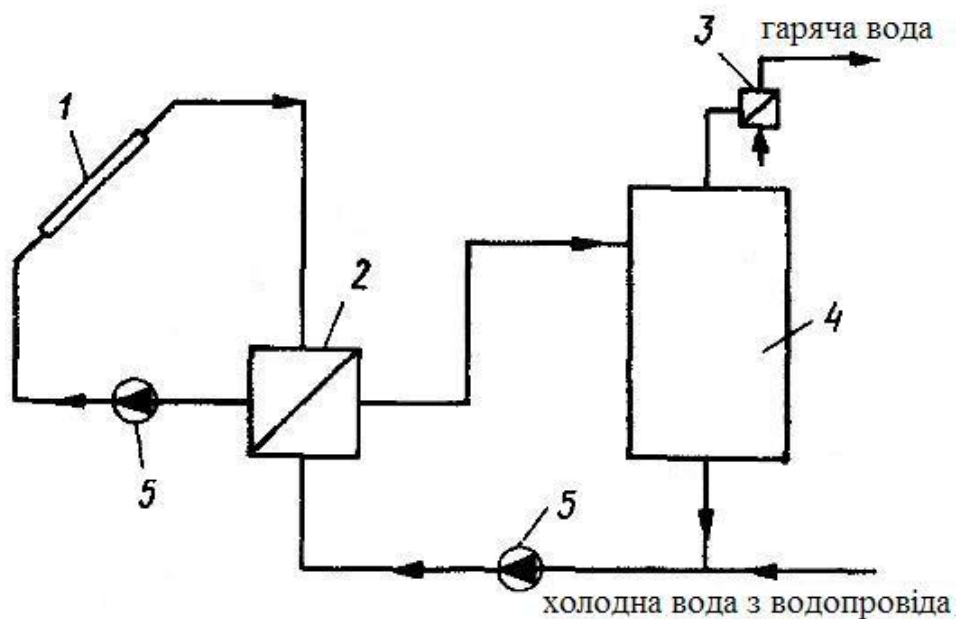


Рисунок. 2.2 – Принципова спрощена схема системи гарячого водопостачання курорту Мамайя

1 – сонячні колектори; 2 – теплообмінник сонячного контуру;
3 – теплообмінник дублера; 4 – бак-акумулятор; 5 – насос.

В багатьох країнах світу проводяться інтенсивні пошуки енергоефективних рішень систем сонячного опалення, в основному для малоетажних будинків, з використанням в якості теплоносія як рідин, так і повітря.

КиївЗНДІГБ розробив типову систему сонячного теплопостачання та опалення чотирьохкімнатного житлового будинку мансардного типу (рис. 2.3).

Автономна система сонячного теплопостачання містить у собі комбіновану сонячно-теплонасосну установку, яка призначена для задовільнення потреб опалення (розрахункові втрати будинку близько 11 кВт) та гарячого водопостачання протягом всього року. Система складається з чотирьох контурів: теплосприймального циркуляційного, контурів теплонасосної установки, опалення та водопостачання.

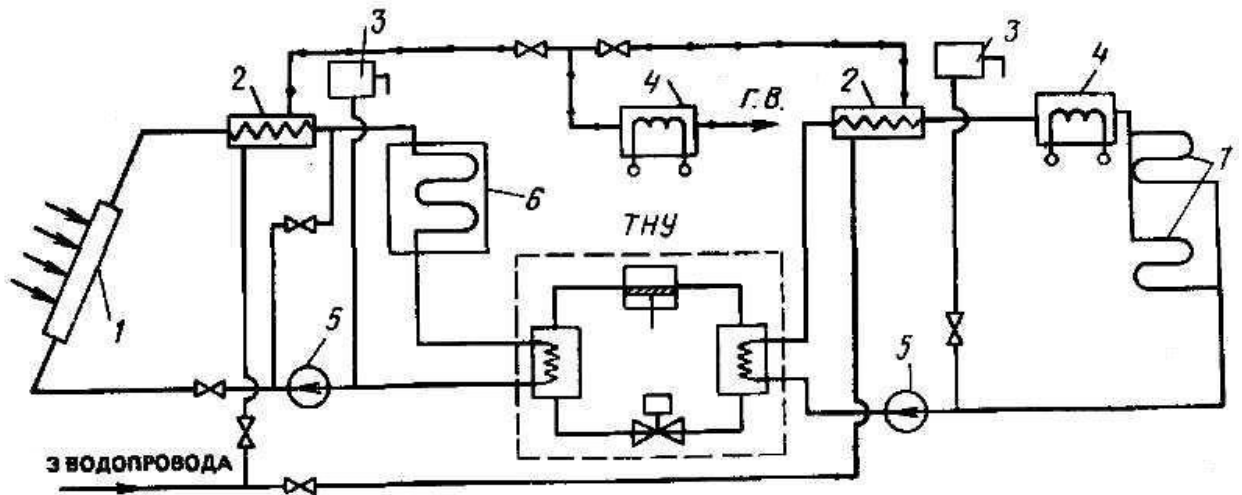


Рисунок 2.3 – Принципова спрощена схема КиївЗНДІГБ системи теплопостачання та опалення житлового будинку з теплонасосною установкою
1 – сонячні колектори; 2 – теплообмінник; 3 – розширювальний бак;
4 – електроводонагрівач; 5 – насос; 6 – бак-акумулятор; 7 – опалювальні панелі.

До складу обладнання теплосприймаючого контуру входять сонячні колектори, теплообмінник типу "труба в трубі" та бак-акумулятор ємкістю 16 м³. Сонячні колектори конструкції КиївЗНДІГБ з двохшаровим склопакетом загальною площею 70 м² розміщені в рамі на південному схилі даху будинку під кутом 55° до горизонту. У якості теплоносія використаний 45%-й розчин етиленгліколю. Теплообмінник розміщено під дахом, інше устаткування в підвальному приміщенні будинку.

Теплонасосна установка представлена компресійно-конденсаторним холодильним агрегатом АК1-9 з теплопродуктивністю 11,5 кВт та потужністю, що витрачається близько 4,5 кВт. Робочим агентом є фреон-12. Компресор –

поршневий безсальниковий, конденсатор та випарник – кожухотрубний з водяним охолодженням. До складу обладнання контуру опалення входять циркуляційний насос, опалювальні прилади типу "Комфорт", проточний водонагрівач ЕПВ-2 у якості дублера. До контуру гарячого водопостачання входять ємкісний (0,4 м³) водонагрівач типу СТД з поверхнею теплообміну 0,47 м² та кінцевий водонагрівач БАС-10/М4-04 потужністю 1 кВт. Циркуляційні насоси всіх контурів – типу ЦВЦ, безсальникові, вертикальні, безфундаментні та малошумні.

Теплоносій передає теплоту від колекторів воді в баці-акумуляторі фреону в випарнику теплового насосу. Пароподібний фреон після стиснення в компресорі конденсується в конденсаторі та нагріває при цьому воду у системі опалення та водопровідну воду у системі тепlopостачання.

За відсутності сонячної радіації та використанні теплоти, яка є у баку-акумуляторі, теплонасосна установка вимикається та тепlopостачання будинку здійснюється повністю за рахунок електроводонагрівачів. Взимку теплонасосна установка знаходиться у роботі тільки за визначеного рівня від'ємних температур зовнішнього повітря (не нижче -7°C) з тим, щоб уникнути замерзання води у баці. Влітку система гарячого водопостачання забезпечується теплотою за рахунок природної циркуляції теплоносія через теплообмінник типу "труба в трубі". В результаті реалізації різних режимів роботи комбінована сонячно-теплонасосна установка дозволяє заощадити теплоти близько 40 ГДж/рік.

В місті Сімферополь в Криму працює сонячно-паливна котельня, схемне рішення якої було розроблено в ЕНІН ім. Кржижанівського у м. Москва (Російська Федерація). Проект був реалізований для гарячого водопостачання та опалення готелю "Спортивний" (рис. 2.4).

Котельня працює наступним чином. З теплообмінника нагріта вода потрапляє в проміжний бак-акумулятор. Якщо вода має температуру нижче заданої (42...44°C), то вона повертається за рахунок рециркуляції знову до теплообмінника. При досягненні заданої температури вода зливається до

основного бака-акумулятора, а звідти подається споживачу. За необхідності, теплоносії підігрівається в теплообміннику котельні водою.

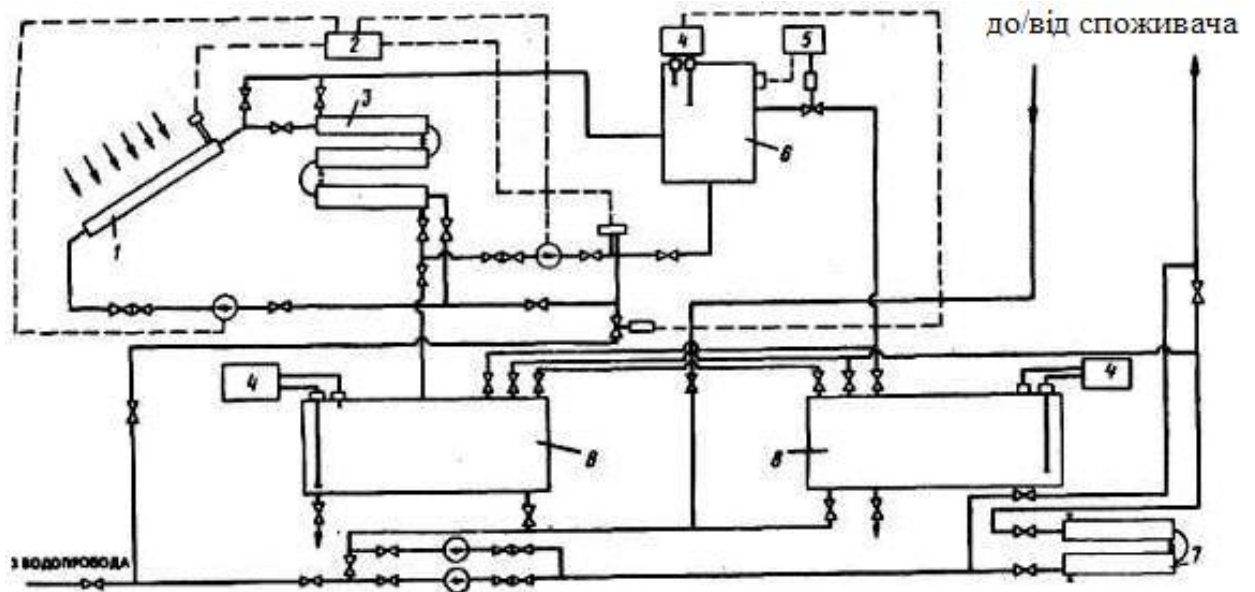


Рисунок 2.4 – Принципова спрощена схема сонячно-паливної котельні у готелі "Спортивний" м. Сімферополь

1 – сонячні колектори; 2 – диференційний терморегулятор;
3 – теплообмінник; 4 – електронний сигналізатор рівня;
5 – електроконтактний термометр; 6 – проміжний бак-акумулятор;
7 – бойлер котельні; 8 – бак-акумулятор нагрітої води.

Геліосистема, яка виконана у вигляді добудови до існуючої котельні, проста в експлуатації. Сонячні колектори загальною площею 204 м² розташовані на опорній конструкції поряд з готелем та зорієнтовані на південь. Колектори об'єднані до 8 секцій (40 одиниць у кожній), а секції, у свою чергу, до двох блоків. З'єднання колекторів до секцій – паралельно-послідовне, а секцій у блоки – паралельне.

В селі Кропивне Золотоноського району Черкаської області експлуатується сонячно-електрична котельня, яка призначена для гарячого водопостачання та опалення відгодівельного комплексу (рис. 2.5).

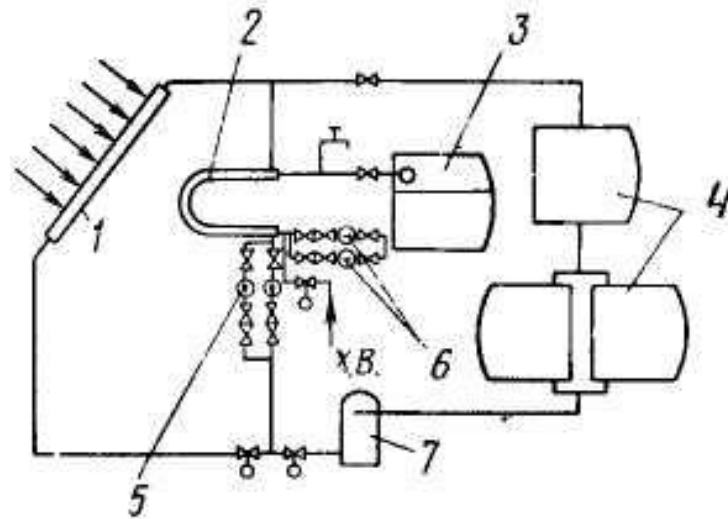


Рисунок 2.5 – Принципова спрощена схема сонячно-електричної котельні (с. Кропивне Золотоноського району Черкаської обл.)

1 – сонячні колектори; 2 – теплообмінник; 3 – бак-акумулятор контуру споживання; 4 – бак-акумулятор контуру накопичування; 5, 6 – насоси; 7 – електрокотел.

Вона складається з існуючої електрокотельні та побудованої сонячної приставки для попереднього нагріву води. В денний час теплоносій циркулює по контуру: сонячні колектори – теплообмінник – насос. Одночасно в контурі споживання відбувається наповнення бака водопровідною водою, яка нагріта в теплообміннику. В нічний час теплоносій нагрівається в контурі дублера: електрокотел, що використовує нічну непікову електроенергію – баки контуру накопичення – насос. В період відбору теплоносій циркулює по контуру: бак-акумулятор контуру накопичення – теплообмінник – насос. Гаряча вода з бака контуру споживання подається через теплообмінник, де підігрівається до параметрів, які потрібні споживачу. Захист від замерзання – випорожнення. ККД системи – 45%. Сонячні колектори загальною площею 225 м² встановлені на ґрунті під кутом 40° до горизонту та зорієнтовані на південь.

2.3 Висновки та рекомендації щодо впровадження сонячних установок

При проектуванні сонячних установок теплопостачання розміщення колекторів є одним з найбільш складних питань із-за їх великої площини (для гарячого водопостачання потрібно 1...2 м² на одну людину, а для опалення – 0,4...0,5 м² на 1 м² площини приміщення). При цьому необхідно брати до уваги необхідну орієнтацію та нахил робочої поверхні, а також можливість технічного огляду, очищення та можливого ремонту колекторів.

Геліотехнічні розрахунки показали, найкращою орієнтацією колекторів на рівнинному характері місцевості є південь з можливим відхиленням на схід та захід у межах 15...20°. Кут нахилу залежить від умов експлуатації установок. Для цілорічних систем він дорівнює приблизно широті місцевості, для систем сезонної (влітку) дії – 15...20°, для опалення – широті місцевості плюс 15...18°. Розрізняють два принципово відмінних прийоми розміщення колекторів: в структурі будівлі та окремо. Перший прийом є більш економічним, бо дозволяє не використовувати спеціальні каркасні опори, а сам колектор може виконувати функцію огорожувальних конструкцій будинку. Найбільш простим та зручним з точки зору експлуатації є розміщення колекторів на даху (рис. 2.6).

Впровадження сонячно-паливних та сонячно-електричних котелень та сонячних приставок до діючих котелень, можна розглядати як найбільш перспективне направлення використання сонячної енергії для потреб теплопостачання тощо. Економія органічного палива, що досягається за рахунок використання таких установок складає 100...150 кг у.п. за рік з 1 м² колекторів. Це дає змогу рекомендувати їх будівництво на нових, діючих або тих, що реконструюються, котельнях.

Взагалі, дефіцит та подорожчання органічного палива, а також стрімке погіршення екологічної ситуації довкілля спонукає на пошук нових альтернативних джерел енергії. Виходячи з цього, сонячна енергія є практично невичерпним та найбільш доступним джерелом енергії. Тому, найбільш перспективним є впровадження систем, які це використовують для потреб життєзабезпечення населення в будь-якій країні.

3 ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ, ЩО ІНТЕГРОВАНІ В ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ

3.1 Розвиток проектування об'єктів, що використовують системи сонячного теплопостачання в складі огороджувальних конструкцій

Критичний аналіз наявних систем сонячного опалення енергоефективних будівель і споруд показує, що перспективними є системи, що включають сонячні колектори в зовнішню оболонку. Щодо аналізу приймання сонячної енергії в зовнішніх огороджувальних конструкціях енергоефективних будівель опубліковано роботи: О.Л. Підгорного, В.С. Буравченка, С.І. Орла, О.В. Пугачова, О.В. Сергійчука, Н.І. Мартинова, В.Л. . Снісаренко, М. Садиков, М. Бооронбаєв, В.І. Заприводе, Ф.Д. Шодієв та інші. Однак сьогодні відомі методи розрахунку систем сонячного теплопостачання недостатньо повно враховують відбите сонячне випромінювання.

Більшість досліджень щодо сонячних теплових колекторів, інтегрованих в огороджувальні конструкції будівель, присвячена повітряним системам, проте рідинні системи також стають популярними та потребують окремих досліджень і розроблення спеціальних методів їхнього розрахунку. Розробленню проблем проектування енергоефективних будівель з активними та пасивними системами сонячного теплового опалення присвячено роботи Д. Арчибальда, В.А. Бекмана, В.Н. Богословського, Д. Бріттла, В.Г. Горобця, Д. Даффа, Д. Даффіл, В.В. Горобця, Д. Даффі, О.Є. Денисова, О.Т. Дворецького, Т.К. Ернст, В.М. Желих, К.Є. Золотька, К.Ю. Кондратьєва, С. Кудрі, Л. Накашидзе, А. Пелегріні, В. Плоского, О. Приймака, О. Редька, О. Сергійчука, І. Стаценко, В. Фейста, Г. Фаренюка та ін.

Однак дослідження цих авторів необхідно продовжити, щоб отримати багатofакторні результати щодо теплових властивостей зовнішніх огорожувальних конструкцій, що перетворюють сонячну енергію на теплоту, та енергоефективних систем теплопостачання будівель на їхній основі.

Таким чином, проблема енергоефективного теплопостачання будівель системою теплопостачання, що поєднує сонячні колектори та зовнішні огорожувальні конструкції, може бути розв'язана шляхом розвитку теоретичних та експериментальних досліджень і впровадження нових систем теплопостачання, елементами яких є новітні технологічні рішення з використанням рідких теплоносіїв, а саме сонячних ефективність зовнішньої огорожувальної конструкції в перетворенні енергії в тепло, тобто на основі сонячних вікон, сонячних стін і сонячних покриттів,

Тому для поліпшення теплопостачання енергоефективних будівель з комбінованими теплоенергетичними системами необхідно провести великі дослідження параметрів їхніх теплових властивостей.

3.2 Аналіз потенціалу сонячної енергії, що надходить на територію України

Під час інтегрального оцінювання кількості сонячної енергії доцільно окремо виділити її надходження на горизонтальну поверхню посезонно та в опалювальний період. У результаті аналізу посезонних коливань сонячної енергії на території України за рік встановлено, що сумарна (пряма та розсіяна) сонячна радіація має найбільше значення у весняно-літній сезон (рис. 3.1).

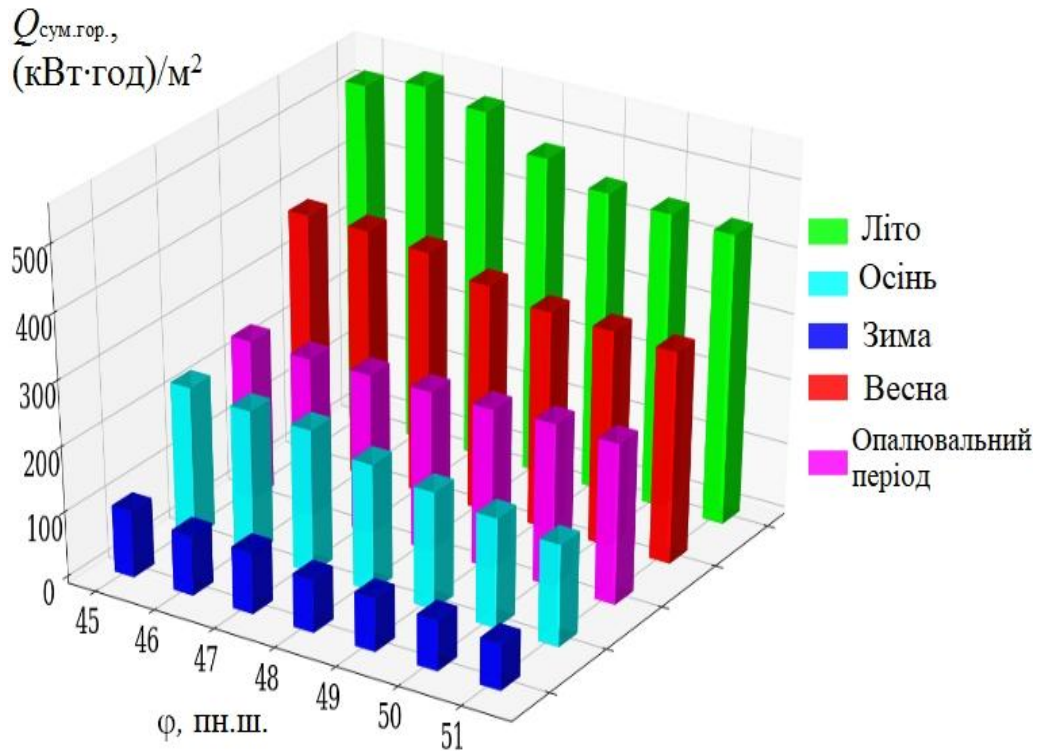


Рисунок 3.1 – Загальна кількість сумарної сонячної радіації $Q_{\text{сум.гор.}}$, $(\text{kWh}\cdot\text{год})/\text{m}^2$, посезонно та в опалювальний період в Україні, що надходить на горизонтальну поверхню за умов середньої хмарності відповідно до географічної широти

В опалювальний період сумарна сонячна енергія є більшою, ніж у зимовий, на 60 % і достатньою для часткового зменшення використання традиційних джерел енергії.

Кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на поверхню впродовж року, отримано для низки міст України: Харкова, Сімферополя, Одеси, Запоріжжя, Чернівців та Чернігова. Зокрема, отримані результати для міста Київ відображені на рис. 3.2.

Також визначено узагальнені значення сумарної сонячної радіації помісячно для зазначених вище міст. На основі цього одержано апроксимаційні рівняння для визначення кількості сонячної енергії, що надійшла на поверхню певної орієнтації.

Середньомісячна розсіяна сонячна радіація в опалювальний період, яка надходить на горизонтально орієнтовану поверхню, є більшою, ніж пряма, в 1,2

– 1,6 рази. Крім того, за середніми значеннями альбедо було оцінено і враховано рівень відбитої сонячної радіації.

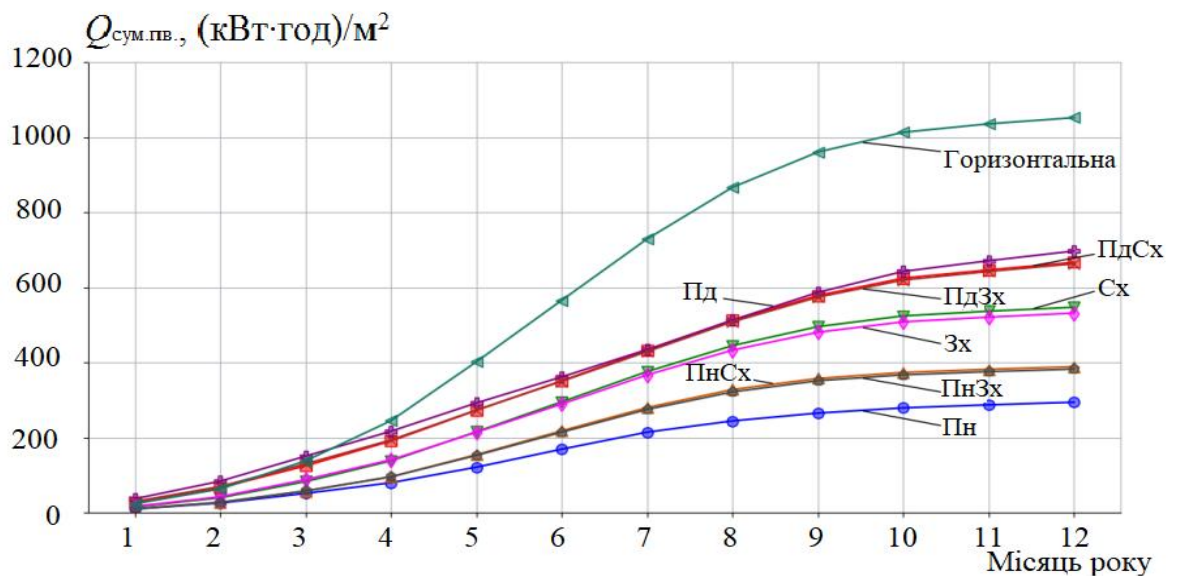


Рисунок 3.2 – Кількість сумарної сонячної радіації $Q_{\text{сум. пв.}}$, (кВт·год)/м², що надходить на поверхні різної орієнтації для м. Київ

За операційними даними NASA середнє значення альбедо для широтного поясу, до якого належить Україна, є значно більшим від його планетарного значення (29,57%) і становить 38%. Сьогодні існують карти середнього значення альбедо для території України. На основі аналізу цих відомостей отримано дані щодо кількості відбитої радіації для міст України та отримано графічні залежності повної (прямої, розсіяної та відбитої) середньомісячної кількості сонячної радіації (рис. 3.3).

У результаті проведеного аналізу статистичних даних про надходження сонячної радіації на поверхню території України та оброблення результатів аналітичних досліджень побудовано карту повної сонячної енергії, особливістю якої є наявність складової відбитої радіації на вертикальну поверхню (рис. 3.4).

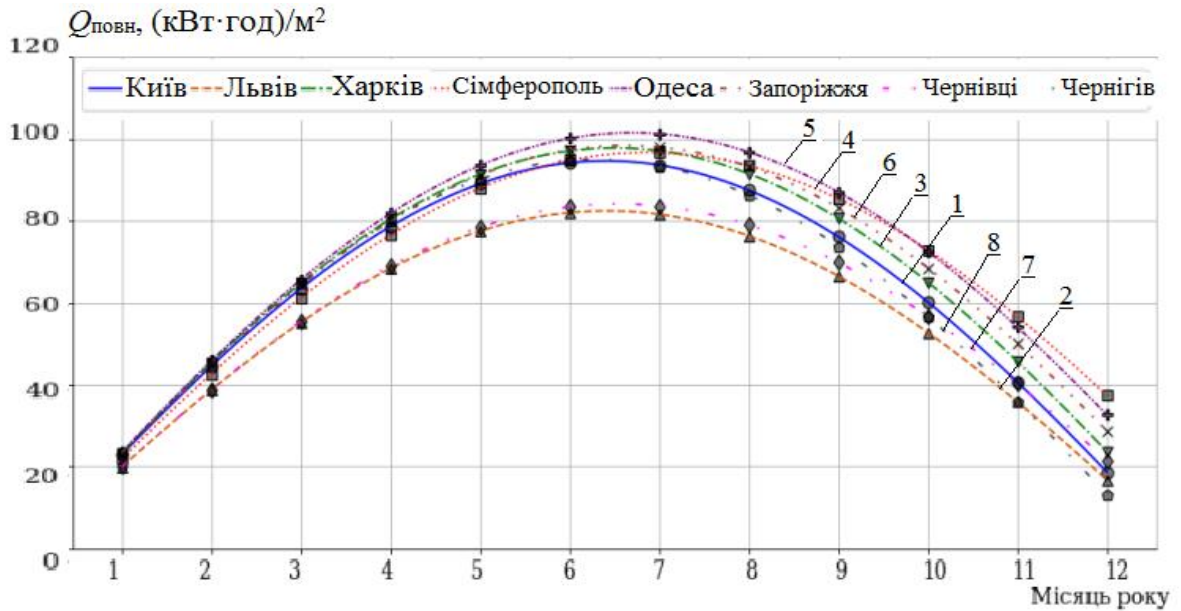


Рисунок 3.3 – Середньомісячна кількість повної сонячної радіації $Q_{повн.}$, (кВт·год)/ m^2 , за умов середньої хмарності на вертикальну поверхню південної орієнтації: 1 – Київ; 2 – Львів; 3 – Харків; 4 – Сімферополь; 5 – Одеса; 6 – Запоріжжя; 7 – Чернівці; 8 – Чернігів

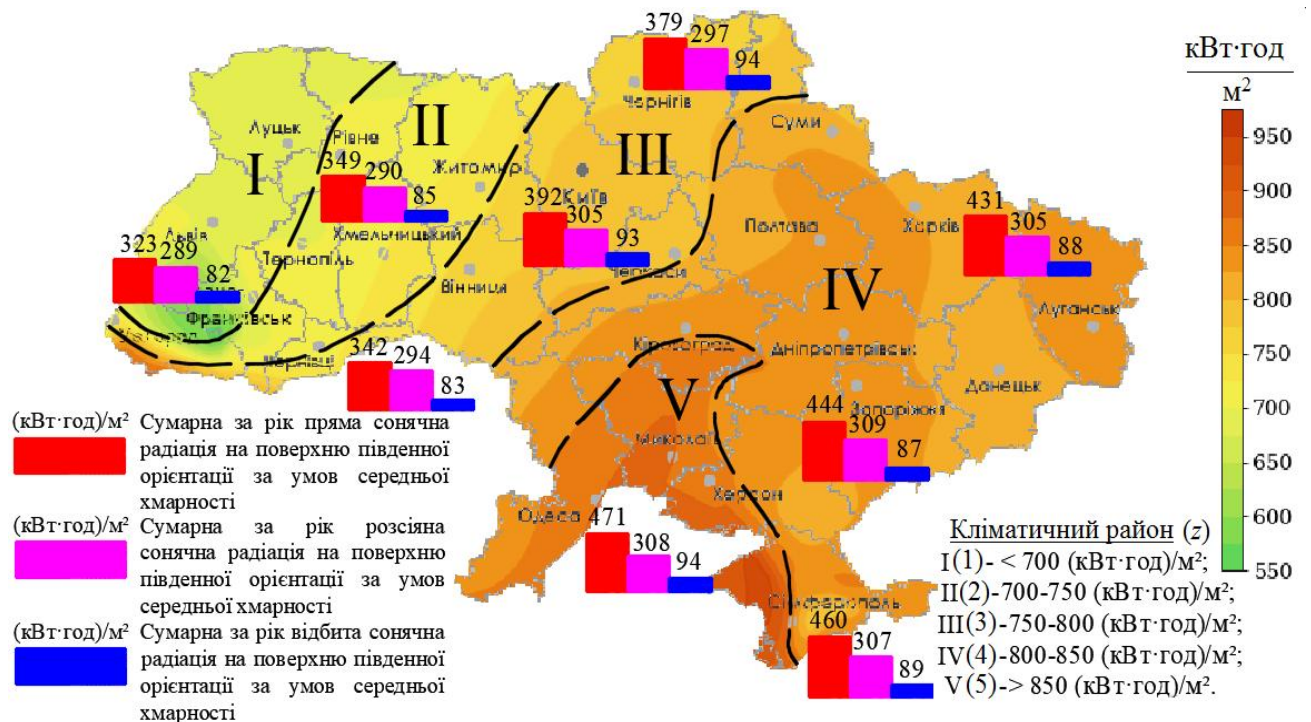


Рисунок 3.4 – Річний потенціал повної сонячної радіації на вертикальну поверхню південної орієнтації

З рис. 3.4 видно, що потенціал повної сонячної радіації, що надходить на вертикальну поверхню південної орієнтації на території України, становить 550–950 кВт·год/м². Отже, було встановлено, що енергетичний потенціал сонячної радіації на горизонтальну та на вертикальну поверхні є достатнім для використання системами теплозабезпечення енергоефективних будівель, тому було запропоновано оригінальні рішення конструкцій зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії в теплову (геліопокриття (ГП), геліостіни (ГС), геліовікна (ГВ)), які зображено на рис. 3.5 – 3.7. Так, на рис. 3.5 показано геліопокриття, яке є одночасно геліоколектором та покриттям будівлі.

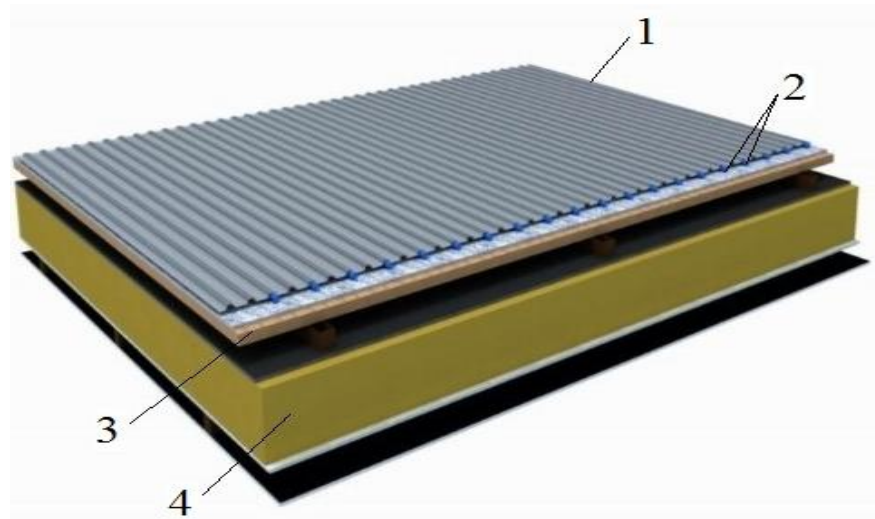


Рисунок 3.5 – Геліопокриття:

1 - гофрований металевий лист (теплопоглинач); 2 - труби контуру циркуляції охолоджувального теплоносія; 3 - теплоізоляція; 4 - несуча конструкція даху.

На рис. 3.6 зображено геліостіну – геліоколектор, конструктивно поєднаний із зовнішнім огороженням будівлі.

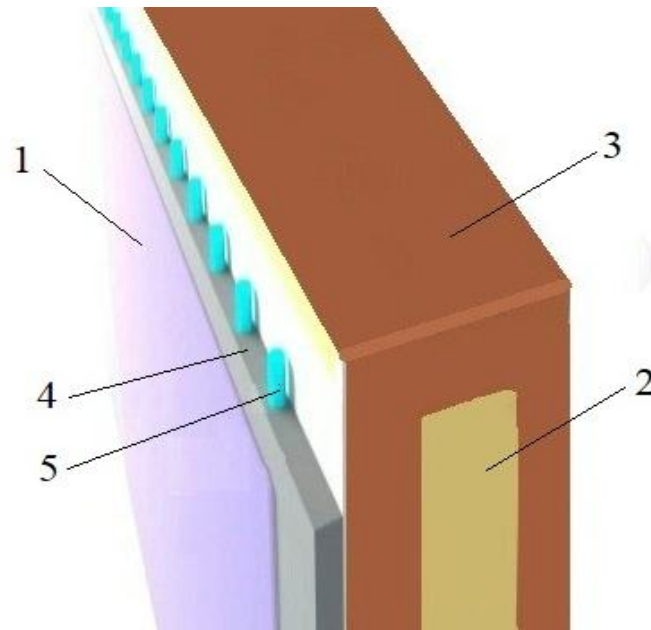


Рисунок 3.6 – Геліостіна:

1 - світлопрозорі огороження, 2 - теплоізоляція, 3 - несучі стінові конструкції, 4 - теплопоглинальний шар, 5 - трубки контуру циркуляції охолоджувального теплоносія.

На рис. 3.7 зображено геліовікно, що є частиною світлопрозорого огороження будівлі. Зокрема для технічних приміщень, в яких не потрібна оглядовість, можна застосовувати варіант виконання геліовікна із гребінкою (рис. 3.7, а), а в іншому випадку – з теплообмінником (ТО) (рис. 3.7, б).

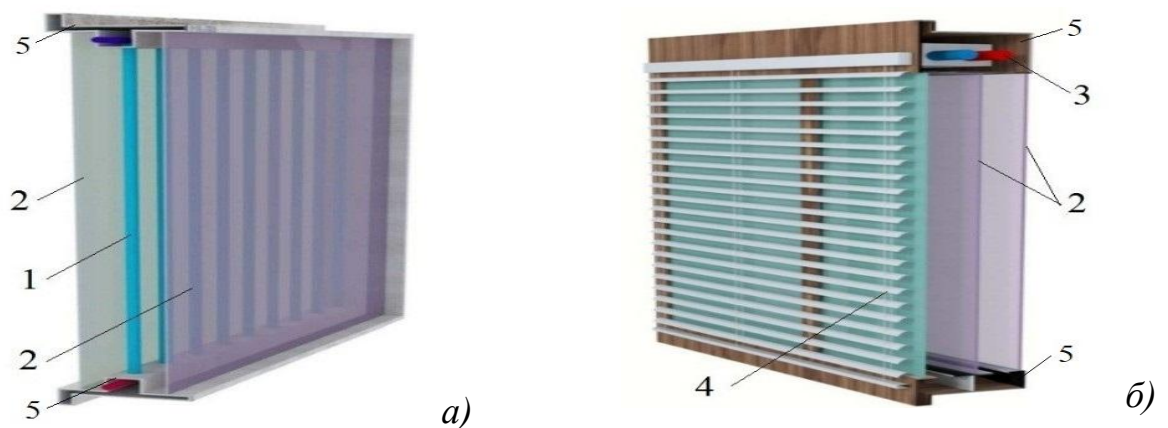


Рисунок 3.7 – Геліовікно з гребінкою (а) та теплообмінником (б): 1 – гребінка; 2 – світлопрозоре огороження; 3 – теплообмінник; 4 – жалюзі; 5 – корпус.

3.3 Математичне моделювання теплових процесів в елементах геліопокриття

Для вивчення роботи системи теплопостачання енергоефективної будівлі виконано теоретичні та експериментальні дослідження запропонованих конструкцій геліопокриття, геліостіни та геліовікна.

Під час оцінювання теплової ефективності геліопокриття було чисельно визначено енергетичний баланс та здійснено моделювання теплових процесів в елементах геліопокриття (рис. 3.8). Було прийнято такі спрощення і припущення: потік сонячної енергії рівномірно розподілений на поверхні матеріалу покриття; теплопоглинаюча поверхня та її трубки циркуляції теплоносія перебувають в ідеальному тепловому контакті; вважалось, що випромінювальні характеристики поверхонь не є у взаємозв'язку із довжиною хвиль.

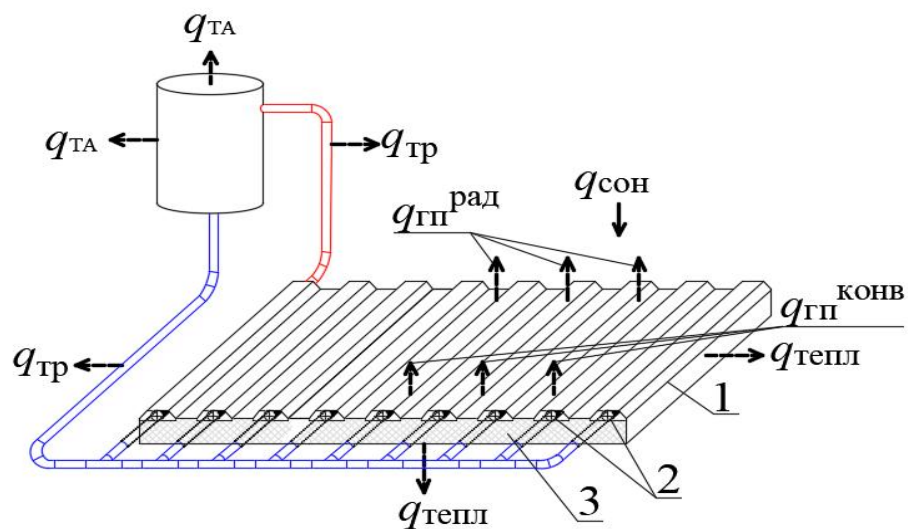


Рисунок 3.8 – Схема теплових потоків у системі з геліопокриттям:

- 1 – геліопокриття; 2 – трубки контуру циркуляції теплоносія;
3 – теплоізоляція.

Для оцінки ефективності роботи геліопокриття складено таке рівняння теплового балансу

$$\frac{dQ_{\text{ак}}}{d\tau} = q_{\text{сон}}(\tau) - q_{\text{ГП}}^{\text{конв}}(t) - q_{\text{ГП}}^{\text{рад}}(t) - q_{\text{тепл}}(t) - q_{\text{ТА}}(t) - q_{\text{ТР}}(t), \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{ак}}$ – кількість енергії, закумульованої в тепловому акумуляторі (ТА), Дж; $q_{\text{сон}}$ – сонячна радіація, що надходить на поверхню геліопокриття, Вт; $q_{\text{ГП}}^{\text{конв}}$ – конвективні втрати тепла із поверхні теплопоглинача, Вт; $q_{\text{ГП}}^{\text{рад}}$ – втрати тепла із поверхні теплопоглинача випромінюванням, Вт; $q_{\text{тепл}}$ – втрати тепла теплопровідністю, Вт; $q_{\text{ТА}}$ – тепловтрати теплового акумулятора, Вт; $q_{\text{ТР}}$ – тепловтрати трубопроводів, Вт; τ – час, с; t – температура теплоносія, °С.

Доповнивши це рівняння початковою умовою $t(0) = t_0$, отримано задачу Коші, розв'язавши яку встановлена залежність зміни температури теплоносія в тепловому акумуляторі за різної густини потоку випромінювання впродовж часу (рис. 3.9).

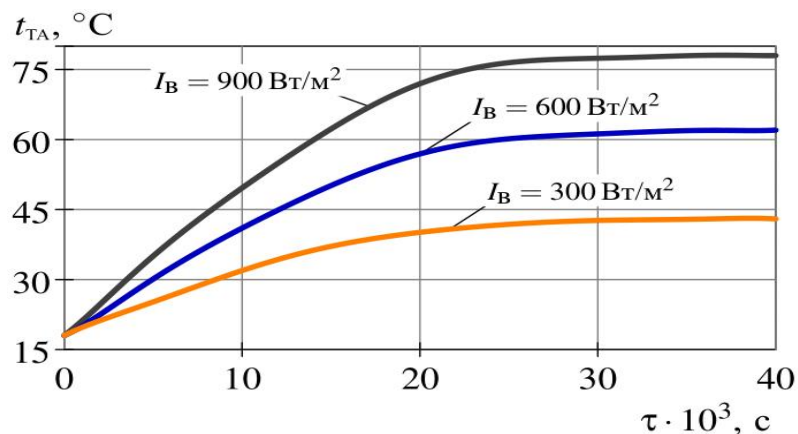


Рисунок 3.9 – Залежність зміни температури води в тепловому акумуляторі $t_{\text{ТА}}$, °С від густини потоку випромінювання $I_{\text{В}}$, Вт/м², впродовж часу τ , с

Крім того, був проаналізований вплив швидкості та напрямку вітрового потоку на коефіцієнт тепловіддачі геліопокриття (рис. 3.10).

Встановлено, що значення коефіцієнта тепловіддачі геліопокриття в разі наявності прозорого покриття змінюється від 4 до 12,5 Вт/(м²·°С) за зміни швидкості потоку повітря від 1 до 6 м/с.

У результаті теоретичних досліджень теплової стійкості запропонованої конструкції геліостіни в теплий період року з урахуванням необхідності

підтримання нормованого теплового стану в приміщеннях було встановлено, що кількість теплоти, яка надходить у приміщення через геліостіну, в 10 разів менша, ніж кількість теплоти за нормованого термічного опору відповідно до ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель».

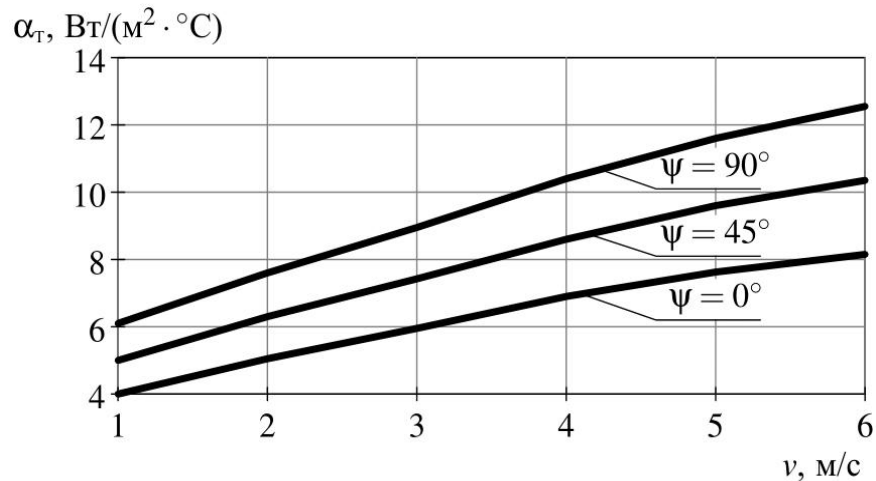


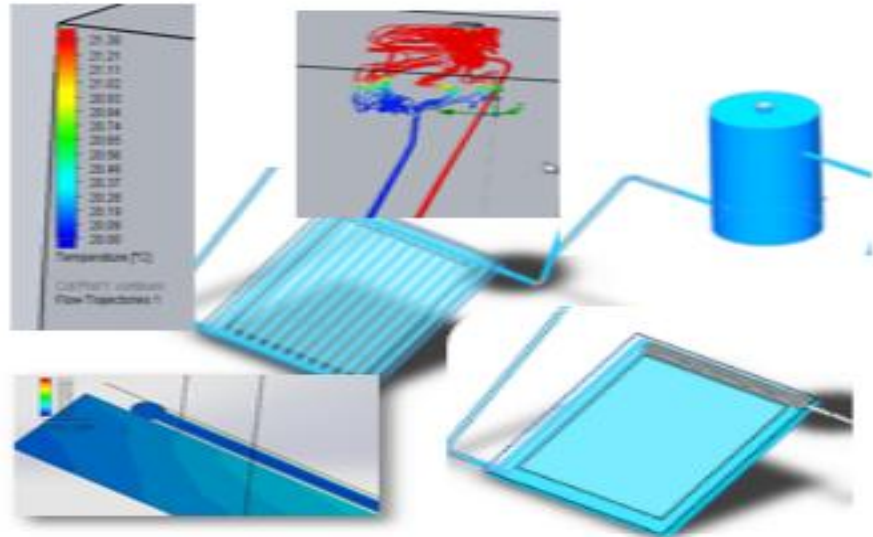
Рисунок 3.10 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі геліопокриття з прозорим покриттям α_t , Вт/(м²·°С), від швидкості v , м/с та напрямку ψ , град, повітряного потоку

Для встановлення доцільності використання елементів систем сонячного теплопостачання, які інтегровані в конструкції зовнішніх огорожень, було проведено комп'ютерне моделювання теплових процесів. На рис. 3.11 зображено будинок, що містить геліопокриття, геліостіну та геліовікно.

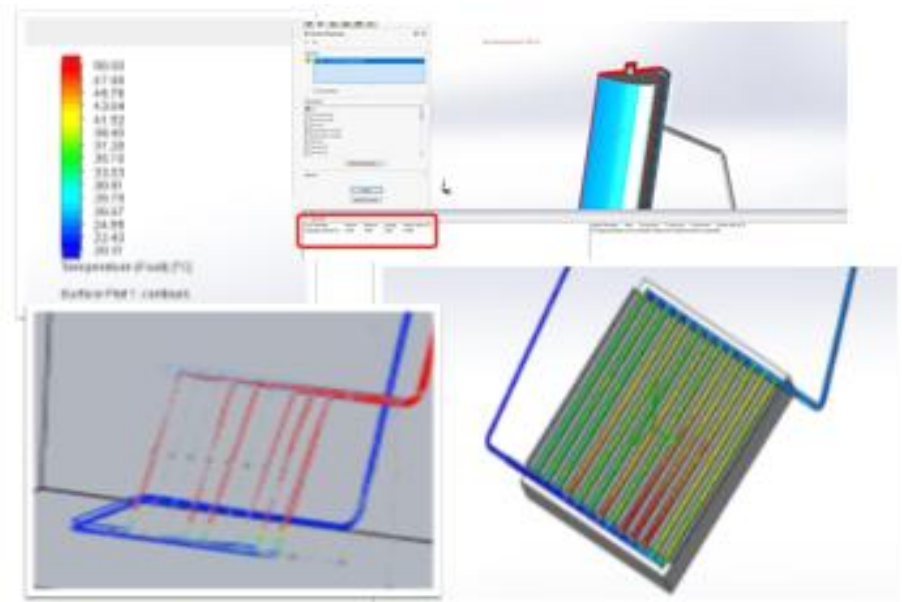


Рисунок 3.11 – Комп'ютерна модель енергоефективної будівлі із геліопокриттям (1), геліостіною (2) та геліовікном (3)

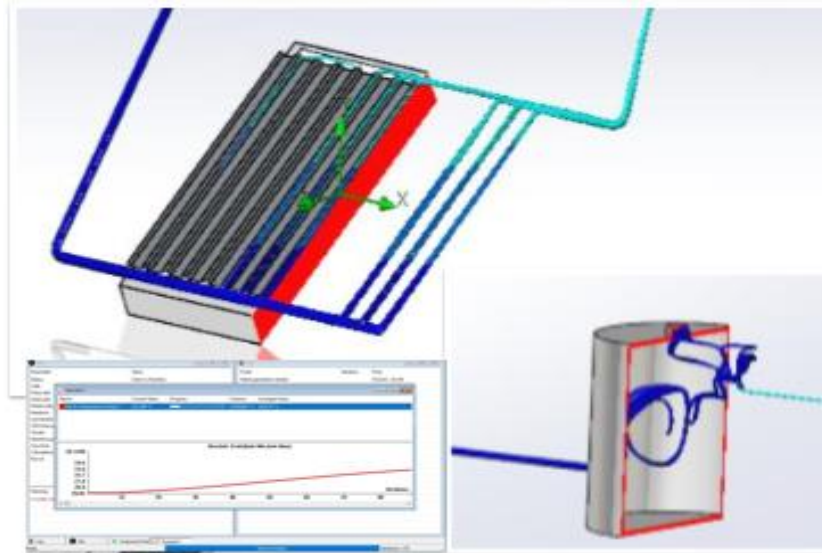
З метою визначення ефективності застосування геліостіни, геліовікна та геліопокриття було розглянуто ці елементи окремо та змодельовано їхню роботу. Сонячна радіація під час моделювання змінювалась відповідно до запрограмованих значень (рис. 3.12), а як теплоносій для всіх подальших досліджень прийнято воду.



a)



б)



в)

Рисунок 3.12 – Моделювання нагрівання теплоносія за рахунок сонячного випромінювання в моделях: геліовікна (а); геліостіни (б); геліопокриття (в)

У результаті здійсненого моделювання процесу акумуляції сонячного випромінювання геліопокриттям, геліостіною та геліовікном визначено, що миттєва теплова потужність за природної циркуляції теплоносія для геліопокриття становила 540 Вт/м^2 , геліостіни – 500 Вт/м^2 , геліовікна – 370 Вт/м^2 , а середній ККД геліопокриття становить $0,60$, геліостіни – $0,55$, а геліовікна – $0,41$, це свідчить про теплову ефективність та перспективність застосування цих систем, а отже, про необхідність подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

Було проведено аналітичні дослідження роботи теплового акумулятора (ТА), оскільки вони можуть працювати за значної стратифікації теплоносія по висоті, що не завжди враховується під час розрахунку цих систем. Представлено математичну модель розподілу температур теплоносія в теплому акумуляторі для умовних шарів стратифікації з урахуванням теплових характеристик.

У результаті числового моделювання отримано графічні залежності розподілу температур теплоносія за висотою теплового акумулятора залежно

від кількості умовних шарів стратифікації, зокрема, результати для значення $n = 10$ представлено на рис. 3.13.

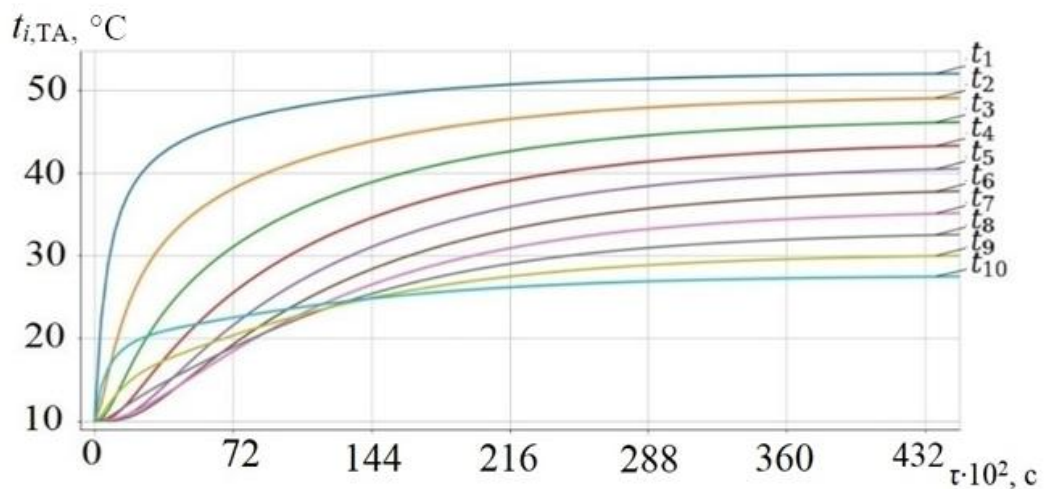


Рисунок 3.13 – Розподіл температур умовних шарів теплоносія $t_{i,ТА}, \text{°C}$ за висотою теплового акумулятора

Встановлено, що для теплового акумулятора з прийнятими десятьма умовними шарами стратифікації теплоносія температура верхнього шару теплоносія досягає значення 52°C , а нижнього 27°C , тоді як у випадку двох шарів – 45°C та 35°C відповідно, що дає можливість обумовлювати важливість урахування стратифікації теплоносія для одержання необхідної точності розрахунків, а також раціонального розміщення відповідного теплообмінного обладнання. Тому в роботі було встановлено залежність відносної похибки температури теплоносія в тепловому акумуляторі від кількості шарів стратифікації, і на основі цих даних визначено, що за врахування 10 шарів стратифікації відносна похибка під час розрахунків температури теплоносія в тепловому акумуляторі не перевищуватиме 5 %.

Наступним етапом досліджень було визначення теплових характеристик комбінованої системи тепlopостачання на основі зовнішніх огорожень-перетворювачів сонячної енергії у теплову (ЗОПСЕТ) (рис. 3.14).

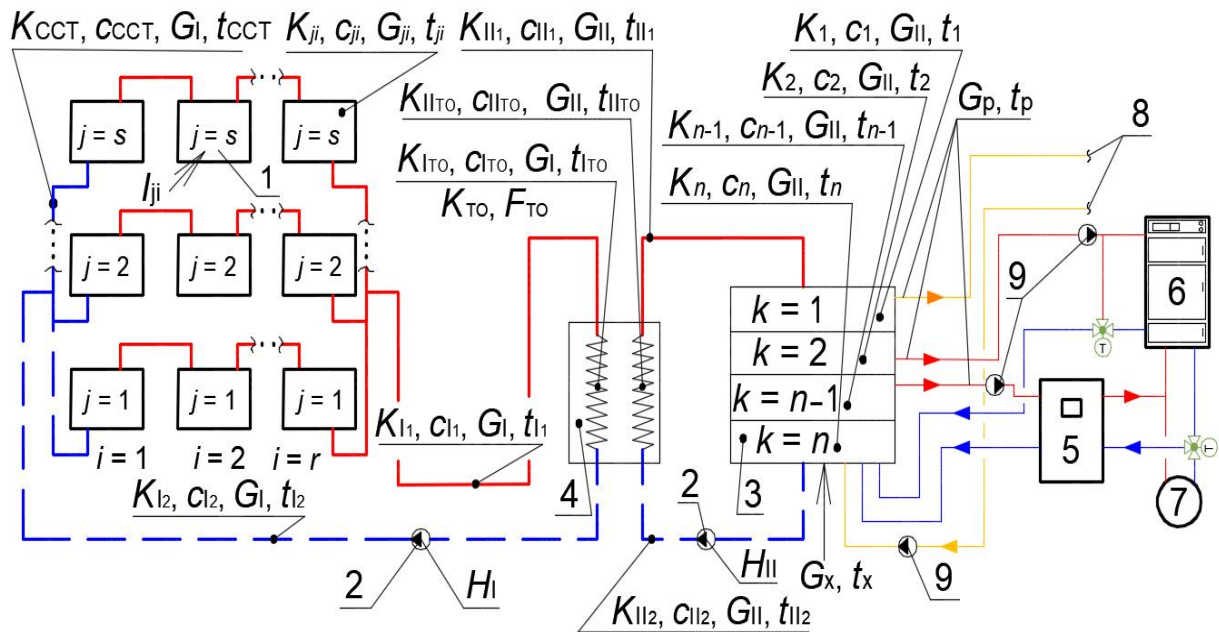


Рисунок 3.14 – Схема комбінованої системи теплопостачання на основі ЗОПСЕТ: 1 – ЗОПСЕТ; 2 – циркуляційний насос ССТ; 3 – ТА; 4 – ТО; 5 – тепловий насос; 6 – котел; 7 – система опалення; 8 – від/до СГВП; 9 – циркуляційний насос СТ.

4 ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛОТУ

Розділ присвячений визначенню теплової ефективності системи теплопостачання на основі ЗОПСЕТ і їхніх теплотехнічних характеристик у лабораторних умовах за впливу на них визначальних факторів та плануванню експериментів і математичному опрацюванню результатів досліджень, які наведені у графічній, табличній та аналітичній формах.

Було досліджено теплову ефективність геліопокриття із тепловим акумулятором та встановлено його теплотехнічні характеристики у випадку розміщення трубок контуру циркуляції теплоносія під або над теплопоглиначем, а також за наявності та відсутності прозорого покриття.

4.1 Експериментальна установка з дослідження ефективності геліопокриття із тепловим акумулятором

Установка складалася з геліопокриття, теплового акумулятора, джерела теплового випромінювання і приладів для вимірювання. Особливістю геліопокриття є те, що його теплопоглинач виготовлений із рифленого матеріалу для покриття будівлі (рис. 4.1).

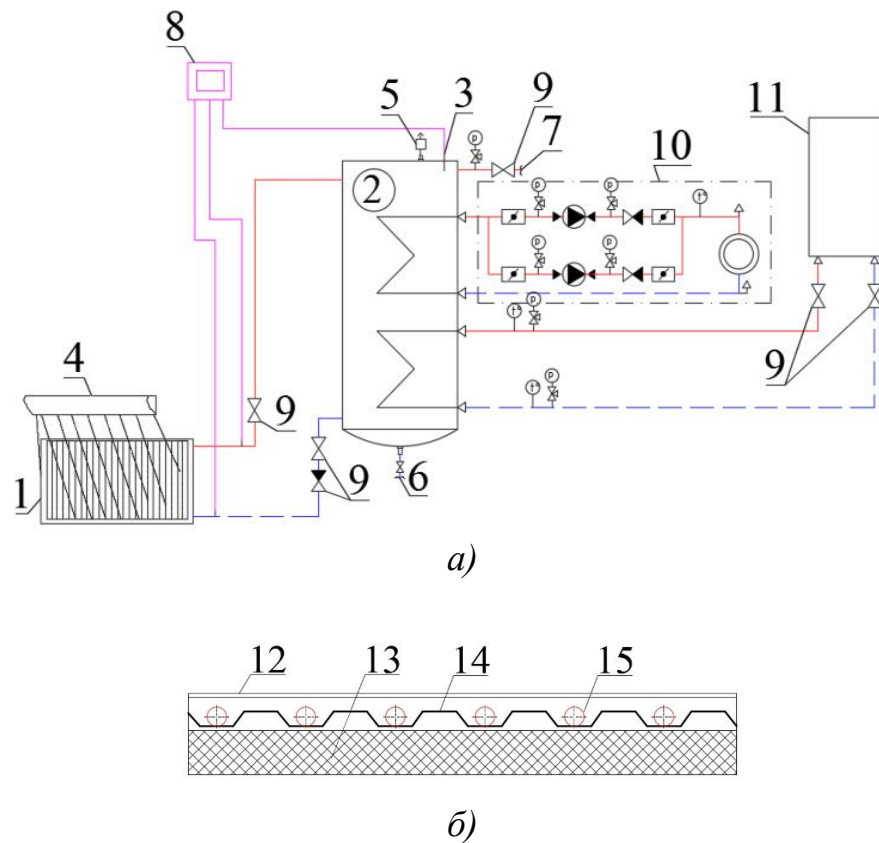


Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки (а) та геліюпокриття (б):

1 – ГП; 2 – тепловий акумулятор; 3 – термометри опору; 4 – джерело теплового випромінювання; 5 – вихід повітря; 6 – вилив теплоносія; 7 – подача теплоносія до споживача; 8 – дисплей; 9 – запірно-регулювальна арматура; 10 – група насосна; 11 – котел; 12 – прозоре покриття; 13 – теплоізоляція; 14 – теплопоглинач; 15 – труби контуру циркуляції теплоносія.

Під час планування експерименту визначальними факторами обрано: x_1 – азимутальний кут повороту геліюпокриття, α , град; x_2 – кут нахилу геліюпокриття, β , град; x_3 – густина потоку випромінювання I_b , Вт/м².

У якості параметра оптимізації було обрано коефіцієнт, що характеризує теплову ефективність геліюпокриття $K_{\text{еф}}$:

$$K_{\text{еф}} = \frac{Q_i}{Q_{\text{ст}}} \cdot 100, \quad (4.1)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – кількість тепла, яка була накопичена в тепловому акумуляторі за кутів надходження потоку випромінювання $\alpha = 90^\circ$ і $\beta = 90^\circ$ та густини потоку випромінювання $I_b = 900 \text{ Вт/м}^2$, Дж; Q_i – отримана тепла енергія системою за зміни обраних факторів, Дж.

4.2 Результати експериментальних досліджень геліопокриття

Усі дослідження були проведені за трьох режимів руху теплоносія через ЗОПСЕТ: прямої подачі, вимушеної або природної його циркуляції.

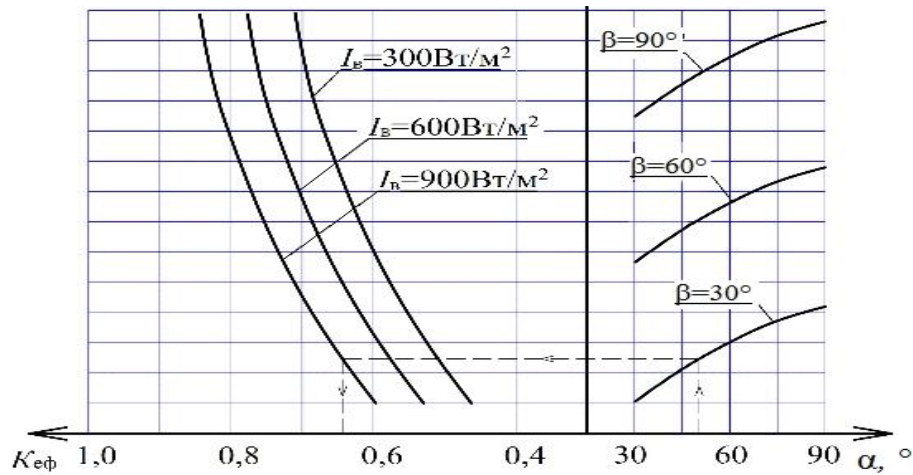
У результаті проведених експериментальних досліджень геліопокриття з трубками контуру циркуляції теплоносія над теплопоглиначем з прозорим покриттям у системі тепlopостачання за природної циркуляції теплоносія одержано таке рівняння регресії

$$K_{\text{еф}} = 0,714 + 0,028x_1 + 0,072x_2 + 0,075x_3 + 0,009x_2x_3. \quad (4.2)$$

Аналіз цього рівняння показує, що найбільший вплив на коефіцієнт термічної ефективності $K_{\text{еф}}$ прозорих геліопокриттів з трубками циркуляції охолоджуючої води, розташованими над радіатором, має густина потоку випромінювання I_b , Вт/м^2 , тоді як вплив кута нахилу β , градусів геліопокриття та кута азимутального повороту α , градусів геліопокриття є незначним. На основі статистичної обробки результатів дослідження була розроблена номограма для визначення коефіцієнта ефективності $K_{\text{еф}}$ геліопокриття (рис. 4.2).

Дослідження геліопокриттів без прозорих покриттів в умовах природної циркуляції теплоносія за допомогою циркуляційної трубки, розміщеної під радіатором системи тепlopостачання, показало, що при зміні кута входу α і β з 90° до 30° їх ефективність зменшилася на 67% і 32% за наявності прозорих

покриттів. Це було виявлено. Також було виявлено, що при зміні кутів входу α і β від 90° до 30° теплова ефективність прозорих сонячних покриттів без покриття з циркуляційними трубками охолоджувальної води на радіаторі зменшилася на 50%.

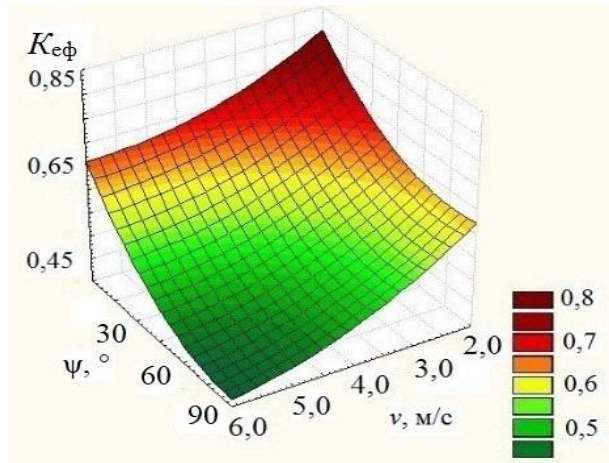


Рисуно 4.2 – Номограма взаємозв'язку коефіцієнта теплової ефективності геліюпокриття $K_{\text{эф}}$, що містить прозоре покриття у системі теплозабезпечення з природнім рухом теплоносія та кутів надходження β і α , град, та густини потоку випромінювання $I_{\text{в}}$, Вт/м^2

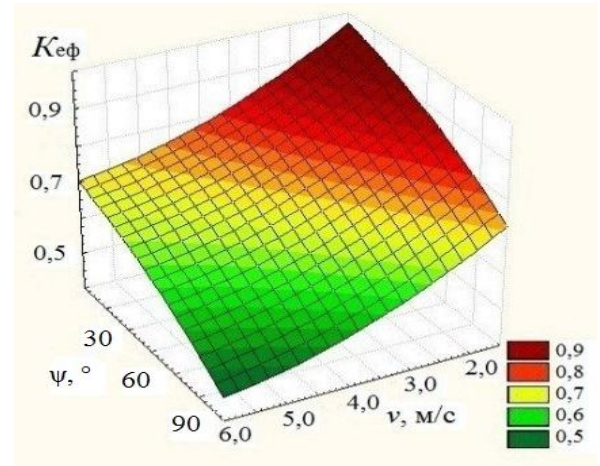
Крім того, отримано графоаналітичні залежності коефіцієнта теплової ефективності геліюпокриття $K_{\text{эф}}$ без прозорого покриття з розташуванням під або над теплопоглиначем циркуляційних трубок у системі тепlopостачання з прямою подачею теплоносія, а також за вимушеної його циркуляції від азимутального кута повороту α , кута нахилу β та густини потоку випромінювання $I_{\text{в}}$, що теж було покладено в основу створення методики інженерного розрахунку ЗОПСЕТ.

Дослідження впливу зовнішніх чинників на теплову ефективність сонячних покриттів без прозорих покриттів проводили в режимі природної циркуляції теплоносія під впливом таких чинників: x_1 – швидкості потоку повітря v , м/с; x_2 – напрямку потоку повітря ψ , град, що визначається кутом між площиною теплопоглинача та вектором руху; x_3 – густини потоку

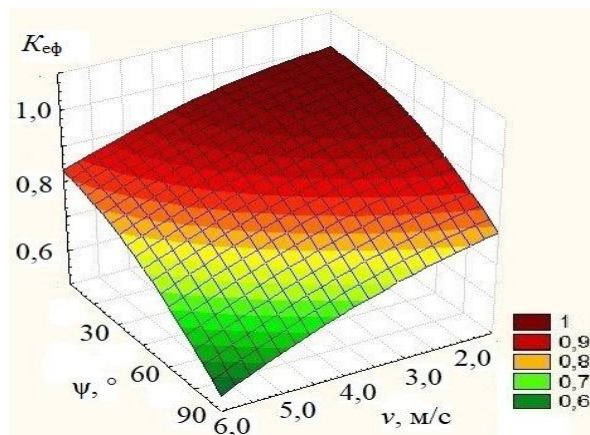
випромінювання I_b , Вт/м² (рис. 4.3). Функцією відгуку тут обрано коефіцієнт теплової ефективності $K_{\text{еф}}$ – відношення загальної величини теплоти, яку отримано системою тепlopостачання із геліюпокриттям за різних швидкостей і напрямів потоку повітря та густини потоку випромінювання, до загальної кількості тепла, що одержано за швидкості потоку повітря 2 м/с та густини потоку випромінювання 900 Вт/м².



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнта теплової ефективності геліюпокриття $K_{\text{еф}}$ без прозорого покриття в системі тепlopостачання від швидкості v , м/с, та напрямку ψ , град, потоку повітря за густини потоку випромінювання:

$$I_b = 300 \text{ Вт/м}^2 \text{ (а); } I_b = 600 \text{ Вт/м}^2 \text{ (б); } I_b = 900 \text{ Вт/м}^2 \text{ (в)}$$

На підставі аналізу коефіцієнтів рівняння регресії зроблено висновок про те, що значний вплив на теплову ефективність геліопокриття, яке не містить прозорого покриття у СТ із природним рухом теплоносія, виявляє швидкість потоку повітря, а його напрям впливає не так сильно. Використовуючи результати експериментальних даних, розроблено номограму (рис. 4.4).

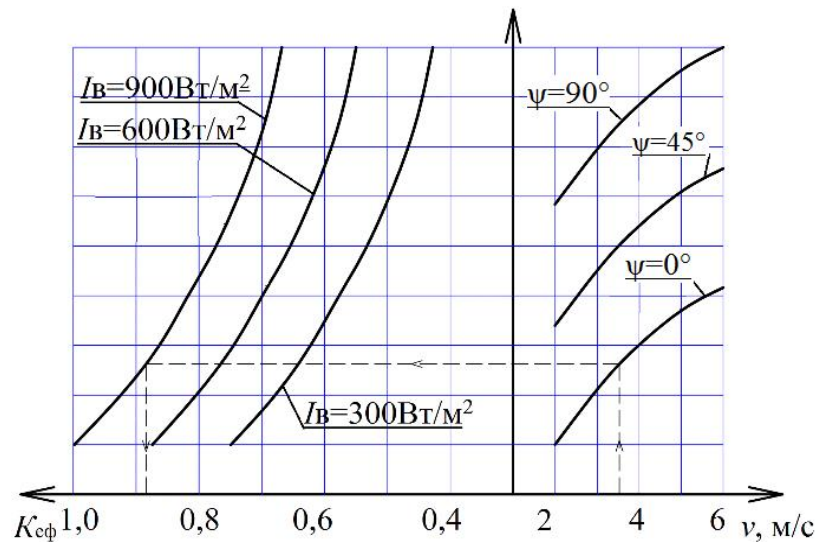


Рисунок 4.4 – Номограма взаємозалежності коефіцієнта теплової ефективності геліопокриття без прозорого покриття $K_{эф}$ від швидкості v , м/с, напрямку ψ , град, потоку повітря та густини потоку випромінювання I_v , Вт/м², у системі теплозабезпечення із природною циркуляцією теплоносія.

На основі номограми було запропоновано залежності, що встановлюють зв'язок між коефіцієнтами теплової ефективності сонячних покриттів $K_{эф}$ та швидкості потоку повітря v і його напрямку ψ й густини потоку випромінювання I_v . Такі самі експериментальні дані було отримано і для конструкції геліопокриття із прозорим покриттям і використано в розробці методики інженерного розрахунку ЗОПСЕТ.

Визначено, що ефективність системи теплопостачання із геліопокриттям без наявності прозорого покриття із природним рухом теплоносія за дії на нього потоку повітря знижується до 45 %, а за наявності прозорого покриття – до 35 %.

Крім того, варто зазначити, що експериментальні дослідження теплових характеристик системи теплопостачання із геліопокриттям засвідчили, що його

теплова ефективність з прозорим покриттям у режимі прямої подачі теплоносія за варіювання кутів падіння потоку випромінювання α і β від 90° до 30° зменшується на 39 %, а за зміни швидкості потоку повітря від 2 до 6 м/с та його напрямку від 0° до 90° – знижується на 20 %.

4.3 Комплексні експериментальні дослідження теплової ефективності геліостіни із теплопоглиначем

Наступним етапом дослідної роботи були комплексні експериментальні дослідження теплової ефективності геліостіни із теплопоглиначем, що містить трубки циркуляції теплоносія у вигляді гребінки, а в іншому випадку – змійовика. Установа складалась із геліостіни, теплового акумулятора, джерела випромінювання та вимірювальних приладів (рис. 4.5).

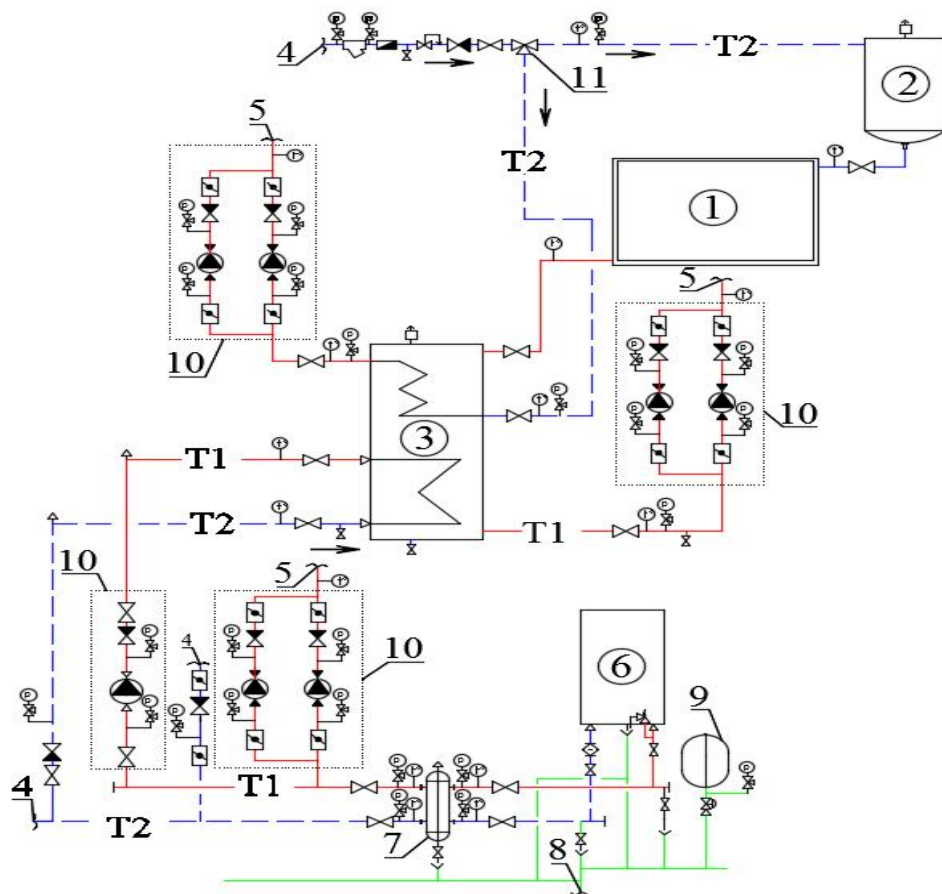


Рисунок 4.5 – Схема експериментальної установки:

1 – ГС; 2 – бак холодної води; 3 – теплоакумулятор; 4 – патрубок подавання теплоносія; 5 – патрубок відбирання теплоносія до споживачів; 6 –

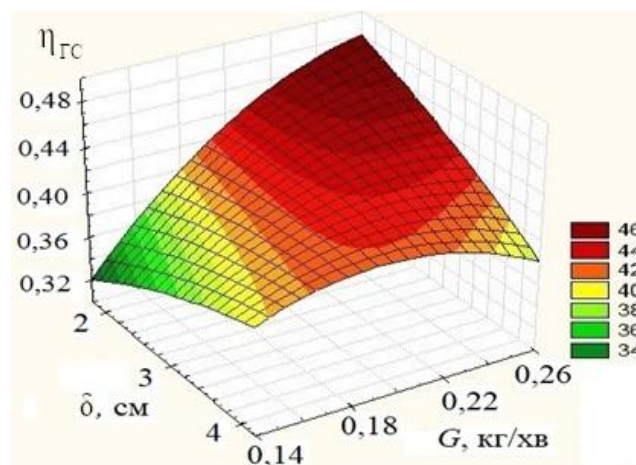
котел; 7 – гідравлічна стрілка; 8 – відстійник; 9 – закритий компенсатор об'єму (ЗКО);

10 – насосна група; 11 – триходовий клапан; Т1 – подавальний трубопровід;

Т2 – зворотний трубопровід

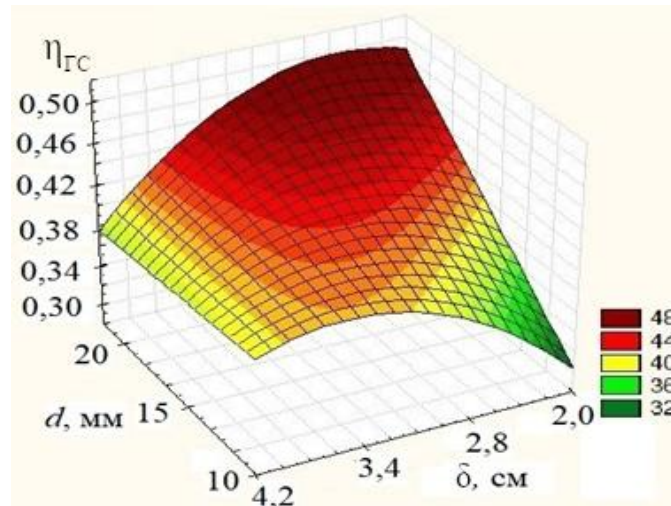
При цьому вхідними факторами прийнято: x_1 – діаметр трубок контуру циркуляції теплоносія d , мм; x_2 – відстань між трубками контуру циркуляції l , см; x_3 – товщина теплопоглинача над трубками контуру рециркуляції δ , см; x_4 – витрата теплоносія G , кг/хв. Функцією відгуку обрано коефіцієнт корисної дії геліостіни та ССТ в цілому.

Дослідним шляхом встановлено теплотехнічні характеристики ГС залежно від її конструктивних особливостей за роботи в СТ, зокрема, на рис. 4.6 показана залежність коефіцієнта корисної дії геліостіни від витрати теплоносія, діаметру трубок теплопоглинача, його товщини та відстані між ними.



a)

Рисунок 4.6 (a) – Зміна ККД геліостіни $\eta_{ГС}$ із теплопоглиначем з гребінкою в режимі прямої подачі теплоносія залежно від: товщини теплопоглинача над трубками контуру циркуляції δ , см, та витрати теплоносія G , кг/хв, за: $d = 10$ мм і $l = 10$ см, $F_{ГС} = 0,2$ м² (a); діаметра трубок контуру циркуляції теплоносія d , мм та товщини теплопоглинача над ними δ , см за: $G = 0,15$ кг/хв і $l = 10$ см, $F_{ГС} = 0,2$ м² (б)



б)

Рисунок 4.6 (б) – Зміна ККД геліостіни $\eta_{ГС}$ із теплопоглиначем з гребінкою в режимі прямої подачі теплоносія залежно від: товщини теплопоглинача над трубками контуру циркуляції δ , см, та витрати теплоносія G , кг/хв, за: діаметра трубок контуру циркуляції теплоносія d , мм та товщини теплопоглинача над ними δ , см за: $G = 0,15$ кг/хв. і $l = 10$ см, $F_{ГС} = 0,2$ м² (б)

Унаслідок математичного опрацювання даних, одержаних експериментальним шляхом, було складено регресійне рівняння

$$\eta_{ГС} = 0,450 + 0,007x_1 - 0,014x_2 - 0,05x_3 + 0,036x_4 - 0,036x_1x_2 - 0,009x_1x_3 + 0,013x_1x_4 - 0,034x_2x_3 - 0,010x_2x_4 - 0,015x_3x_4 + 0,033x_1^2 + 0,012x_2^2 + 0,005x_3^2 - 0,032x_4^2. \quad (4.3)$$

У результаті аналізу коефіцієнтів рівняння (4.3) визначено наступне: значний вплив на зміну функції відгуку виявляє фактор x_3 – товщина теплопоглинача над трубками контуру циркуляції, та x_4 – витрата теплоносія, а фактори x_1 – діаметр трубок контуру циркуляції теплоносія, та x_2 – відстань між трубками контуру циркуляції, впливають незначно; числове збільшення діаметра трубок контуру циркуляції та витрати теплоносія спричиняє зростання

функції відгуку, а збільшення відстані між трубками контуру циркуляції теплоносія і товщини теплопоглинача над ними – до зменшення її значення.

Крім того, зроблено експериментальну оцінку теплової ефективності геліостіни в системі тепlopостачання для таких визначальних факторів: x_1 – густина потоку випромінювання, Вт/м²; x_2 – витрата теплоносія, кг/хв.; x_3 – маса теплоносія в тепловому акумуляторі, кг, та одержано рівняння регресії коефіцієнта корисної дії:

$$\eta_{\text{сст}} = 0,682 - 0,030x_1 + 0,108x_2. \quad (4.4)$$

Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії показав, що значний вплив на параметр оптимізації здійснює фактор x_2 – витрата теплоносія, а фактор x_1 – густина потоку випромінювання $I_{\text{в}}$, впливає менше.

За отриманими результатами проведених експериментальних досліджень у роботі було розроблено графічну залежність, що поєднує коефіцієнт корисної дії геліостіни $\eta_{\text{ГС}}$ в режимі прямої подачі теплоносія, густину потоку випромінювання $I_{\text{в}}$ та витрату теплоносія G , на основі якої отримано залежність

$$\eta_{\text{ГС}} = 0,313 + 3,0 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{в}} + 1,76 \cdot G - 2,29 \cdot 10^{-7} \cdot I_{\text{в}}^2 - 8,863 \cdot 10^{-4} \cdot I_{\text{в}} \cdot G - 0,815 \cdot G^2. \quad (4.5)$$

Проведені експерименти свідчать, що найбільший середній ККД геліостіни в режимі вимушеної циркуляції теплоносія становить 59 % за об'єму теплоносія в тепловому акумуляторі з розрахунку 75 л на 1 м² геліостіни та густини потоку випромінювання $I_{\text{в}} = 600$ Вт/м², при цьому миттєва теплова потужність геліостіни в режимі циркуляції теплоносія різко зростала від 170 Вт/м² до 550 Вт/м², а її середнє значення становило 452 Вт/м². Визначено, що коефіцієнт тепловтрат геліостіни за досліджень у режимі прямої подачі теплоносія становив у середньому 6 – 8 Вт/(м²·°С).

Побудовано номограму залежності миттєвої теплової потужності геліостіни $Q_{\text{ГС}}$ з теплопоглиначем із гребінкою у режимі прямої подачі

теплоносія від густини потоку випромінювання I_B та питомої витрати теплоносія $G_{\Pi} = G/F_{ГС}$, кг/(хв·м²) (рис. 4.7).

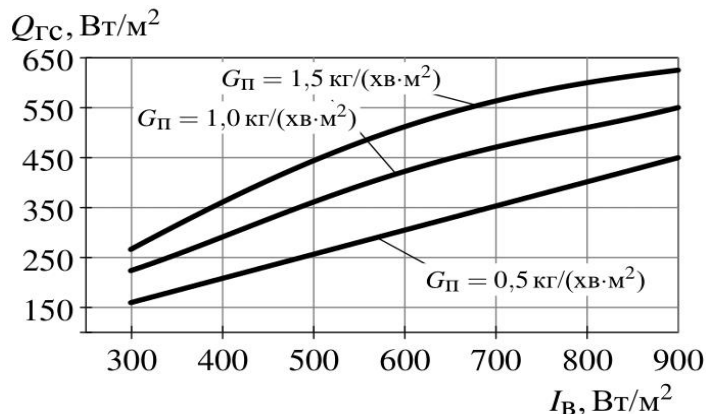


Рисунок 4.7 – Залежність миттєвої теплової потужності геліостіни $Q_{ГС}$, Вт/м², в режимі прямої подачі теплоносія від густини потоку випромінювання I_B , Вт/м², та питомої витрати теплоносія G_{Π} , кг/(хв·м²).

Ця графічна залежність дає змогу визначити миттєву теплову потужність геліостіни $Q_{ГС}$ в режимі прямої подачі теплоносія від густини теплового потоку I_B та питомої витрати теплоносія G_{Π} .

Також у роботі встановлено вплив зовнішніх чинників на миттєву теплову потужність геліостіни $Q_{ГС}$, Вт/м², з теплопоглиначем із гребінкою у режимі прямої подачі теплоносія для наступних факторів: x_1 – швидкість потоку повітря v , м/с; x_2 – напрям потоку повітря ψ , град; x_3 – густина потоку випромінювання I_B , Вт/м²; x_4 – кут падіння променів β , град. Після підрахунку коефіцієнтів регресії було записано таке рівняння регресії

$$Q_{ГС} = 0,005 - 8,333 x_1 - 4,083 x_2 + 62,834 x_3 + 53,75 x_4 - 4,25 x_1 x_2 + 0,375 x_1 x_3 + 0,5 x_1 x_4 - 0,25 x_2 x_3 - 2,625 x_2 x_4 + 41,5 x_3 x_4 + 129,265 x_1^2 + 143,015 x_2^2 + 137,265 x_3^2 + 137,765 x_4^2. \quad (4.6)$$

Аналіз коефіцієнтів регресії показав, що значний вплив на характер параметра оптимізації має фактор x_3 – густина потоку випромінювання, I_B , Вт/м²

та x_4 – кут падіння променів, β , а фактори x_1 – швидкість руху потоку повітря, v , та x_2 – напрям потоку повітря, ψ , – впливають не так істотно; чисельне збільшення кута надходження випромінювання β призводить до збільшення значення параметра оптимізації, а зростання швидкості потоку повітря і його напрямку ψ – до її спадання.

Варто зазначити, що аналогічні експериментальні дані були отримані й для режимів вимушеної та природної циркуляції теплоносія в системі тепlopостачання із геліостіною, що використано у створенні методики її інженерного розрахунку.

Завершальним етапом лабораторних досліджень було встановлення теплової ефективності геліовікна в системі тепlopостачання залежно від його конструктивних особливостей, а також від режимів роботи та впливу зовнішніх факторів. Зокрема установку для досліджень у режимі вимушеної циркуляції теплоносія через геліовікно зображено на рис. 4.8.

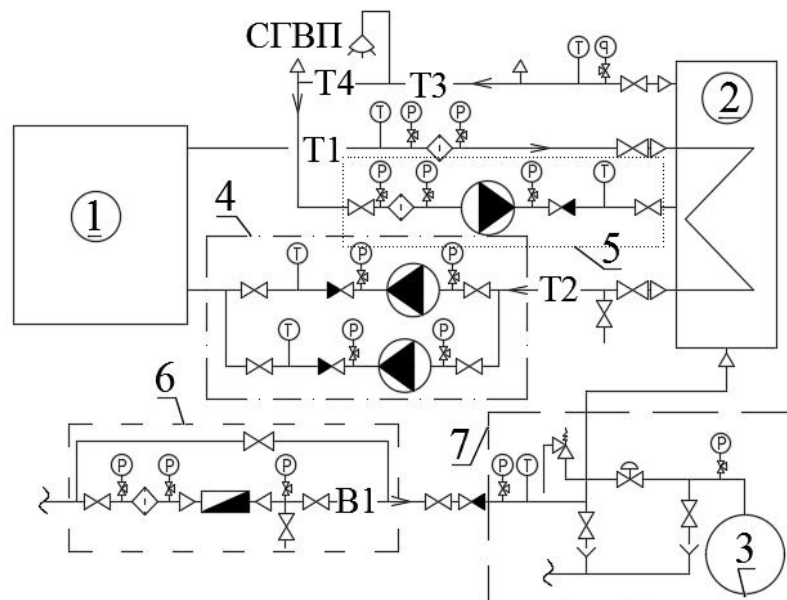


Рисунок 4.8 – Схема експериментальної установки: 1 – геліовікно; 2 – ТА; 3 – ЗКО; 4 – насосна група циркуляції теплоносія; 5 – насосна група споживача; 6 – облік витрати теплоносія; 7 – дренажна група; T1 – подавальний трубопровід; T2 – зворотній трубопровід; T3 – трубопровід системи гарячого

водопостачання (СГВП); Т4 – трубопровід циркуляції СГВП; В1 – трубопровід холодної води

Експериментальні дослідження теплової ефективності геліовікна із теплопоглиначем у вигляді гребінки, що містилась всередині конструкції, проводились з метою встановлення його теплотехнічних характеристик. Зокрема, на рис. 4.9 показано графічну залежність коефіцієнта корисної дії $\eta_{ГВ}$ такого геліовікна від густини I_B , Вт/м², та кута надходження потоку випромінювання α , град, а також співвідношення маси теплоносія в ТА і площі геліовікна $m_{ТА}/F_{ГВ}$.

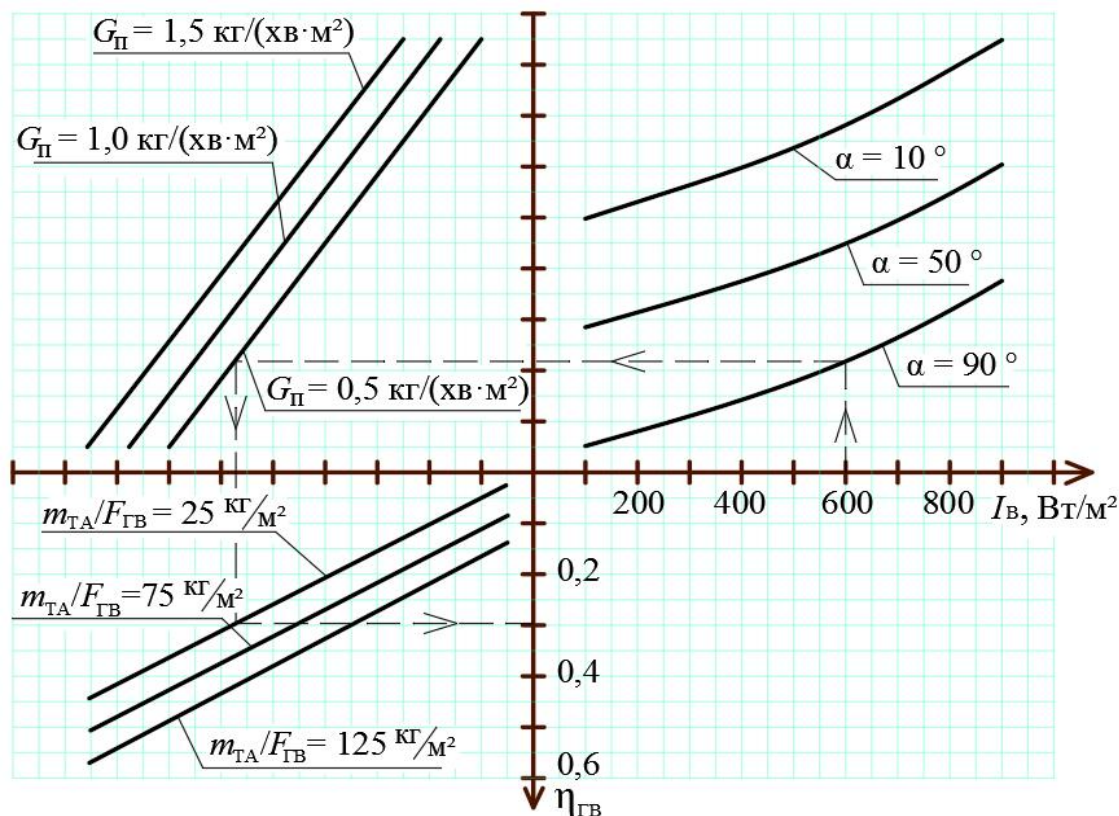


Рисунок 4.9 – Номограма залежності ККД геліовікна $\eta_{ГВ}$ від густини I_B , Вт/м², та кута надходження потоку випромінювання α , град, питомої витрати теплоносія $G_{п}$, а також співвідношення маси теплоносія в ТА до площі геліовікна $m_{ТА}/F_{ГВ}$, кг/м².

Теплова ефективність сонячного вікна з гребінкою і білими жалюзі на задній стінці показала середню миттєву тепловіддачу 170 Вт/м². На основі

проведених досліджень сонячних вікон з відкритими і закритими жалюзі було зіставлено значення ККД цих варіантів, і було встановлено, що ККД сонячних вікон із закритими жалюзі на 10 - 15 % вищий, ніж без жалюзі.

Для збільшення світлопропускання сонячного вікна було запропоновано створити теплопоглинач у вигляді теплообмінника з ребрами на верхній частині, який буде відбирати тепло у повітря, що циркулює всередині сонячного вікна. Цей теплообмінник має невеликі розміри і тому не порушує архітектурних та естетичних вимог до конструкції. Оскільки конструкція сонячного вікна містить у собі дві повітряні камери, тепловий потік може циркулювати навколо теплообмінника і передавати тепло теплоносію. Таким чином, було вивчено теплову ефективність (ККД) сонячних вікон з теплообмінниками (рис. 4.10).

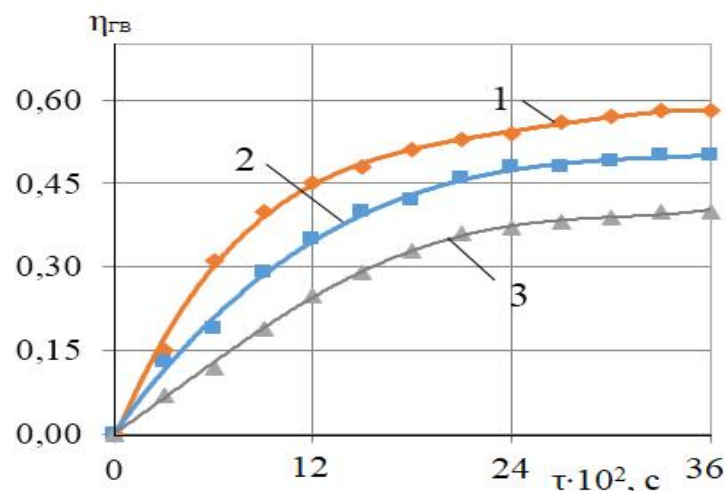


Рисунок 4.10 – Зміна ККД геліовікна $\eta_{ГВ}$ впродовж експерименту за густини потоку випромінювання $I_{в}$: 1 – 300 Вт/м²; 2 – 600 Вт/м²; 3 – 900 Вт/м².

Середнє значення ефективності сонячних теплових вікон з теплообмінниками без жалюзі склало 0,54.

У результаті серії експериментальних досліджень було визначено теплові властивості зовнішніх огорожувальних конструкцій і заснованих на них систем сонячного теплопостачання, що перетворюють сонячну енергію в теплову, під впливом визначальних чинників. Зокрема, було встановлено, що ефективність сонячного покриття в системі примусової циркуляції

охолоджувальної води становить 0,67, у системі природної циркуляції - 0,57, у системі прямого постачання - 0,71, ефективність сонячної стіни - 0,59, 0,51 і 0,67 відповідно, а сонячного вікна - 0,41, 0,39 і 0,47 відповідно. Коефіцієнт тепловтрат сонячного покриття становив 8 Вт/м², сонячної стіни - 10 Вт/м², а сонячного вікна - 17 Вт/м².

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЕПЛОВУ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ

5.1 Вплив орієнтації геліоколектора по відношенню до горизонту

У розділі проведено дослідження теплотехнічних характеристик ЗОПСЕТ в реальних умовах та на основі отриманих результатів виконано ексергетичний аналіз розроблених конструкцій геліопокриття, геліостіни та геліовікна.

Варто зазначити, що схеми установок для досліджень ССТ із ЗОПСЕТ у реальних умовах відповідали поданим у розділі 4. Під час досліджень кожного із ЗОПСЕТ впродовж дня фіксувались температури теплоносія у вхідному і вихідному трубопроводі, у тепловому акумуляторі, а також температуру оточуючого повітря та густину потоку сонячної енергії.

Під час експериментів геліопокриття встановлювалось під кутом до горизонту, що дорівнював географічній широті місця проведення експериментів – 49° , типові результати замірів для системи із геліопокриттям у режимі природної циркуляції теплоносія подано на рис. 5.1.

Досліджено, що за південної орієнтації геліопокриття середньоденна теплова потужність системи сонячного тепlopостачання на 42 % більша, ніж за північної, а східний та західний напрямки відрізняються від північного не більше, ніж на 10 % (рис. 5.2).

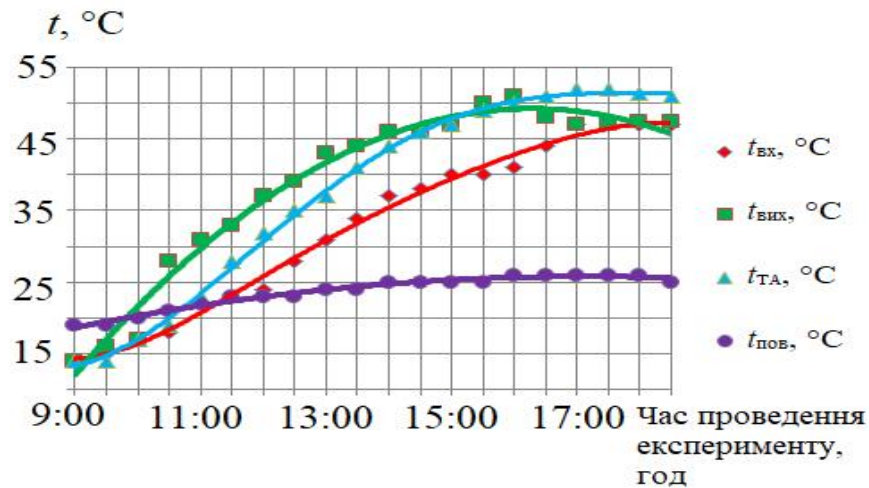


Рисунок 5.1 – Зміна температури теплоносія в тепловому акумуляторі $t_{\text{ТА}}$, $^\circ\text{C}$, у вхідному $t_{\text{вх}}$, $^\circ\text{C}$, і вихідному патрубках геліопокриття $t_{\text{вих}}$, $^\circ\text{C}$, та температури повітря оточуючого середовища $t_{\text{пов}}$, $^\circ\text{C}$, впродовж експерименту за південної орієнтації

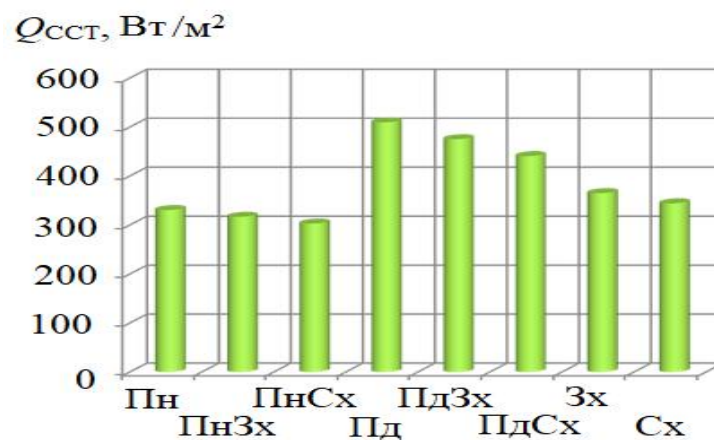


Рисунок 5.2 – Середньоденна теплова потужність системи сонячного теплопостачання з геліопокриттям $Q_{\text{сст}}$, Вт/м^2 , при орієнтаціях за сторонами горизонту

Наступним етапом досліджень було визначення теплових характеристик ККД ССТ із геліостіною, яка встановлювалась вертикально відносно горизонту та на основі цього визначалось значення коефіцієнта корисної дії системи впродовж дня, залежно від її орієнтації за сторонами горизонту (рис. 5.3).

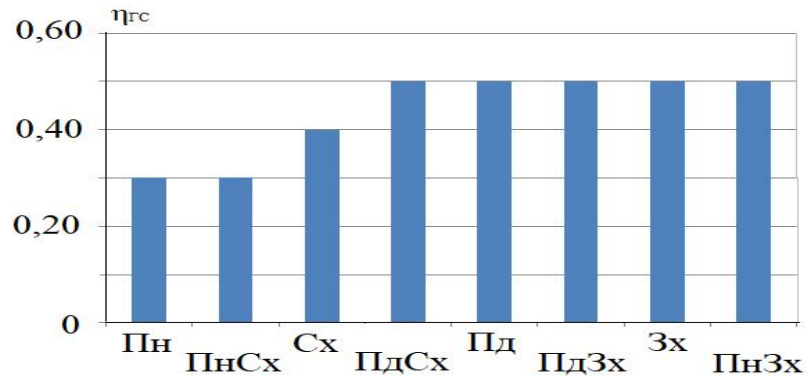


Рисунок 5.3 – ККД системи сонячного теплопостачання з геліостіною $\eta_{гс}$ за природної циркуляції теплоносія відповідно до орієнтацій за сторонами горизонту

Варто зазначити, що теплова ефективність ССТ із геліостіною за північної та північно-східної орієнтацій зменшується на 40 % відносно півдня, тоді, як за східного напрямку на – 20 %, а за інших орієнтацій зниження ефективності не спостерігалось.

Наступними експериментальними дослідженнями було визначення теплових характеристик геліовікна в СТ, при цьому змінювалась його орієнтація за сторонами горизонту у вертикальній площині. Крім того, встановлено, що середній коефіцієнт корисної дії системи теплопостачання із геліовікном за південної, південно-східної, південно-західної, північно-західної, західної орієнтації становив 0,4, а за північної, північно-східної та східної орієнтацій – 0,29.

На основі одержаних даних теплових характеристик у реальних умовах систем теплопостачання із розробленими ЗОПСЕТ проведено їхній ексергетичний аналіз. Таким чином встановлено, що ексергія, отримана упродовж дня під час проходження сонячного випромінювання крізь прозоре покриття ЗОПСЕТ у середньому змінювалась від 25 Вт о 9:30 до 80 Вт о 14:00 і зменшувалась до 20 Вт о 18:00. А зміну ексергії на вході у ЗОПСЕТ відображено на рис. 5.4.

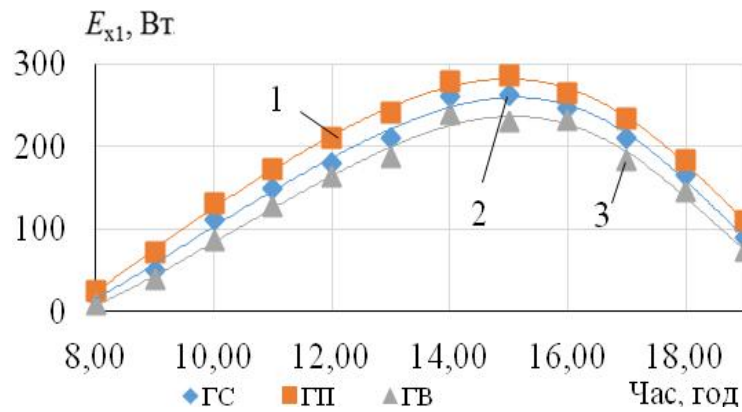


Рисунок 5.4 – Зміна ексергії E_{x1} , Вт, на вході у ЗОПСЕТ: 1 – геліопокриття; 2 – геліостіни; 3 – геліовікна.

Встановлено, що ексергія на вході у ЗОПСЕТ впродовж експерименту досягала свого максимуму (250 – 290 Вт) о 15:00, а також визначено коефіцієнт ексергетичної ефективності (рис. 5.5).

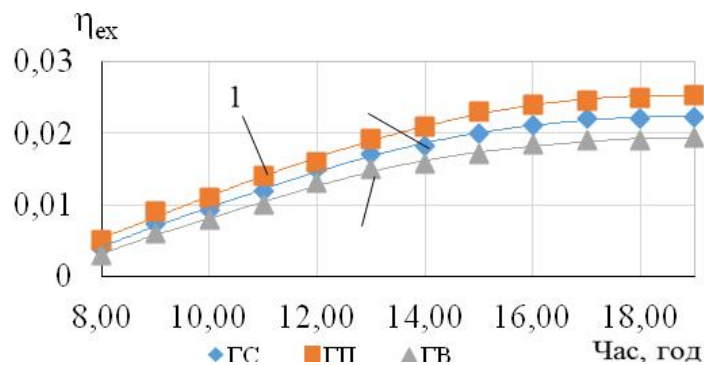


Рисунок 5.5 – Зміна коефіцієнта ексергетичної ефективності η_{ex} ЗОПСЕТ із прозорим покриттям: 1 – геліопокриття; 2 – геліостіни; 3 – геліовікна.

Як видно з наведених вище результатів досліджень, ексергетичний ККД ЗОПСЕТ становив в середньому 0,02, що відповідає середньому значенню помірно ефективних геліоколекторів.

Середній ККД ЗОПСЕТ за роботи в реальних умовах упродовж дня становив до 5 % менше, ніж в лабораторних, що пов'язано із впливом зовнішніх

чинників, які не враховувались в лабораторних умовах. Крім того, представлено значення ККД у вигляді графічної залежності ККД ЗОПСЕТ від параметра $(t_{\text{вх}}-t_{\text{пов}})/I_{\text{в}}$ (рис. 5.6).

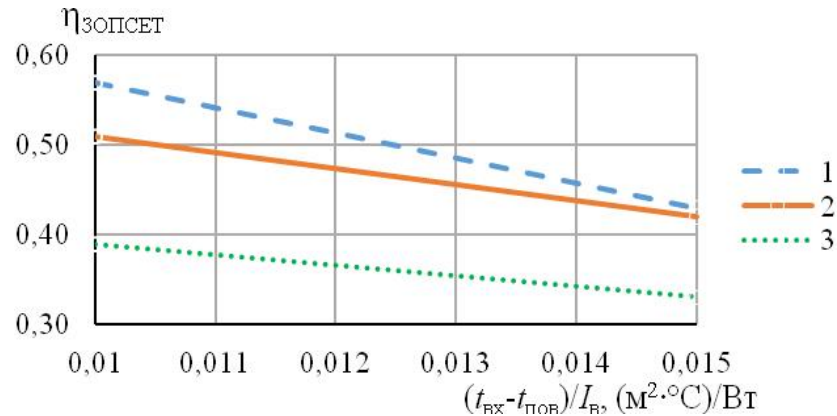


Рисунок 5.6 – Залежність ККД ЗОПСЕТ $\eta_{\text{ЗОПСЕТ}}$ від параметра $(t_{\text{вх}}-t_{\text{пов}})/I_{\text{в}}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$: 1 – геліопокриття; 2 – геліостіни; 3 – геліовікна.

На основі рисунку 30 отримано аналітичні залежності ККД ЗОПСЕТ, що необхідні для визначення теплових характеристик системи сонячного теплопостачання та використані в методиці їхнього інженерного розрахунку, а також числовому методі розрахунку системи сонячного теплопостачання із ЗОПСЕТ.

5.2 Напрямки практичного застосування представлених в роботі результатів досліджень

Розроблено та розглянуто методику інженерного розрахунку систем сонячного теплопостачання із запропонованими конструкціями геліопокриття, геліостіни та геліовікна та наведено числовий метод розрахунку системи теплозабезпечення енергоефективної будівлі на основі ЗОПСЕТ.

За результатами проведених досліджень запропоновано енергоощадну комбіновану систему тепlopостачання енергоефективних будівель на основі ЗОПСЕТ (рис. 5.7).

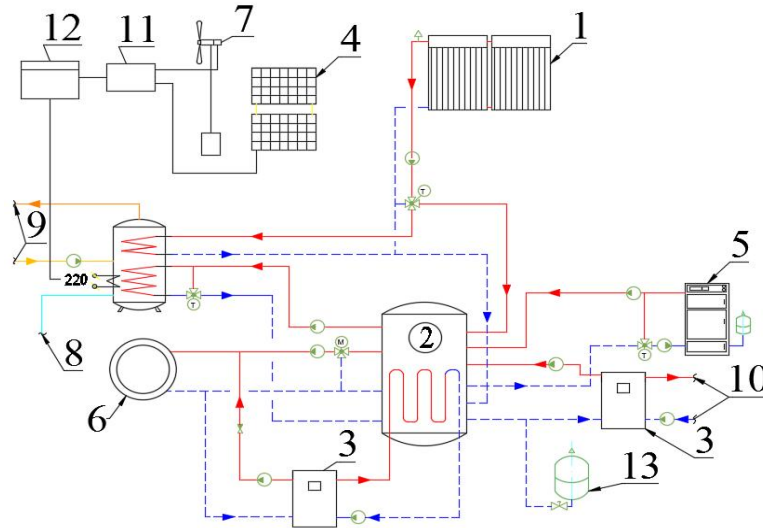


Рисунок 5.7 – Принципова схема системи теплозабезпечення енергоефективної будівлі на основі ЗОПСЕТ: 1 – ЗОПСЕТ; 2 – тепловий акумулятор періодичної дії; 3 – тепловий насос; 4 – фотоколектори; 5 – котел; 6 – система опалення; 7 – вітрогенератор; 8 – вхід холодної води; 9 – від/до СГВП; 10 – від/до споживача; 11 – інвертор; 12 – акумулятор; 13 – ЗКО.

У наведеній вище схемі теплову енергію можна отримувати від ЗОПСЕТ, класичних геліоколекторів, газового та твердопаливного котлів, а також теплового насосу, акумулювати в звичайному ТА, а її надлишок – у тепловому акумуляторі періодичної дії. Електроенергію можуть виробляти фотоколектори та вітрогенератори.

На основі проведених комплексних досліджень було отримано вихідні дані, щодо теплотехнічних характеристик ЗОПСЕТ, для розрахунку теплових процесів у СТ на їхній основі, виконано моделювання з використанням комп'ютерної техніки за системою рівнянь (7) (рис. 5.8).

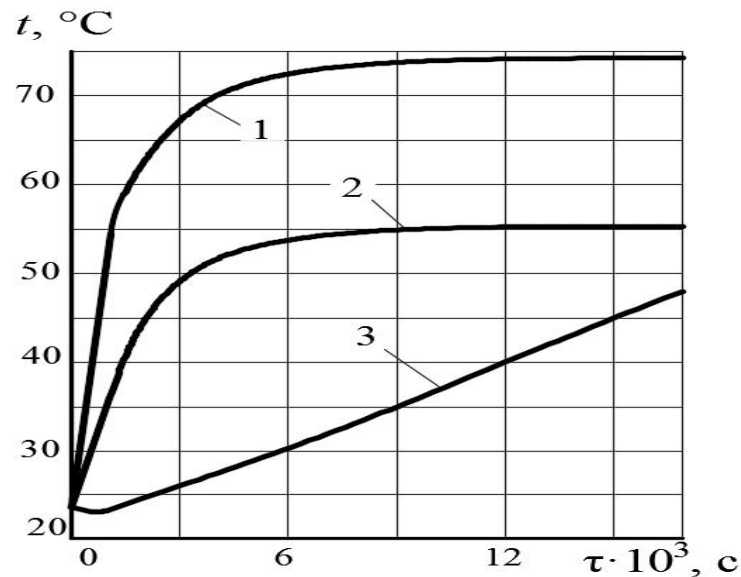


Рисунок 5.8 – Зміна середніх температур теплоносія в геліостіні (1), теплообміннику (2) і тепловому акумуляторі (3).

У результаті отриманих даних про сонячну радіацію з урахуванням кліматичних особливостей районів України запропоновано числовий метод розрахунку накопичення енергії в тепловому акумуляторі періодичної дії ССТ із ЗОПСЕТ, який дає змогу оцінити зміну температури теплоносія (рис. 5.9). Цей метод був покладений в основу розробленої комп'ютерної програми.

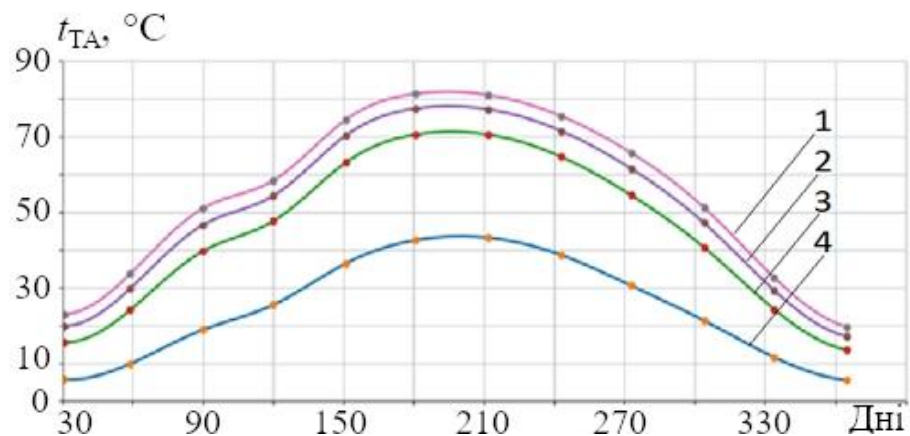


Рисунок 5.9 – Зміна температури теплоносія в тепловому акумуляторі t_{TA} періодичної дії за співвідношення маси теплоносія в ТА і площі геліостіні $m_{TA}/F_{ГС}$: 1 – 50 кг/м²; 2 – 100 кг/м²; 3 – 200 кг/м²; 4 – 1000 кг/м²

Положення, наведені вище лягли в основу методологічних аспектів визначення енергетичних показників комбінованої системи теплопостачання на основі ЗОПСЕТ. У результаті складеної програми та графоаналітичних залежностей теплотехнічних характеристик, запропонованих ЗОПСЕТ, представлено комплексний метод розрахунку комбінованих систем теплозабезпечення енергоефективних будівель та споруд із геліюпокриттям, геліюстіною та геліювікном, що реалізований у комп'ютерній програмі, яка дає можливість одержати числові та графічні дані помісячно впродовж року (рис. 5.10).

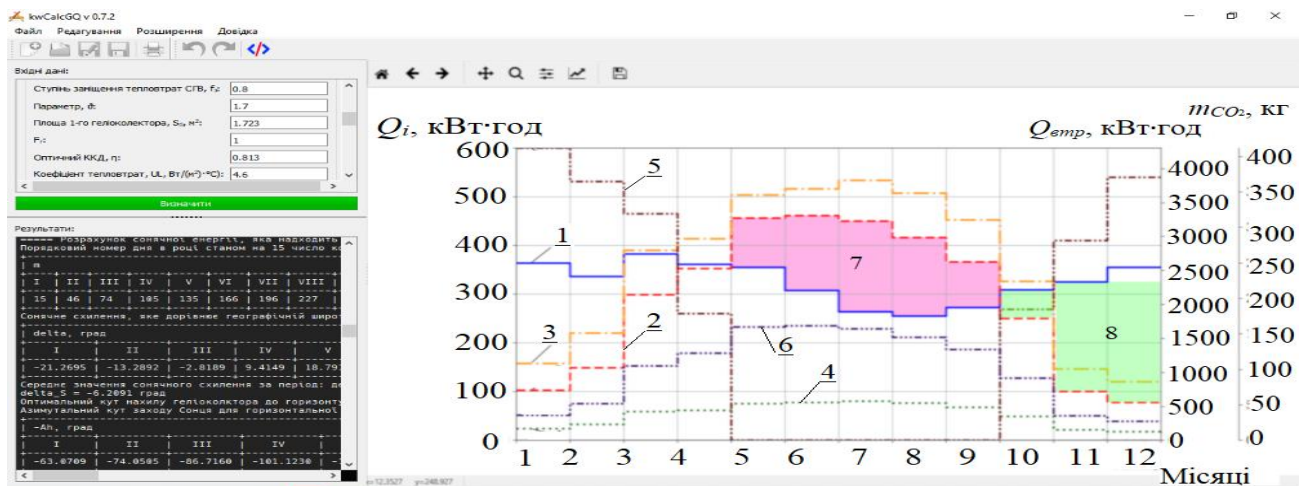


Рисунок 5.10 – Робоче вікно програми розрахунку комбінованої системи сонячного теплопостачання із ЗОПСЕТ щомісячно: 1 – тепловий потік на СГВ $Q_{\text{СГВП.міс.}}$, кВт·год; 2 – кількість тепла, одержаного СТ від ЗОПСЕТ, $Q_{\text{ЗОПСЕТ.міс.}}$, кВт·год; 3 – теплонадходження від сонячної радіації на поверхню ЗОПСЕТ, $Q_{\text{с.р.міс}}$ кВт·год; 4 – кількість енергії, отриманої від фотомодулів, $Q_{\text{foto.міс.}}$, кВт·год; 5 – тепловтрати будівлі, $Q_{\text{втр.міс.}}$, кВт·год; 6 – зменшення викидів CO_2 за реалізації ЗОПСЕТ, m_{CO_2} , кг; 7 – надлишок накопиченої теплової енергії в ТА від ЗОПСЕТ, кВт·год; 8 – додатковий потенціал від накопиченої теплової енергії (7), кВт·год.

Отже, одержано дані теплових надходжень та тепловитрат будівлі впродовж заданого часу та оцінено екологічний ефект використання енерго- та ресурсозберігаючих заходів від впровадження ССТ із ЗОПСЕТ.

Крім того, створена спрощена методика інженерного розрахунку теплових характеристик, запропонованих у роботі ЗОПСЕТ (рис. 5.11).

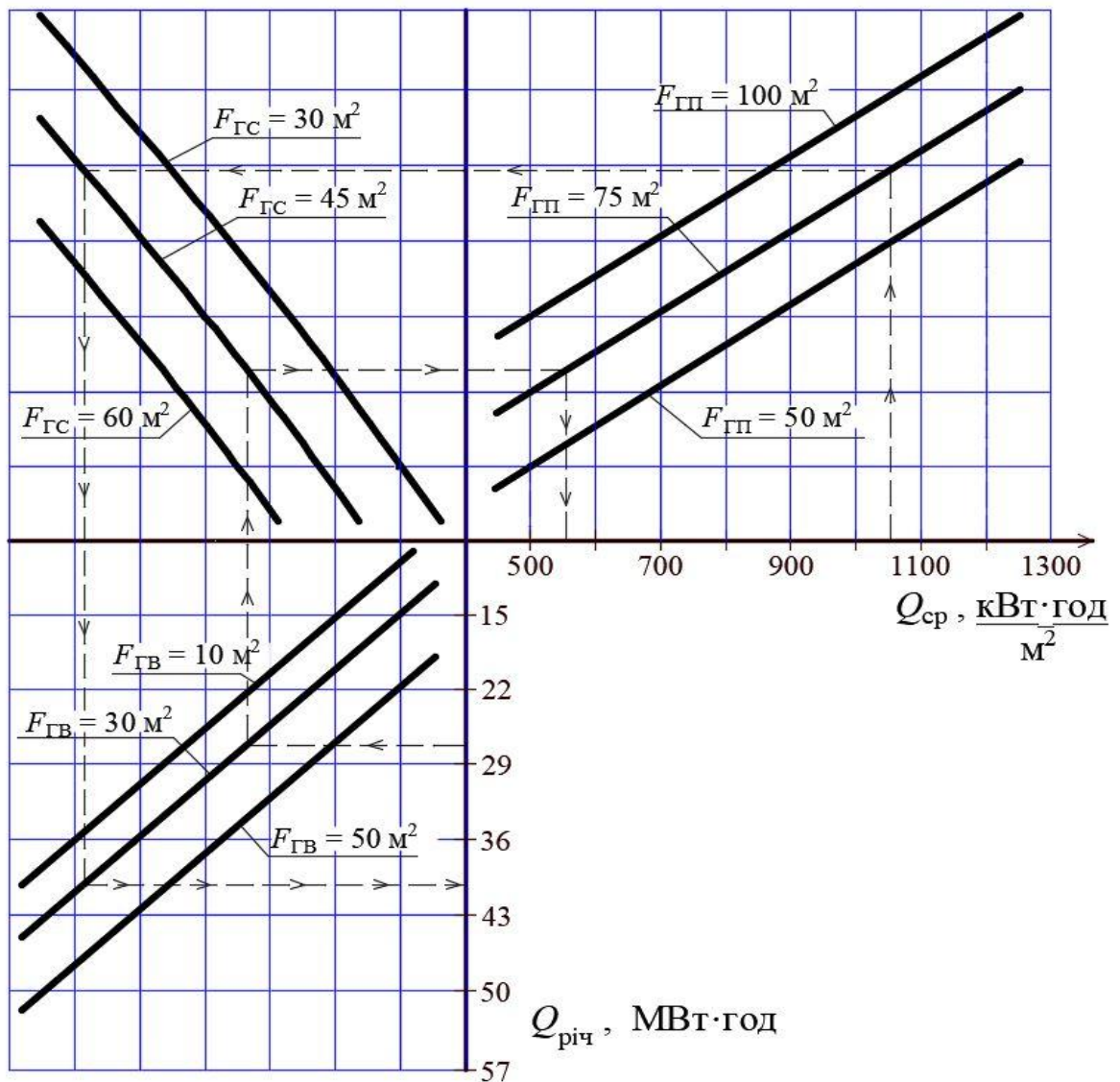


Рисунок 5.11 – Номограма для визначення теплових надходжень від ЗОПСЕТ за рік $Q_{річ}$, МВт·год, залежно від кількості сонячної енергії, що надійшла на їхню поверхню, $Q_{ср}$, (кВт·год)/м².

На основі номограми (рис. 5.11) розраховується річна кількість тепла $Q_{річ}$ залежно від площі геліовікна $F_{ГВ}$, геліостіни $F_{ГС}$ та геліопокриття $F_{ГП}$.

На основі експериментальних та аналітичних досліджень були розроблені методики інженерного розрахунку теплотехнічних характеристик, запропонованих ЗОПСЕТ, та комплексний метод розрахунку енергетичних показників системи теплозабезпечення енергоефективної будівлі з ЗОПСЕТ, яким враховані кліматичні особливості районів України. Це стало основою для розвитку методології розрахунку теплових процесів у елементах цих систем.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖЕНЬ- ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОТУ

Порівнювалися техніко-економічні характеристики сонячних покриттів, сонячних стін, сонячних вікон і сонячних колекторів, представлених на ринку, зокрема, термін окупності (до 6,5 років для ЗОПСЕТ і 10-15 років для інших сонячних колекторів).

Крім того, теперішню вартість майбутніх чистих грошових потоків від реалізації проєктів систем теплопостачання з використанням ЗОПСЕТ порівнювали з інвестиційними витратами, необхідними для їхньої реалізації, за чистою теперішньою вартістю (NPV) - універсальним критерієм оцінки економічної ефективності проєктів.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - IC, \quad (6.1)$$

де CF_t – річні чисті грошові потоки; IC – вихідні інвестиції; k – ставка дисконтування; n – термін життя проєкту.

На рисунку 6.1 зображено зміну чистої теперішньої вартості проєкту за врахування інвестицій та амортизаційних відрахувань на прикладі системи теплопостачання із геліовікном.

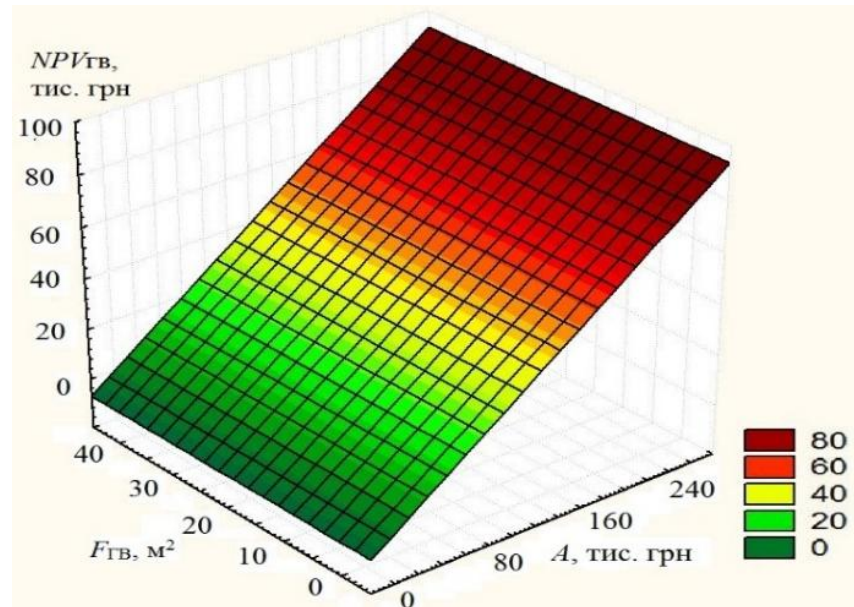


Рисунок 6.1 – Залежність чистої теперішньої вартості геліовікна $NPV_{ГВ}$, тис. грн., від варіювання площі геліовікна $F_{ГВ}$, m^2 , та затрат на амортизацію A , тис. грн

Крім того, у техніко-економічному обґрунтуванні вивчали обґрунтування витрат і доходів за різних теплових потужностей. СГВП $Q_{СГВП}$, кВт (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 – Оцінка проекту системи теплопостачання з геліовікном

$Q_{СГВП}$, кВт	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
Дохід/рік, тис. грн.	99,2	112,4	125,6	138,8	152,1	165,3	178,5	191,7	204,9	218,2
$NPV_{ГВ}$, тис. грн.	116	131	147	162	178	193	209	224	240	255
A , тис. грн.	32	36	40	44	48	53	57	61	65	69

Дохід від таких проектів сонячних вікон зростає в міру збільшення навантаження на нагрівання гарячої води, і економічна ефективність у цьому випадку залишається позитивною.

За даними Національної служби статистики України, щорічно будують у середньому 11 млн m^2 квартир, що відповідає 1800 типовим будівлям. Площа зовнішніх стін цих будівель, орієнтованих на південь, становить: 1400 000 m^2 стін, 535500 m^2 вікон і 708385 m^2 даху. На основі цих даних було розраховано

технічно здійснений потенціал теплової енергії від встановлення ЗОПСЕТ у нових будівлях в Україні на період 2011 - 2022 рр.

Варто зазначити, що в середньому встановлення ЗОПСЕТ у нових будівлях в Україні дасть змогу генерувати 700 ГВт·год теплової енергії на рік, 385 ГВт·год від сонячних стін, 220 ГВт·год від сонячних покриттів, 111 ГВт·год від сонячних вікон і скоротити 280000 т викидів CO₂.

Даний аналіз підтверджує економічну та екологічну ефективність використання розроблених в даному дослідженні ЗОПСЕТ в системах теплопостачання енергоефективних будівель і споруд.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу проблематики енергоефективного теплопостачання будівель з використанням сонячних теплових колекторів, їхньої теплової ефективності, методів розрахунку та характеристик встановлено та запропоновано необхідність створення енергозберігаючих сонячних теплових комбінованих систем теплопостачання з елементами, інтегрованими в конструкцію зовнішніх огорожень будинків і споруд, і нові напрямки розвитку.

2. У результаті комплексних теоретичних, експериментальних і натурних досліджень теплових процесів в елементах системи сонячного теплопостачання розв'язано важливі науково-технічні проблеми енергоефективного теплопостачання будівель за допомогою комбінованої системи теплопостачання на основі зовнішньої огорожі, що перетворює сонячну енергію в теплову.

3. На основі аналітичних досліджень та опрацювання статистичних даних узагальнено кліматичні дані регіонів України щодо сонячної радіації в умовах середньої хмарності з урахуванням відбитої складової, отримані графічні та аналітичні залежності, що характеризують:

а) річний потенціал сонячної радіації (прямої, розсіяної та відбитої) на вертикальну поверхню південної орієнтації становить $550 - 1000$ (кВт·год)/м², у той час, як рівень відбитої для липня за умов середньої хмарності – $46 - 65$ (кВт·год)/м², що становить до 30% загального потенціалу в цей період;

б) загальна річна кількість прямої сонячної радіації, що досягає горизонтальних і вертикальних поверхонь на півночі, північному сході, сході, південному сході, півдні, південному заході, заході, північному заході, розсіяної та відбитої, становить $4500 - 6600$ (кВт·год)/м²;

в) загальна річна кількість сонячної радіації становить $800 - 1400$ (кВт·год)/м², а відбита сонячна радіація становить $312 - 424$ (кВт·год)/м², досягаючи 40% у центральній частині України.

4. На основі створеної комп'ютерної моделі зовнішньої огорожі, що перетворює сонячну енергію на теплову, проведено комп'ютерне моделювання теплових процесів в елементах системи тепlopостачання енергоефективних будівель, при цьому миттєва тепловіддача за природної циркуляції теплоносія складає в середньому 540 Вт/м^2 для сонячної теплової фарби, сонячних теплових стін - 500 Вт/м^2 і сонячних теплових вікон – 370 Вт/м^2 , при цьому ККД в середньому складає від 41 % до 60 %.

5. Числове моделювання теплових процесів в елементах зовні замкнених систем тепlopостачання, що перетворюють сонячну енергію на теплову, з удосконаленими фізико-математичними моделями, графічним аналізом залежності температури теплоносія та кількості теплової енергії, отриманої теплоаккумулятором, від густини променистого потоку тепловідводу та часу опромінення (залежність коефіцієнтів тепловіддачі сонячного покриття від швидкості та напрямку повітряного потоку (від 4 до $12,5 \text{ Вт/м}^2$ для конструкцій із прозорими покриттями).

6. Зокрема, було показано, що відносна похибка в розрахунку температури теплоносія становить до 35% при розгляді від одного до трьох шарів.

7. У результаті комплексних експериментальних досліджень теплофізичних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій, що перетворюють сонячну енергію на теплову, і систем тепlopостачання на їхній основі встановлено вплив динамічного режиму теплоносія, його енергії та кінетичних властивостей довкілля на їхні теплові властивості, одержано відповідні графіко-аналітичні залежності та встановлено, що.

а) ККД сонячного покриття в режимі примусової циркуляції теплоносія становить 0,67, за природного руху - 0,57, за прямої подачі - 0,71, ККД сонячної стінки - 0,59, 0,51 і 0,67 відповідно, а ККД сонячного вікна - 0,41, 0,39 і 0,47;

б) загальний коефіцієнт тепловтрат для сонячних покриттів становить 8 Вт/м^2 , 10 Вт/м^2 для сонячних стін і 17 Вт/м^2 для сонячних вікон;

в) ефективність використання енергії становить 2,5% для сонячних покриттів, 2,2% для сонячних стін і 1,9% для сонячних вікон.

8. Результати дослідження в реальних умовах системи тепlopостачання на основі зовнішньої огорожі, що перетворює сонячну енергію на теплову, показали, що вплив орієнтації відносно кардинала на теплову ефективність було отримано та виявлено наступне:

а) за південної орієнтації сонячного теплового покриття середньодобова теплова потужність системи сонячного тепlopостачання на 42% вища, ніж за північної орієнтації, у той час як східна і західна орієнтації відрізняються від північної не більше ніж на 10%;

б) теплова ефективність сонячних теплових систем з SolarWall на 40% нижча в північному і північно-східному напрямках порівняно з південним і на 20% нижча в східному напрямку;

в) середня ефективність систем тепlopостачання із сонячними вікнами в південній, південно-східній, південно-західній, північно-західній і західній орієнтації становить 40%, а в північній, північно-східній і східній орієнтації - 29%. В азимутах цей показник становить 29%.

9. Проведено техніко-економічну оцінку використання комбінованих систем тепlopостачання для енергоефективних будівель на основі зовнішніх огорожувальних конструкцій, що перетворюють сонячну енергію в теплову. Зокрема:

а) економічна ефективність проекту була продемонстрована шляхом порівняння теперішньої вартості майбутнього чистого грошового потоку від реалізації проекту системи тепlopостачання на основі ОПСЕТ з інвестиційними витратами, необхідними для її реалізації за чистою теперішньою вартістю;

б) термін окупності не перевищує 6,5 років, середньорічний технічний потенціал енергозбереження нового будівництва в Україні становить 700 ГВт·год/рік і 250 000 т/рік скорочення викидів CO₂.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Справочник по климату СССР. Вып. 10. УССР. ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 124 с.
2. Справочник по климату СССР. Вып. 10. УССР. ч. II. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 608 с.
3. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 216 с.
4. Установки солнечного горячего водоснабжения: ВСН 52 – 86. Госгражданстрой. М.: Стройиздат, 1988. 16 с.
5. Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є. та інші. Теплові розрахунки геліосистем. Дніпропетровськ: Вид. Дніпр. ун-ту, 2003. 124 с.
6. Системы тепловых насосов. Инструкция по проектированию. Viessmann. 2000. 48 с.
7. Накорчевский А.И. Теоретические и прикладные аспекты грунтового аккумулирования и извлечения теплоты. Киев.: Наук. думка, 2008. 150 с.
8. Посібник до Норм та вказівок по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. КТМ 204 Україна 244-94. Київ, 2004. 44 с.
9. Розенфельд Л. М., Ткачев А.Г. Холодильные машины и аппараты. М.: Изд. торг. лит., 1960. 656 с.
10. Хлудов А.В. Горячее водоснабжение. М.: Госстройиздат, 1957. 464 с.
11. Информационный бюллетень по возобновляемым источникам энергии. М.: Энергетический диалог «Россия – ЕС». 2004. 32 с.

12. T. Smitt, D.Mangold. Season Thermal Storage in Europ. / ISES solar World Congress. - 2003. – p. 16.
13. Васильев Г.П., Н. В. Шилкин. Энергоэффективные здания с теплонасосными системами теплоснабжения. М., АВОК, 2002, - № 5.
14. Сабади П.Р. Солнечный дом / Пер. с англ. Н.Б. Гладковой, М.: "Стройиздат", 2001. – 113 с.
15. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Авезов. Р.Р. и др. / Под ред. Сарнацкого Э.В., М.: "Стройиздат", 2003. – 298 с.